

720737



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**“APROXIMACION A UNA CLASIFICACION Y
CARACTERIZACION DE EQUIPOS PARA
LA INDUSTRIA DE PROCESO”**

TRABAJO MONOGRAFICO DE ACTUALIZACION

M A N C O M U N A D O

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A N :
SALOME MARIBEL DE LA PARRA ARCINIEGA
PATRICIA SALIDO RESENDIZ**



México, D. F.



1990

EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS _____
N.º 4.6 249
FECHA _____
PROB. _____



Con Cariño

A mis padres: SR. SERGIO DE LA PARRA SANCHEZ
Y
SRA. MARIA FRANCISCA ARCINIEGA DE DE LA PARRA,

A mis abuelos: SR. SALVADOR ARCINIEGA RIVERA
(R. I. P.)
Y
SRA. GUADALUPE FERNANDEZ DE ARCINIEGA,
(R. I. P.)

A mis tíos: MARIA, GUADALUPE, SALVADOR Y DAVID,

A mi amiga: PATRICIA.

Por su apoyo y comprensión que siempre me brindaron.

Con amor y gratitud
A mi novio: FRANCISCO GERARDO
Por su apoyo y consejos.

A la memoria de mi Padre:
LIC. RUBEN SALIDO ORCILLO
(R. I. P.)
La persona más humanitaria
que he conocido en mi vida.

A mi Madre:
SRA. ERNESTINA RESENDIZ VDA. DE SALIDO
Quien con su amor y dedicación al tra-
bajo me ha enseñado a no desfallecer -
nunca. Y gracias a quien ha sido posi-
ble la realización de este trabajo.

A mis hermanos:
ALBERTO, FEDERICO Y ERNESTO
Por su apoyo a lo largo de
mi época de estudiante.

A mis amigos:

ARTURO, OLIVIA, LUIS MIGUEL Y CLAUDIA
Quienes han hecho más ligeros mis días
de estudiante, con los que le he absor-
bido el tuétano a la vida y quienes me
han enseñado que la amistad existe.

A SALOME:

Quien ha sido una gran compañera
y amiga. Y sin cuya ayuda no hu-
biese sido posible este trabajo.

A ROBERTO:

Quien ha sido mi apoyo en
momentos difíciles.

Con admiración y respeto a nuestro asesor:

M. C. ENRIQUE VILLARREAL DOMINGUEZ

INDICE

INTRODUCCION

17

CAPITULO I

CARACTERIZACION DE LOS EQUIPOS DE PROCESO

- 1.1. TUBERIAS DE PLANTAS DE PROCESO 21
- 1.1.1. Tuberías y Tubos, 21.
 - 1.1.2. Normas Sobre Tuberías, 22.
 - 1.1.3. Bridas y Accesorios, 25.
 - 1.1.3.1. Bridas, 25.
 - 1.1.3.2. Accesorios, 32.
 - 1.1.4. Normas Relativas a Bridas y Accesorios, 34.
 - 1.1.5. Válvulas, 38.
 - 1.1.5.1. Tipos de válvulas según su construcción y acción, 40.
 - Válvula de Compuerta, 40.
 - Válvula de Guillotina, 42.
 - Válvula de Asiento, 42.
 - Válvula de Retención, 44.
 - Válvula de Macho, 45.
 - Válvula de Bola, 47.
 - Válvula de Mariposa, 47.
 - Válvula de Angulo 90°, 48.
 - Válvula de Aguja, 48.
 - Válvula de Membrana o Diafragma, 48.
 - Válvula de Pinza, 49.
 - 1.1.5.2. Tipos de válvulas según su acoplamiento, 49.
 - 1.1.5.3. Normas referentes a válvulas, 49.
- 1.2. BOMBAS 50
- 1.2.1. Bombas de Energía Cinética, 51.
 - 1.2.1.1. Bombas Centrífugas, 51.
 - 1.2.2. Bombas de Desplazamiento Positivo o Volumétrico, 62.
 - 1.2.2.1. Bombas Alternativas, 62.
 - 1.2.2.2. Bombas Dosificadoras, 64.
 - 1.2.2.3. Bombas Rotativas, 65.
 - De engranajes, 67.
 - De tornillos, 69.
 - De paletas, 69.
 - 1.2.3. Bombas Especiales, 70.
 - 1.2.4. Ensayo de Bombas, 75.
- 1.3. VENTILADORES 75
- 1.3.1. Tipos de Ventiladores, 76.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1.3.1.1. Ventiladores centrífugos, 76.	
1.3.1.2. Ventiladores helicoidales y axiales, 78.	
1.4. COMPRESORES	80
1.4.1. De Desplazamiento Positivo o Volumetricos, 80.	
1.4.1.1. Compresores alternativos, 80.	
1.4.1.2. Rotativos, 82.	
-Paletas, 82.	
-Anillo Líquido, 83.	
-Root, 84.	
-De tornillo, 84.	
1.4.2. De Desplazamiento Cinético	
1.4.2.1. Centrífugos, 86.	
1.4.2.2. Axiales, 89.	
1.4.3. Ensayo de Compresores, 90.	
1.5. FILTROS	91
1.5.1. Filtros de Torta, 91.	
1.5.2. Filtros por Gravedad (de carga hidrostática), 91.	
1.5.2.1. Filtros de succión por gravedad, 92.	
1.5.2.2. Filtros de bolsa, 92.	
1.5.2.3. Filtros de arena, 93.	
1.5.3. Filtros a Presión, 93.	
1.5.3.1. Filtros a presión por lotes, 94.	
-Filtro de Arena de Flujo Ascendente, 94.	
-Filtros Frensa, 94.	
1.5.3.2. Filtros de Presión Continua, 98.	
-Filtros Giratorios de Presión Continua, 98.	
1.5.4. Filtros al Vacío, 98.	
1.5.4.1. Filtros al vacío por lotes, 99.	
1.5.4.2. Filtros continuos al vacío, 100.	
1.5.4.3. Filtros continuos horizontales al vacío, 101.	
1.5.5. Filtros de Clarificación, 102.	
1.5.6. Selección de Equipos de Filtración, 103.	
1.6. INTERCAMBIADORES DE CALOR	105
1.6.1. Clasificación en Base a la Función que Realizan, 105.	
1.6.2. Clasificación en Base a su Forma Constructiva, 106.	
1.6.3. Intercambiadores de Haz Tubular, 106.	
1.6.3.1. Descripción, 111.	
1.6.4. Refrigerantes de Aire o Aerorrefrigerantes, 116.	
1.6.5. Intercambiadores de Placas, 125.	
1.7. EVAPORADORES	127
1.7.1. Evaporadores para Plantas de Fuerza, 127.	

1.7.2. Evaporadores Químicos, 129.	
1.7.2.1. Evaporadores de tubos horizontales, 130.	
1.7.2.2. Evaporadores de calandria, 131.	
1.7.2.3. Evaporador de canasta, 133.	
1.7.2.4. Evaporadores de tubos verticales largos, 135.	
1.7.2.5. Evaporadores de circulación forzada, 135.	
1.7.3. Estándares y Códigos, 138.	
1.8. CALDERAS	139
1.9. HORNOS	144
1.10. TORRES DE ENFRIAMIENTO	151
1.10.1. Clasificación de las Torres de Enfriamiento, 151.	
1.10.1.1. De tiro natural, 151.	
1.10.1.2. De tiro mecánico, 152.	
-Forzado, 152.	
-Inducido, 152.	
1.11. RECIPIENTES A PRESION Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO	155
1.11.1. Recipientes a Presión, 157.	
1.11.1.1. Envolvente, 157.	
-Carcasa, 157.	
-Fondos, 158.	
-Transición Trococónica, 163.	
1.11.1.2. Dispositivos de sujeción o apoyo, 163.	
-Apoyos para recipientes verticales, 164.	
-Apoyos para recipientes horizontales, 167.	
1.11.1.3. Conexiones, 168.	
1.11.1.4. Partes internas, 174.	
1.11.2. Tanques de Almacenamiento, 178.	
1.12. BIBLIOGRAFIA	179

CAPITULO II

PRINCIPIOS DE CORROSION

2.1. DEFINICION DE CORROSION	182
2.2. ASPECTOS ELECTROQUIMICOS	183

2.2.1.	Características de la Corrosión,	183.
2.2.2.	Potencial de Oxidación,	185.
	-Energía para las reacciones redox,	186.
	-Potenciales de electrodo simple,	186.
2.2.3.	Ecuación de Nernst,	187.
2.2.4.	Reacciones Electroquímicas,	189.
2.2.5.	Polarización,	196.
2.2.6.	Diagramas Potencial-pH,	199.
2.2.7.	Pasividad,	205.
2.3.	EFFECTOS AMBIENTALES	207
2.3.1.	Efectos del Oxígeno y de los Agentes Oxidantes,	207.
2.3.2.	Efectos de la Velocidad,	210.
2.3.3.	Efectos de la Temperatura,	211.
2.3.4.	Efectos de la Concentración del Agente Corrosivo,	213.
2.3.5.	Efectos de los pares Galvánicos,	215.
2.4.	ASPECTOS METALURGICOS	216
2.4.1.	Propiedades Metálicas,	216.
2.4.2.	Corrosión por Taña,	220.
2.5.	TIPOS DE CORROSION	221
2.5.1.	Clasificación de los Tipos de Corrosión,	221.
2.5.2.	Expresiones para la Velocidad de Corrosión,	222.
2.5.3.	Corrosión Generalizada,	224.
2.5.4.	Corrosión Localizada,	224.
2.5.4.1.	Corrosión por Picadura,	225.
2.5.4.2.	Corrosión por Hendidura o Fisura,	231.
2.5.4.3.	Corrosión por Cataplasma,	232.
2.5.4.4.	Corrosión por Deposición,	232.
2.5.4.5.	Corrosion Filiforme,	233.
2.5.4.6.	Corrosión Galvánica,	235.
	-Mecanismo de la Corrosión Galvánica,	239.
	-Prevención,	241.
2.5.4.7.	Corrosión Intergranular,	242.
2.5.4.8.	Corrosión Transgranular,	244.
2.5.4.9.	Fractura por Corrosión bajo Tensión,	245.
	-Métodos de Prevención,	247.
2.5.4.10.	Corrosión Bajo Tensión,	249.
2.5.4.11.	Corrosión-Fatiga,	250.
2.5.4.12.	Celdas de Concentración,	257.
2.5.4.13.	Corrosión por Contacto,	261.
2.5.4.14.	Fenómenos Producidos por la Presencia de Hidrógeno,	261.
2.5.4.15.	Pérdida de la Ductilidad y la Resistencia,	262.
2.5.4.16.	Daño por Hidrógeno,	263.

- 2.5.4.17. Fractura Inducida por Hidrógeno (HIC), 264.
- 2.5.4.18. Efectos Producidos por Temperaturas Elevadas, 264.
- 2.5.4.19. Fragilización por Hidrógeno, 265.
- 2.5.4.20. Corrosión-Erosión, 266.
- 2.5.4.21. Cavitación, 268.
- 2.5.4.22. Ataque Intrusivo, 271.
- 2.5.4.23. Corrosión por Desgaste, 273.
- 2.5.4.24. Corrosión por Choque, 275.
- 2.5.4.25. Oxidación, 276.
- 2.5.4.26. Sulfuración, 276.
- 2.5.4.27. Desaleación, 277.
- 2.5.4.28. Dezincificación, 278.
 - Mecanismo, 280.
 - Prevención, 280.
- 2.5.4.29. Corrosión Grafítica, 280.
- 2.5.4.30. Deterioro de los Polímeros y Cerámicos, 281.
- 2.5.4.31. Deterioro del Vidrio (Reacción de los Componentes), 282.
- 2.5.4.32. Ruptura de las Cadenas de Polímeros, 285.
- 2.5.4.33. Disolución e Hinchamiento, 289.
- 2.5.4.34. Daños por Radiaciones Nucleares, 290.
- 2.5.4.35. Corrosión Biológica, 291.
 - MICROORGANISMOS, 292.
 - Bacterias Anaeróbicas, 293.
 - Bacterias Aeróbicas, 294.
 - Otros Microorganismos, 295.
 - Prevención de la Corrosión Microbiológica, 296.
 - MACROORGANISMOS, 298.
 - Hongos y Moho, 298.
 - Organismos Acuáticos, 299.

2.6. BIBLIOGRAFIA

301

CAPITULO III

MATERIALES DE CONSTRUCCION

3.1. METALES

305

- 3.1.1. Hierros Fundidos, 305.
 - 3.1.1.1. Hierro Fundido Gris, 306.
 - 3.1.1.2. Hierros Fundidos Blancos, 310.
 - 3.1.1.3. Hierros Maleables, 310.
 - 3.1.1.4. Hierros Dúctiles, 313.
 - 3.1.1.5. Hierro Fundido con Alto Contenido de Silicón, 315.
 - 3.1.1.6. Otras Aleaciones de Hierros Fundidos, 317.
- 3.1.2. Hierros Comercialmente Puros, 317.

- 3.1.2.1. Hierro Forjado, 318.
- 3.1.3. Aceros de Baja Aleación, 321.
- 3.1.4. Aleaciones de Acero con Contenido Medio de Carbón, 324.
 - 3.1.4.1. El "Durimet 20" y Otras Aleaciones "20", 326.
 - 3.1.4.2. "Worthite", 330.
 - 3.1.4.3. "Carpenter 20", 332.
 - 3.1.4.4. "Ni-o-nel", 334.
 - 3.1.4.5. "Hastelloy F", 336.
 - 3.1.4.6. "Illium", 337.
- 3.1.5. Aceros Inoxidables, 339.
 - 3.1.5.1. Grupo I, 340.
 - 3.1.5.2. Grupo II, 340.
 - 3.1.5.3. Grupo III, 342.
 - 3.1.5.4. Grupo IV, 343.
- 3.1.6. El Aluminio y sus Aleaciones, 346.
- 3.1.7. Magnesio y sus Aleaciones, 352.
- 3.1.8. El Plomo y sus Aleaciones, 353.
- 3.1.9. Cobre y sus Aleaciones, 354.
- 3.1.10. Níquel y sus Aleaciones, 355.
 - 3.1.10.1. Aceros Inoxidables Cromo-Níqueles Austeníticos, 358.
 - Aceros del Tipo 18-8, 358.
 - Aceros Austeníticos Cromo-Níquel 25-12, 359.
 - Aceros Austeníticos 25-20, 359.
 - 3.1.10.2. Aceros Cromo-Níqueles Austeníticos de Mayor Porcentaje de Níquel que de Cromo, 360.
 - Acero Cromo-Níquel Austenítico 9-22, 360
 - Acero Austenítico Cromo-Níquel 20-25, 360.
 - Acero 12-12 de Fácil Embutición, 361.
 - 3.1.10.3. "Hastelloy B", 362.
 - 3.1.10.4. "Chlorimet 2", 366.
- 3.1.11. Aleaciones de Cobalto, 367.
- 3.1.12. El Zinc y sus Aleaciones, 370.
- 3.1.13. Estaño y Revestimiento de Estaño, 371.
 - 3.1.13.1. Estaño Puro, 371.
- 3.1.14. Cadmio, 373.
- 3.1.15. El Titanio y sus Aleaciones, 374.

3.2. METALES REFRACTARIOS

379

- 3.2.1. Columbio, 379.
- 3.2.2. Molibdeno, 380.
- 3.2.3. Tantalio, 380.
- 3.2.4. Tungsteno, 381.
- 3.2.5. Zirconio, 381.

3.3. METALES NOBLES

382

- 3.3.1. Oro, 382.
- 3.3.2. Platino, 383.
- 3.3.3. Plata, 385.

3.4. NO METALES

385

- 3.4.1. Caucho Sintético y Natural, 385.
 - 3.4.1.1. Caucho Natural, 386.
 - 3.4.1.2. Caucho Sintético, 387.
- 3.4.2. Plásticos, 388.
 - 3.4.2.1. Termoplásticos, 389.
 - 3.4.2.1.1. Fluorocarbonados, 389.
 - 3.4.2.1.2. Acrílicos, 390.
 - 3.4.2.1.3. Nylon, 390.
 - 3.4.2.1.4. Poliéter Clorado, 392.
 - 3.4.2.1.5. Polietilenos, 392.
 - 3.4.2.1.6. Polipropileno, 393.
 - 3.4.2.1.7. Poliestireno, 393.
 - 3.4.2.1.8. Cloruro de Polivinilo Rígido, 394.
 - 3.4.2.1.9. Vinil, 394.
 - 3.4.2.1.10. El Grupo ABS, 394.
 - 3.4.2.2. Termofijos, 396.
 - 3.4.2.2.1. Epóxicos, 396.
 - 3.4.2.2.2. Fenólicos, 397.
 - 3.4.2.2.3. Poliésteres, 397.
 - 3.4.2.2.4. Silicones, 398.
 - 3.4.2.2.5. Ureas, 398.
 - 3.4.2.2.6. Plásticos Laminados y Reforzados, 398.

3.5. OTROS NO METALES

399

- 3.5.1. Cerámica, 399.
- 3.5.2. Ladrillo Acido, 399.
- 3.5.3. Grés y Porcelana, 400.
- 3.5.4. Arcilla Estructural, 400.
- 3.5.5. Vidrio, 400.
- 3.5.6. Sílica Vítreo, 401.
- 3.5.7. Concreto, 401.
- 3.5.8. Carbón y Grafito, 401.
- 3.5.9. Madera, 403.

3.6. SOLDADURA

404

- 3.6.1. Soldabilidad de los Aceros, 404.
- 3.6.2. Soldabilidad de los Metales Ferrosos, 407.
- 3.6.3. Procedimientos de Soldadura, 408.
 - Soldadura Autógena u Oxiacetilénica, 409.
 - Soldadura Manual por Arco Eléctrico, 409.
 - Soldadura Bajo Gas de Protección, 410.

- Soldadura Automática por Arco Sumergido, 412.
- 3.6.4. Parámetros de Soldadura, 414.
 - 3.6.4.1. Soldadura Manual, 414.
 - 3.6.4.2. Soldadura Semiautomática, 414.
 - 3.6.4.3. Soldadura Automática, 416.
- 3.6.5. Electrodo, 416.
 - a) Electrodo Desnudos, 416.
 - b) Electrodo de Alma Llena, 417.
 - c) Electrodo Recubiertos, 417.
 - 3.6.5.1. Revestimiento de Electrodo, 418.
 - 3.6.5.2. Clasificación de los Electrodo, 419.
 - Oxidantes, 419.
 - Acidos, 419.
 - Rutilos, 420.
 - Básicos, 420.
 - Orgánicos o Celulósicos, 421.
 - Resistentes, 421.
 - De Gran Rendimiento, 422.
 - De Recargue, 422.
- 3.6.6. Preparación de Bordes para la Soldadura, 422.
 - Bordes en Escuadra, 423.
 - Bordes en V, 423.
 - Bordes en U, 424.
 - Bordes en X, 424.
 - Bordes en Doble U, 424.
 - 3.6.6.1. Limpieza, 425.
- 3.6.7. Efectos del Calor en la Soldadura, 425.
- 3.6.8. Principales Defectos de las Soldaduras, 428.

3.7. BIBLIOGRAFIA

430

CAPITULO IV

CORROSION EN LOS EQUIPOS DE PROCESO

4.1. CORROSION EN TUBERIAS DE PROCESAMIENTO

433

- 4.1.1. Corrosión en Tuberías de Agua, 433.
- 4.1.2. Corrosión en Tuberías de Gas, 435.
- 4.1.3. Condiciones Que Causan Corrosión en Flujo de Corriente, 436.
 - 4.1.3.1. Tipos de celdas de corrosión en tuberías, 436.
- 4.1.4. Corrosión en Válvulas, 442.
 - 4.1.4.1. Ataque químico, 442.
 - 4.1.4.2. Abrasión, 442.
 - 4.1.4.3. Ruptura o pandeo, 442.
 - 4.1.4.4. Desgaste, 443.
 - 4.1.4.5. Corrosión en el huso de la válvula, 443.

4.2. CORROSION EN BOMBAS	444
4.2.1. Corrosión y Erosión, 444.	
4.2.2. Abrasión y Desgaste, 447.	
4.2.3. Fracturas, Rupturas, Abolladuras y Extrusiones, 449.	
4.3. CORROSION EN VENTILADORES	449
4.3.1. Fallas en Rueda y Aspas, 449.	
4.3.2. Análisis de las Fallas de las Aspas, 450.	
4.4. CORROSION EN COMPRESORES	452
4.4.1. Fractura por Corrosión Bajo Tensión, 452.	
4.4.2. Fractura Bajo Tensión por Sulfuro, 453.	
4.4.2.1. Efecto de la temperatura, 453.	
4.4.3. Fragilización por Ambiente de Hidrógeno, 453.	
4.4.4. Operación a Baja Temperatura- Falla por Fragilidad, 453.	
4.5. CORROSION EN FILTROS	454
4.5.1. Causas por las que se Desgastan las Telas de los Filtros, 455.	
4.6. CORROSION EN INTERCAMBIADORES DE CALOR	457
4.7. CORROSION EN EVAPORADORES	464
4.7.1. Localización de Daños en la Operación de Evaporadores, 464.	
4.7.2. Escamas Causadas por Licores de Pulpas de Papel, 465.	
4.7.3. Falla Mecánica de los Interiores, 466.	
4.8. CORROSION EN CALDERAS	467
4.8.1. Posibilidades de Corrosión en el Funcionamiento de Calderas de Vapor, 467.	
4.8.2. Detección de Corrosión Interna, Ataque por Hidrógeno en Paredes de Agua, 472.	
4.9. CORROSION EN HORNOS	474
4.9.1. Evaluación del Daño Térmico en los Tubos, 474.	
4.9.2. Corrosión Interna, 475.	
4.9.3. Corrosión Externa, 479.	
4.9.4. Reducción de la fuerza, 479.	

4.10. CORROSION EN TORRES DE ENFRIAMIENTO	482
4.11. CORROSION EN RECIPIENTES A PRESION Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO	485
4.11.1. Las Causas Básicas que Provocan Accidentes en los Recipientes a Presión, 485.	
4.11.1.1. Fallas por corrosión, 485.	
4.11.1.2. Fallas por tensión, 486.	
4.11.1.3. Otras Fallas, 487.	
4.11.2. Corrosión en Tanques de Almacenamiento Subterráneos, 488.	
4.11.2.1. Factores que influyen en la corrosión, 489.	
4.12. BIBLIOGRAFIA	493

CAPITULO V

METODOS DE PREVENCION Y ELIMINACION DE LA CORROSION

5.1. SELECCION DE MATERIALES	496
5.1.1. Metales y Aleaciones, 496.	
5.1.2. Purificación de Metales, 498.	
5.1.3. Materiales no Metálicos, 499.	
5.2. ALTERACION DEL AMBIENTE	500
5.2.1. Cambio del Medio, 500.	
5.2.2. Disminución de la Temperatura, 500.	
5.2.3. Disminución de la Velocidad, 501.	
5.2.4. Remoción de Oxígeno o Agentes Oxidantes, 501.	
5.2.5. Cambio de la Concentración, 502.	
5.3. INHIBIDORES	503
5.3.1. Definición de Inhibidores de la Corrosión, 503.	
5.3.2. Tipos Básicos de Inhibidores y su forma de Trabajo, 504.	
5.3.3. Tipos de Inhibidores, 507.	
5.3.4. Inhibidores Pasivantes Anódicos, 507.	
5.3.5. Inhibidores Catódicos, 510.	
5.3.5.1. Venenos Catódicos, 511.	
5.3.5.2. Precipitadores Catódicos, 513.	
5.3.5.3. Expulsores de Oxígeno, 515.	
5.3.6. Inhibidores Ohmicos, 516.	
5.3.7. Inhibidores Orgánicos, 517.	

- 5.3.7.1. Sinergismo con Iones Halógenos, 519.
 - 5.3.7.2. Efectos de la Estructura Molecular, 519.
 - 5.3.7.3. Adsorción, 521.
 - 5.3.8. Inhibidores Inductores de la Precipitación, 523.
 - 5.3.9. Inhibidores en Fase Vapor, 526.
- 5.4. METODOS ELECTROQUIMICOS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION 528
- 5.4.1. Diagramas de Evans, 529.
 - 5.4.2. Protección Catódica, 533.
 - 5.4.2.1. Forma de Aplicación, 533.
 - 5.4.2.2. Anodos de Sacrificio, 534.
 - 5.4.2.3. Uso Combinado con Recubrimientos, 535.
 - 5.4.3. Protección Anódica, 536.
 - 5.4.4. Comparación entre la Protección Anódica y la Protección Catódica, 543.
- 5.5. RECUBRIMIENTOS 545
- 5.5.1. Clasificación de los Recubrimientos, 546.
 - 5.5.2. Asfaltos, 550.
 - 5.5.3. Aceites, 551.
 - 5.5.4. Fenólicos, 551.
 - 5.5.5. Alquidáticos, 552.
 - 5.5.6. Vinílicos, 553.
 - 5.5.7. Epóxicos, 554.
 - 5.5.8. Uretanos, 555.
 - 5.5.9. Preservadores Temporales, 556.
 - 5.5.9.1. Aceites, Grasas y Ceras Microcristalinas, 556.
 - 5.5.9.2. Grasas, 557.
 - 5.5.9.3. Recubrimientos Superponibles, 557.
 - 5.5.10. Recubrimientos Antiobstruyentes, 557.
 - 5.5.11. Recubrimientos Compuestos o Multifásicos, 558.
 - 5.5.12. Materiales Ricos en Zinc, 559.
 - 5.5.13. Recubrimientos Inorgánicos (No Metálicos), 562.
 - 5.5.13.1. Concreto Hidráulico, 562.
 - 5.5.13.2. Cerámicas, 563.
 - 5.5.13.3. Vidrio, 563.
 - 5.5.14. Tratamientos de Superficies Metálicas, 564.
 - 5.5.14.1. Anodizado, 564.
 - 5.5.14.2. Fosfatizado, 566.
 - 5.5.14.3. Cromado, 569.
 - 5.5.15.4. Oxidos Metálicos, 572.
 - 5.5.15.5. Recubrimiento Reforzante (Difusión), 573.
 - 5.5.15. Recubrimientos Metálicos, 573.
 - 5.5.15.1. Revestimiento (Electrodeposición), 574.
 - 5.5.15.2. Recubrimiento por Inmersión, 577.
 - 5.5.15.3. Revestimiento, 581.
 - Soldadura de Gas o de Arco, 582.
 - Laminado por Deposición, 583.
 - Deposición por Explosión, 583.

- Fundido o bronceado, 589.
- Soldado, 590.
- 5.5.15.4. Metalizado, 590.
- 5.5.15.5. Alta Temperatura, 591.
- 5.5.15.6. Misceláneos, 591.
- 5.5.16. Métodos de Aplicación, 592.
 - a) Con Brocha de Pelo y Rodillo, 593.
 - b) Aspersión, 593.
 - c) Aspersión Electrostática, 593.
 - d) Método Electroforético, 594.
 - e) Lecho Fluidizado, 594.
 - f) Aspersión de Polvos, 594.
 - g) Aspersión por Flama, 594.
 - h) Deposición a Vacío, 595.
- 5.5.17. Fallas de Recubrimientos, 595.
 - a) Discontinuidad de la Película, 596.
 - b) Pérdida de la Adhesión, 596.
 - c) Ampollamiento, 596.
 - d) Agrietamiento, 597.
 - e) Corrugado, 597.
 - f) Caleo, 598.

5.6. BIBLIOGRAFIA

598

CAPITULO VI

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO CONTRA LA CORROSION EN LOS EQUIPOS DE PROCESO

- 6.1. TUBERIAS DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO 601
 - 6.1.1. Materiales, 601.
 - 6.1.1.1. Sistemas de tuberías de metales ferrosos, 601.
 - 6.1.1.2. Sistemas de tuberías de metales no ferrosos, 606.
 - 6.1.1.3. Tuberías no metálicas y sistemas de tuberías recubiertas, 615.
 - 6.1.2. Protección Catódica, 627.
 - 6.1.3. Sistemas de Corriente Impresa, 628.
- 6.2. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE BOMBAS 629
 - 6.2.1. Guía de Selección de Materiales para Bombas Centrífugas, 630.
- 6.3. VENTILADORES 642

6.4. COMPRESORES	645
6.4.1. Fabricación del Impulsor, 645.	
6.4.1.1. Tipos de impulsores, 646.	
6.4.1.2. Materiales para los impulsores, 647.	
6.4.1.3. Recubrimientos protectores, 651.	
6.4.1.4. Selección de sellos elastoméricos, 656.	
6.4.1.5. Fractura por corrosión bajo tensión, 659.	
6.4.1.6. Fractura bajo tensión por sulfuro, 659.	
6.4.1.7. Falla por fragilidad, 660.	
6.5. FILTROS	661
6.5.1. Medios de Filtración, 661.	
6.5.2. Ayudas para la Filtración, 666.	
6.6. INTERCAMBIADORES DE CALOR	668
6.6.1. Estándares de Diseño, 668.	
6.6.2. Materiales de Construcción para Intercambiadores de Calor, 675.	
6.6.3. Diseñando para Corrosión en General en Intercambiadores de Placa, 677.	
6.7. EVAPORADORES	678
6.7.1. Consideraciones en el Diseño de Evaporadores de Circulación Forzada, 678.	
6.7.2. Materiales de Construcción, 678.	
6.8. MEDIDAS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION EN CALDERAS	679
6.8.1. Temperatura, 681.	
6.8.2. Calidad de los Materiales, 681.	
6.8.3. Equipos de Combustión, 682.	
6.8.3.1. Diseño de los hogares, 682.	
6.9. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO CONTRA LA CORROSION EN HORNOS	683
6.10. TORRES DE ENFRIAMIENTO	687
6.11. RECIPIENTES A PRESION Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO	689
6.11.1. Precauciones en el Diseño de Tanques a Presión, 689.	
6.11.2. Diseño de Tanques de Almacenamiento, 692.	
6.11.2.1. Materiales de construcción, 692.	

- 6.11.2.2. Soldadura, 692.
- 6.11.2.3. Consideraciones en el diseño, 696.

6.12. BIBLIOGRAFIA	697
CONCLUSIONES	699
GLOSARIO	702

INTRODUCCION

La corrosión es uno de los principales problemas de la industria de proceso, ya que por lo regular tiene efectos subsecuentes o colaterales graves como es el paro temporal de una o varias secciones, o inclusive todas, de una planta; el fallo mecánico del equipo, con o sin riesgo para el personal encargado de su operación; contaminación del producto comercial, ya sea por la presencia de los productos de corrosión, o por el contacto con otras sustancias utilizadas en el proceso; además de las correspondientes pérdidas económicas.

El presente trabajo monográfico tiene por objeto exponer la información que se ha publicado en los últimos 20 años sobre aspectos de corrosión. En primer lugar se presenta la caracterización de los equipos más comúnmente utilizados en las industrias: química, petrolera, alimentaria y farmacéutica, como son:

- Tuberías
- Bombas
- Ventiladores
- Compresores
- Filtros
- Intercambiadores de calor
- Evaporadores
- Calderas de vapor
- Hornos de refinería
- Torres de enfriamiento
- Recipientes a presión y tanques de almacenamiento

Después de esto se exponen los conceptos básicos para entender los procesos de corrosión, así como sus tipos y los mecanismos por los cuales se llevan a cabo.

En el apartado que corresponde a los materiales de



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

construcción, se muestran las características y las propiedades principales, que tienen cada uno de ellos, para que puedan ser seleccionados de la mejor forma posible. Esta sección se encuentra dividida en: (1) Metales y (2) No Metales. Además de una sección que está íntimamente relacionada con los materiales de construcción, como son los métodos de soldado.

Es importante señalar, que la selección de un material para una aplicación específica requiere, invariablemente, de una investigación prolongada y minuciosa. Casi siempre más de un material ~~es~~ adecuado para el servicio en cuestión, por lo que la selección final es un compromiso que debe sopesar las ventajas y las desventajas existentes. Los requisitos que cualquier material debe cumplir, pueden ser reducidos a tres tipos generales: 1) Requisitos del Servicio, 2) Requisitos de Fabricación 3) Requisitos Económicos.

Los requisitos del servicio son, sin embargo, de importancia extrema, por lo que el material deberá resistir las demandas del servicio.

La evaluación de los requisitos de fabricación, se refiere a cuestiones de mecanizado, endurecimiento, tratamiento térmico, ductilidad, fundibilidad y soldabilidad, cualidades que algunas veces son difíciles de evaluar.

Finalmente, los requisitos económicos, tienen como objetivo lograr el menor costo total del componente que se va a fabricar, con la mejor calidad del producto. Este aspecto no es tratado muy afondo en la presente monografía, por razones dimensionales, ya que un estudio detallado de los aspectos económicos de la

corrosión hubiesen aumentado en forma excesiva el tamaño de este trabajo.

También se especifican las partes de los diferentes equipos, que se ven afectadas por la corrosión, los casos generales y los motivos que provocan el daño. Así como los métodos para prevenir y eliminar la corrosión, como son: 1) Selección de los Materiales, 2) Alteración del Ambiente, 3) Inhibidores, 4) Protección Catódica, 5) Protección Anódica, 6) Recubrimientos. En cada método se explican sus características, los conceptos en los que se basan, su forma de empleo, así como los sistemas para los que se recomiendan. Finalmente se conjunta la información recopilada en los anteriores, al referirnos a las consideraciones de diseño necesarias para fabricar los componentes de equipos de proceso capaces de resistir los diferentes tipos de corrosión durante su vida útil, debido al conocimiento de los elementos que los componen: a la comprensión y el uso de los conceptos electroquímicos, metalúrgicos y ambientales, mediante los cuales puede llegar a entenderse por qué y en que forma se presentan los distintos tipos de corrosión; a la selección adecuada de los materiales de construcción; a la ubicación de los componentes de los equipos de proceso dañados por la corrosión; y al conocimiento de los métodos de prevención y eliminación de la misma.

I

CARACTERIZACION DE LOS EQUIPOS DE PROCESO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1.1. TUBERÍAS DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO

1.1.1. Tuberías y Tubos

Tubería y tubo son ambos dos productos tubulares, pero estos términos, técnicamente en el campo petroquímico, tienen unos significados específicos.

Tubería.- Los tubos fabricados de acuerdo con los tamaños estándar del API son llamados tuberías.

Tubos.- Todos los otros productos tubulares no fabricados en tamaños estándar son llamados tubos. Los tamaños son designados por el diámetro externo y cada tamaño es ofrecido en una variedad de diámetros internos. Las tolerancias pueden referirse a varias dimensiones, tal como lo exija su uso. (1)

Las tuberías y los tubos se dividen en dos clases principales -soldados y sin costura-. Las tuberías sin costura, designadas así comercialmente, se refieren a las tuberías elaboradas mediante el forjado de un sólido redondo, cuya perforación se hace en forma simultánea, mediante la rotación y el paso obligado de una punta perforada, y cuya reducción se lleva a cabo mediante el laminado y el estiramiento. Sin embargo, se producen también tubos y tuberías sin costura mediante la extrusión, el colado en moldes estáticos o centrífugos, la forja y la perforación. Este tipo de tuberías tienen la misma resistencia en lb/plg^2 a lo largo de toda la pared. Las tuberías sin costura perforadas tienen con frecuencia la superficie interna excéntrica con relación a la externa, lo que da como resultado un espesor no uniforme de las paredes.

Las tuberías soldadas, se elaboran con bandas laminadas conformadas en cilindros y soldadas en las costuras por varios

métodos. Se atribuye a las soldaduras del 60 al 100% de la resistencia de las paredes de la tubería dependiendo de los procedimientos de soldadura e inspección. Por este método de elaboración se pueden obtener diámetros mayores y relaciones más bajas de espesores de las paredes al diámetro en las tuberías soldadas que en las tuberías sin costura (aparte de las coladas). Se obtiene un espesor uniforme de las paredes.

1.1.2. Normas sobre tuberías

En el mundo existen un gran número de normas, pudiendo afirmarse que la mayoría de los países desarrollados disponen de sus propias normas, pero que en general no son de obligado cumplimiento, siendo por el contrario las normas norteamericanas y alemanas las que generalmente se adoptan, según áreas de influencia. Con ello se ha conseguido que la producción mundial de estos elementos haya conseguido cierta estandarización. Basándonos en este criterio, aquí se indicarán fundamentalmente las normas americanas ANSI (American National Institute) (antiguas normas ASA) y API (American Petroleum Institute), así como las alemanas DIN.

Las normas de tuberías ANSI comprenden la mayoría de las normas de los Estados Unidos que rigen el diseño de los sistemas de tuberías, las dimensiones y clasificación (Rating) de tuberías y accesorios. La mayoría de estas normas están aceptadas por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), la Asociación Americana de Obras Hidráulicas (AWWA) y la Sociedad Americana de Ensayo de Materiales (ASTM).

La norma de tuberías de uso más frecuente es el "Código para tuberías a presión" (ANSI B.31), que recoge los requerimientos de diseño para dichas tuberías, que incluye las siguientes normas:

- Sistemas de tuberías para plantas energéticas ANSI B.31.1
- Sistemas de tuberías para fuel gas ANSI.B.31.2
- Sistemas de tuberías para plantas químicas
y refino de petróleo ANSI.B.31.3
- Sistemas de tuberías para transporte de petróleo ANSI.B.31.4
- Sistemas de tuberías para tuberías de
refrigeración ANSI.B.31.5
- Sistemas de tuberías para plantas de energía
nuclear ANSI.B.31.7
- Sistemas de tuberías para distribución de gas ANSI.B.31.8

Los estándares mecánicos y dimensionales para tuberías de acero más usuales son:

- Tuberías para conductos API 5L
- Tuberías para conductos de altas características API 5LX
- Tuberías soldadas en espiral API ELS
- Tuberías de acero al carbono y aleado soldadas
y sin soldadura ANSI B.36.10
- Tuberías de acero inoxidable ANSI B.36.19

Es necesario aclarar, en relación a las normas americanas, que los estándares API prevén, además de dimensionamiento de los tubos, las siguientes prescripciones:

- Tolerancia en dimensiones nominales.

-Composición química de los aceros de construcción para tubos en sus diversos grados.

-Características mecánicas de los aceros en sus diversos grados (carga de ruptura, carga de fluencia, alargamiento porcentual).

-Descripción de las pruebas (químicas y mecánicas) a seguir.

-Ejecución de la prueba hidráulica.

-Ejecución de la prueba no destructiva.

-Criterios de aceptación o rechazo de una partida de tubos.

-Longitud de barras.

-Transporte.

A diferencia de la norma API, las normas ANSI B.36.10 y B.36.19 hacen referencia únicamente al dimensionamiento geométrico de los tubos. Para los tubos construidos de acuerdo con estas normas, se utiliza el criterio de especificar material según norma ASTM. Inversamente, si se adopta la norma ASTM, es aconsejable utilizar los espesores previstos en ANSI B.36.10 y B.36.19. Normalmente que el especificar material ASTM lleva consigo el cumplimiento de las prescripciones que dicha norma prevé, como lo indicado anteriormente para la norma API.

En relación a las normas DIN más usuales para tuberías, citaremos:

DIN 2401 Tuberías. Consideraciones generales. Presión máxima admisible para tuberías metálicas.

DIN 2402 Tuberías. Diámetro nominal. Clasificación.

DIN 2403 Identificación de tuberías en base al fluido transportado.

- DIN 2410 Tubos. Indicaciones generales. Sinópsis de normas.
- DIN 2411 Tubos de hierro fundido. Aclaraciones para el cálculo.
- DIN 2413 Cálculo de espesor de tubos de acero.
- DIN 2462 Tubos de acero inoxidable sin soldadura. Dimensiones y pesos.
- DIN 2463 Tubos soldados de acero inoxidable. Dimensiones y pesos.
- DIN 2464 Tolerancia en tubos sin soldadura de acero inoxidable.
- DIN 2465 Tolerancia en tubos soldados de acero inoxidable.

1.1.3. BRIDAS Y ACCESORIOS

1.1.3.1. Bridas

Las bridas son elementos de las tuberías mediante las que se realizan formas de unión, llamadas uniones bridadas. La mayoría de las uniones bridadas son debidas a bocas de equipos o contrabridas de válvulas, si bien también se realiza este tipo de unión con ciertos instrumentos de control y accesorios. En ciertos casos específicos, los diferentes tramos de tuberías también se unen con este tipo de conexión, como sucede por ejemplo en tuberías que, por transportar ciertos productos, necesitan ser desmontadas para su limpieza y mantenimiento.

Son elementos de fabricación normalmente forjada y van siempre unidas mediante pernos, y acompañadas de juntas entre las caras de contacto para asegurar la hermeticidad que evite las fugas del fluido transportado en la tubería.

Desde el punto de vista constructivo, y en relación con el tipo de extremo de unión a los tubos, los tipos de bridas normalizadas son:

a) Bridas para soldar a tope (welding-neck). En estas el espesor del cuello de la brida debe ser igual al espesor del tubo al que se va a soldar la brida.

b) Bridas deslizantes (slip-on).

c) Bridas para soldar a enchufe (socket-welding).

d) Bridas roscadas (threaded).

e) Brida libre o loca (lap joint).

f) Brida ciega (blind).

La figura 1.1 nos muestra estos diferentes tipos de bridas y la posición de la soldadura con el tubo.

Para bridas de diámetro nominal igual o inferior a 1 1/2" los extremos utilizados son para soldar a enchufe o roscados; para diámetro superior se usa básicamente extremos para soldar a tope, utilizándose circunstancialmente bridas deslizantes o libres.

Utilizando normas americanas, para clasificaciones comprendidas entre 150 y 2500 lb, las bridas de acero se dimensionan de acuerdo con ANSI B.16.5, y para las no previstas en esta norma se utiliza la MSS-SP-44. Para clasificaciones superiores a 2500 lb las bridas se dimensionan según diseño especial y deben ser verificados según código ASME Sección VIII. Para ciertos servicios y para diámetros comprendidos entre 26" y 42" se admite el uso de las llamadas bridas aligeradas en acero al carbono, y que están de acuerdo en dimensiones con la serie de 125 lb, según ANSI B.16.1.

En base a la terminación mecánica de las caras, las bridas se

pueden clasificarse en los siguientes tipos principales:

- a) Bridas de cara plana (Flat face, o abreviadamente FF).
- b) Bridas de cara con resalte (Raised face, o abreviadamente RF).
- c) Bridas con cara con cavidad para alojar junta (Ring type joint, o abreviadamente RTJ).
- d) Bridas macho, hembra (Male o Female).
- e) Bridas de doble embutición (Tongue and groove).

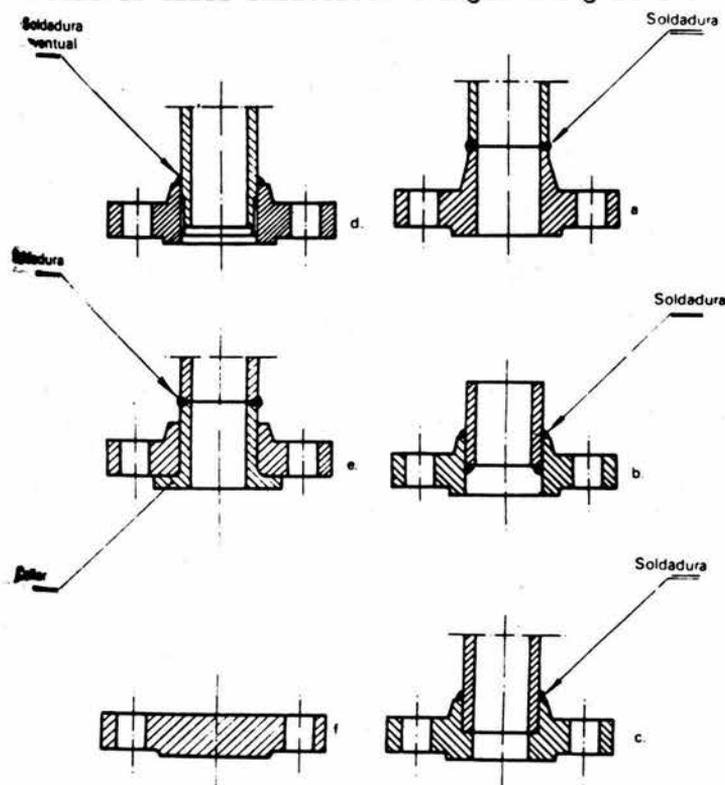


Figura 1.1. Tipos de bridas. a) Breda para soldar a tope (welding neck flange). b) Breda para soldar sobrepuesta (slip-on-flange). c) Breda para soldar a enchufe (socket welding flange). d) Breda roscada (Threaded flange). e) Breda libre o loca (Lap joint flange). f) Breda ciega (Blind flange).

Los tres primeros tipos son, con mucho, los más usuales, y el uso de uno u otro tipo de cara viene subordinado a la necesidad de lograr una mayor o menor estanqueidad entre las bridas.

Por lo que se refiere al acabado de las caras de junta, los tipos básicos de acabado son:

- Acabado continuo: es una ranura espiral continua de muy pequeña profundidad realizada por medio de una herramienta de punta.

- Ranuras concéntricas: acabado con ranuras concéntricas.

- Acabado liso: es un acabado que no deja ninguna señal visible a la vista.

- Acabado en frío: la superficie de acabado es lisa con apariencia de espejo y se usa generalmente para bridas sin juntas (metal sobre metal).

En normas DIN, las bridas se designan como establece la norma DIN 2500, que es como se indica en el siguiente ejemplo:

100 - 108 - 10 - DIN 2633 - ST 37.2 - C

en donde el significado de cada elemento es:

100: Diámetro nominal.

108: Diámetro exterior.

10: Espesor del cuello.

DIN 2633: Norma que define el tipo de brida.

ST 37.2: Material.

C: Forma de la cara.

Los tubos en norma DIN se fabrican con dos series de diámetros exteriores a igualdad de diámetro nominal; la serie ISO (que suele coincidir con los diámetros exteriores de la norma ANSI) y la

serie DIN (con diámetros exteriores más pequeños). Por esta razón, para denominar una brida resultan necesarios dos diámetros: el nominal y el exterior del tubo al que irá unida.

Los tipos de caras de las bridas, así como los acabados de las mismas, se especifican en la norma DIN 2526, y dicho tipo debe de ser especificado a la hora de definir una brida en normas alemanas.

Pernos y Tuercas para Bridas

Son los elementos que se emplean para la unión de dos bridas. Generalmente, los pernos son de dos tipos: totalmente roscados y con una tuerca hexagonal en cada extremo (espárragos), o con un solo extremo roscado y el otro terminado en una cabeza cuadrada (pernos). Hoy en día hay tendencia a utilizar siempre espárragos, pues permiten un más fácil desmontaje en caso de enmohecimiento y porque se fabrican más fácilmente.

El número, diámetro y longitud de pernos o espárragos va condicionado al tamaño, presión y cara de la brida en que van a ir montados, y vienen determinados por las correspondientes normas.

Juntas para Bridas

Las caras de dos bridas en una unión bridada deben evitar al máximo el que escape el fluido, logrando la más perfecta hermeticidad posible. Las irregularidades existentes entre las caras de las bridas pueden compensarse disponiendo juntas entre ambas caras. El material de las juntas a emplear debe ser más blando que el material de las bridas, con el fin de que pueda

deformarse bajo la presión ejercida en el apriete de los pernos de unión y compensar las irregularidades de las caras. Por la acción de la compresión inicial, la junta tiende a expandirse en sentido axial y radial. La expansión axial producirá el relleno de las irregularidades de las caras de las bridas; la expansión radial no produce un efecto útil, a menos que se trate de una junta confinada.

Al calentarse una unión bridada se produce una mayor presión sobre la junta debido a la diferencia de temperatura entre el cuerpo de la brida y los pernos; este incremento de presión sobre la junta, unido a un general ablandamiento del material de la misma por el incremento de temperatura, origina una expansión adicional tanto en el sentido axial como radial; y para compensar esto, a las bridas se les suele someter a un segundo apriete después de que la unión ha alcanzado la temperatura normal de operación.

Un factor a tener en cuenta es el espesor de la junta. Una junta de elevado espesor tendrá una mayor expansión radial que una junta delgada, por lo que estas últimas juntas presentan la ventaja de mantener un espesor más constante, favoreciendo el mantenimiento de la hermeticidad. Sin embargo, utilizando juntas muy delgadas, con el fin de aprovechar dicha ventaja, se corre el peligro de que sea insuficiente para sellar las irregularidades de las caras de las bridas. Las juntas espirometálicas, constituidas por hilos metálicos insertos en amianto, eliminan los inconvenientes de la expansión radial de las juntas.

Para condiciones de trabajo severas, a veces se utilizan bridas

de caras embutidas (male-female), o bridas con cara para juntas tóricas (ring-joint), pero estas bridas suelen presentar ciertos inconvenientes mecánicos y son más caras.

Los tipos de juntas más comunes son las juntas de tipo de anillo y las de cara llena. Las primeras se colocan en el espacio interior que dejan los pernos, utilizándose preferentemente en bridas en cara con resalte y bridas locas, pero también pueden utilizarse con bridas de cara plana. Las juntas de cara llena cubren toda la cara de las bridas entre las que se sitúan y son, naturalmente, atravesadas por los pernos de unión de las bridas, usándose para bridas de caras planas.

Para obtener un sellado efectivo, el material de la junta debe ser lo suficientemente compresible para poder deslizarse por las caras de las bridas rellenando todo hueco entre las mismas. Se define el factor "Y" de la junta como la presión, expresada en psi, que debe aplicarse a la junta en el área de contacto para que ésta se escurra y rellene los huecos; el factor "Y" es independiente de la presión interna, y su valor viene definido en los códigos (por ejemplo ASME), para los diferentes tipos de juntas.

Otro factor definitorio de una junta es el factor "M", que viene determinado por tres presiones:

- La presión de las tuercas, que es la que mete la junta dentro de los huecos de la cara de la brida para lograr el sellado.
- La presión hidrostática, que es la presión que tiende a separar las bridas cuando existe una presión interna.
- Presión interna, que es la presión que actúa sobre la parte

interna de la junta y tiende a expulsarla fuera de la brida.

El factor "M" es la relación entre la presión residual de la junta (presión de las tuercas menos la presión hidrostática) y la presión interna del sistema, todas las presiones expresadas en psi.

Los factores "Y" y "M" permiten determinar, junto con otros parámetros físicos de las juntas, la presión requerida de las tuercas para conseguir un buen sellado en la unión bridada.

1.1.3.2. Accesorios

Los accesorios son elementos auxiliares de los tubos que permiten el diseño de las redes de tuberías, utilizándose para cambios de direcciones de las líneas, paso de un diámetro a otro, etc. Existen dos grandes grupos de accesorios en cuanto a su forma de construcción se refiere: forjados y fundidos.

Los accesorios forjados se obtienen por mecanización de una barra de acero y se fabrican para ser montados en uniones roscadas o soldadas a enchufe.

Los accesorios fundidos se utilizan para ser montados en uniones para soldar a tope, con extremos bicelados, y se emplean a partir de las dimensiones en las que es posible utilizar dicho sistema de soldadura, es decir, a partir de 2". En raras ocasiones se utilizan accesorios roscados hasta 4".

Por lo que a los tipos de accesorios se refiere, se puede decir que son muy numerosos, a veces muy específicos, pero citaremos los más usuales, como son:

- Curvas o codos de 45-90-180°. En líneas de diámetro de 1 1/2"

e inferiores, y sólo excepcionalmente en diámetros mayores, se pueden emplear codos obtenidos de tubo curvado.

- Piezas en te.
- Piezas reductoras de diámetros.
- Manguitos o uniones.
- Cruces.
- Intersecciones.
- Tapones hembras (caps).
- Tapones machos (plugs).
- Nipples.
- Swages.

Estos dos últimos accesorios se han denominado con la palabra inglesa porque así son conocidos en el mercado. El "nipple" es en realidad un trozo de tubería con ambos extremos roscados, o uno roscado y otro plano, que se emplea para unir ciertos accesorios, válvulas, filtros. Se usa fundamentalmente en la construcción de venteos y drenajes.

Los "swages" son reductores largos que se emplean normalmente en la reducción entre accesorios y tuberías, válvulas, etc.

Citaremos por último los accesorios de conexión empleados en derivaciones, conexiones para instrumentos, etc., que permiten una conexión segura y resistente. Se conocen técnicamente con la denominación inglesa y son, fundamentalmente:

- Thredolets, con salida roscada.
- Sockolets, con salida para soldar a enchufe.
- Weldolets, con salida para soldar a tope.
- Elbolets, que van montados sobre codos a 90°, permitiendo una

salida tangencial. Pueden ser con salida roscada o para soldar a enchufe o a tope.

La estandarización de los accesorios para soldar a tope viene recogida en la norma ANSI B.16.9, y es necesario hacer notar que el diámetro externo debe ser el mismo que el diámetro externo del tubo al que va a ser soldado, así como también su espesor.

La estandarización de los accesorios para soldar a enchufe y roscados viene definida por la norma ANSI B.16.11, y las clasificaciones usualmente utilizados son:

- 2,000, 3,000 y 6,000 lb para accesorios roscados.
- 3,000, 6,000 y 9,000 lb para accesorios para soldar a enchufe.

En las figuras 1.2, 1.3 y 1.4 se muestran algunos de los accesorios más utilizados en el proyecto de redes de tuberías en unidades industriales.

1.1.4. Normas relativas a bridas y accesorios

Dentro de las normas americanas, y en los sectores industriales a que nos estamos refiriendo, hay que citar como las más usualmente utilizadas las que seguidamente se relacionan:

- | | |
|--------------|--|
| ANSI B.16.1 | Bridas y accesorios bridados de hierro fundido en ratings de 25, 125, 250, 800 libras. |
| ANSI B.16.5 | Bridas y accesorios bridados de acero en ratings de 150, 300, 400, 600, 900, 1500 y 2500 libras. |
| ANSI B.16.9 | Accesorios de acero para soldar a tope. |
| ANSI B.16.11 | Accesorios de acero para soldar a enchufe y roscados. |

ANSI B.16.31	Bridas para materiales no férricos.
MSS-SP-44	Bridas para oleoductos.
ANSI B.16.5	Longitud de pernos para bridas.
ANSI B.18.2.2	Dimensiones de tuercas para bridas.
ANSI B.16.21	Juntas no metálicas para tuberías.
ANSI B.16.20	Juntas de anillo (Ring joint).
API Std 601	Juntas espirometálicas (spiral wound).

En el campo de las normas alemanas hay que mencionar como de mayor utilización:

DIN 2500	Bridas. Indicaciones generales.
DIN 2501	Bridas. Dimensiones.
DIN 2505	Sistemas de cálculo de conexiones bridadas.
DIN 2526	Bridas. Ejecución de las superficies de cierre.
DIN 2530 a 2535	Bridas de hierro fundido.
DIN 2543 a 2551	Bridas de acero fundido.
DIN 2627 a 2638	Bridas para soldar a tope.
DIN 601-2509-2510	Tornillos para bridas.
DIN 2507	Instrucciones para elección de material para tornillos.
DIN 555-934-2510	Tuercas para bridas.
DIN 2690 a 2693	Juntas para bridas.
DIN 2695 a 2697	Juntas para bridas.

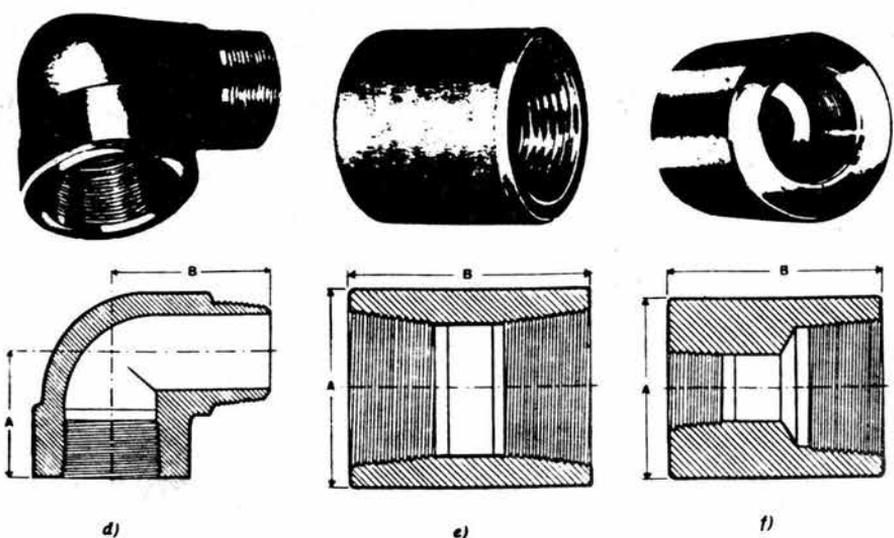
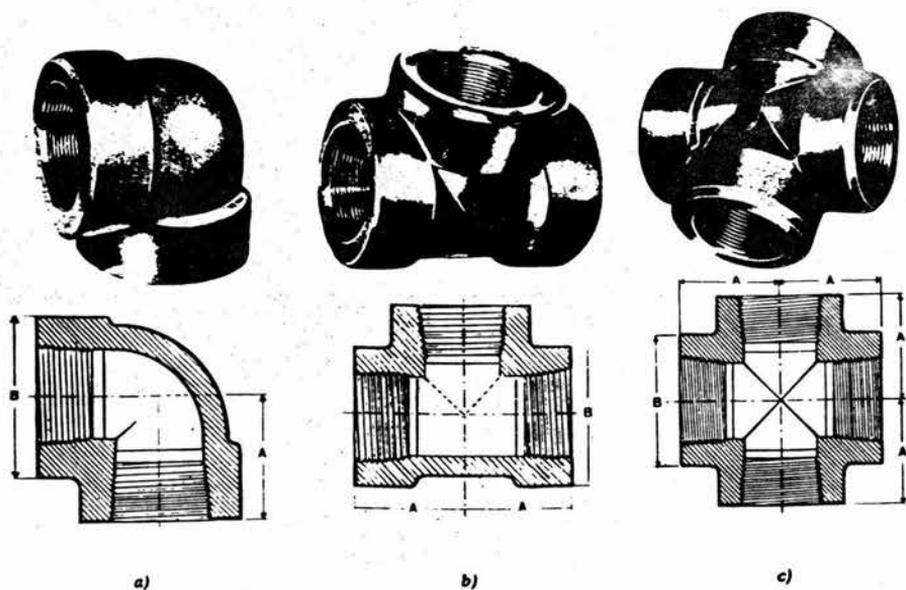


Figura 1. 2. a) Codo a 90° roscado. b) Te roscada. c) Cruz roscada.
 d) Codo macho-hembra a 90° roscado. e) Manguito roscado.
 f) Manguito reductor roscado.

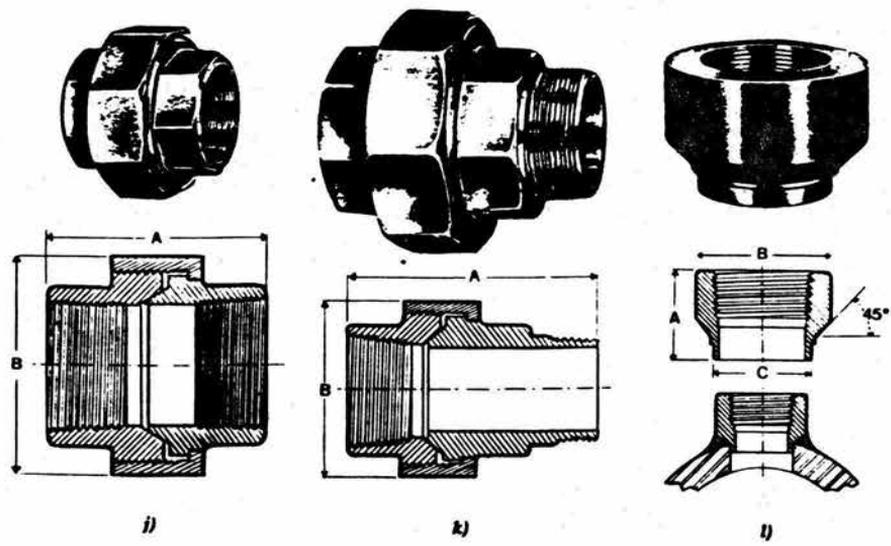
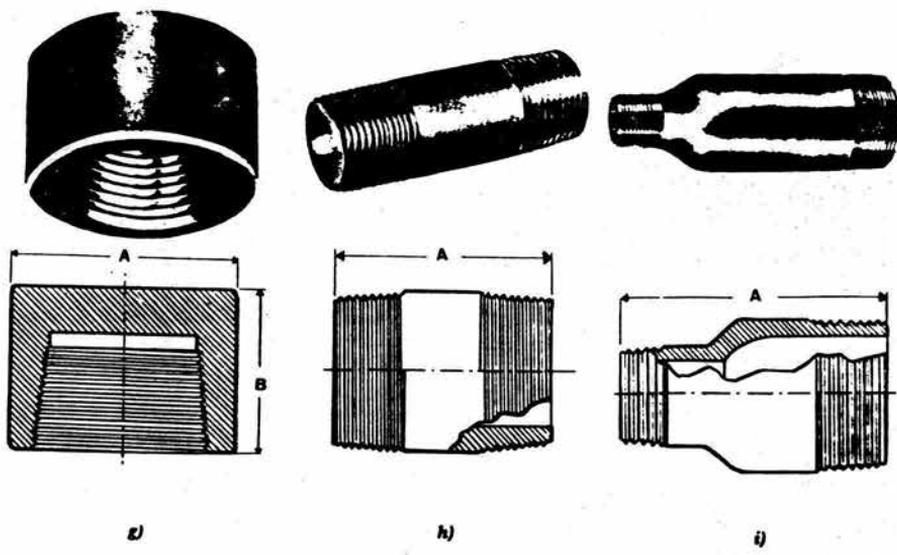


Figura 1. B. g) Tapahembra roscada. h) Manguito roscado exterior o nipple roscado. i) Manguito reductor rosca exterior (Svedge nipple). j) Unión roscada. k) Unión macho-hembra roscada. l) Injerto roscado.

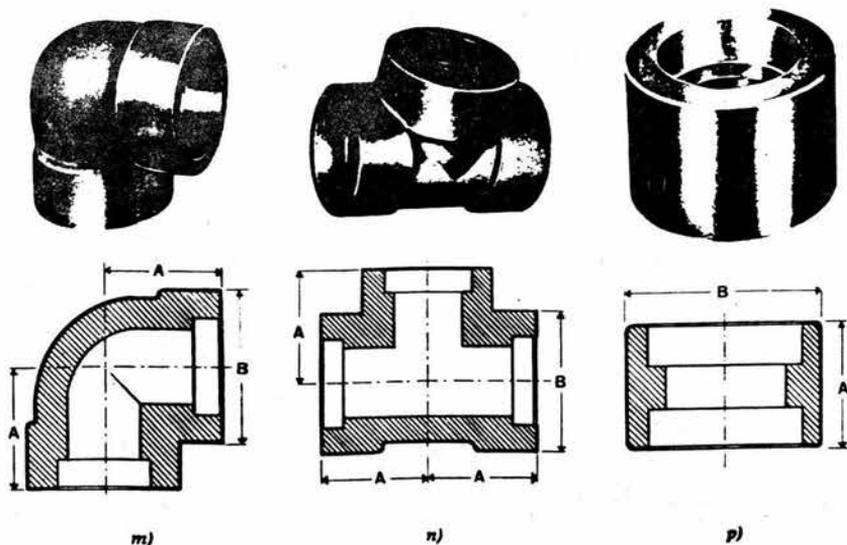
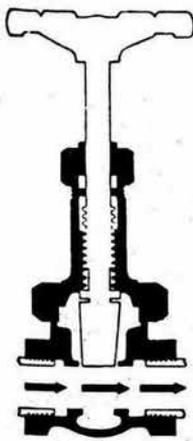


Figura 1.3. m) Codo de 90° para soldar a enchufe. n) Te para soldar a enchufe. p) Manguito de unión para soldar a enchufe.

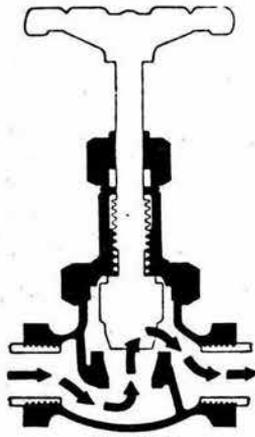
1.1.5. VALVULAS

Son los componentes de las tuberías que, insertados en los tubos, o en las toberas de los aparatos, permiten interrumpir o regular el flujo del fluido que circula por la tubería. El tipo de acción que ha de realizar la válvula y las características del fluido son los elementos básicos a la hora de especificar la válvula.

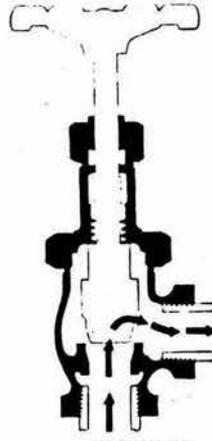
Esquemas de trabajo de los diferentes tipos de válvulas (figuras 1.5 y 1.6).



Válvula de compuerta



Válvula de globo



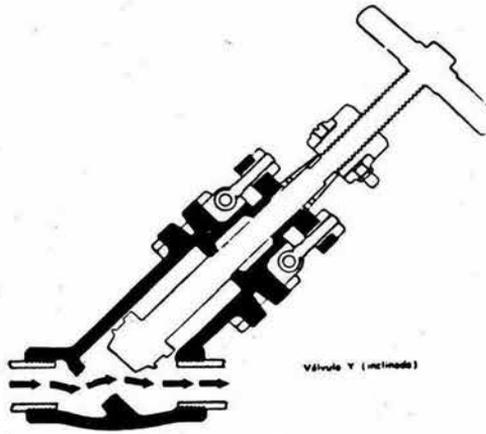
Válvula de ángulo



16) Válvula retensora oscilante



Válvula retensora horizontal de pistón

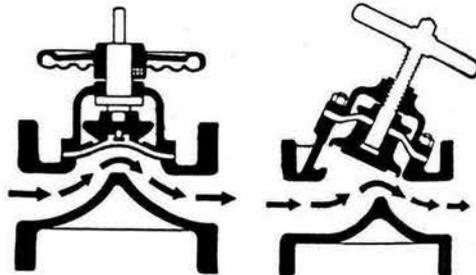


Válvula Y (inclinado)

Figura 1.5.



Válvula retensora de bola



Válvula de diafragma

Figura 1.6.

1.1.5.1. Tipos de válvulas según su construcción y acción

Válvula de Compuerta

Este tipo de válvula no se utiliza como reguladora, sino solamente como acción de apertura o cierre, es decir, trabajan totalmente abiertas o cerradas. Cuando están abiertas, el fluido pasa a través de la válvula en dirección recta, ofreciendo una pequeña pérdida de carga; cuando la válvula está parcialmente abierta el fluido circulante puede producir erosiones en el disco o en la superficie del asiento.

Los componentes principales de una válvula de compuerta son: cuerpo, tapa y guarnición.

El cuerpo es el elemento envolvente de las partes internas de la válvula y es el elemento por el que la válvula se conecta a la tubería o toberas. El cuerpo se cierra por medio de la tapa, que se encuentra unida al cuerpo por medio de tornillos a fin de poder permitir el mantenimiento y limpieza de las partes internas. La guarnición (trim) incluye el vástago (husillo), la cuña o disco y los anillos de asiento.

Por lo que se refiere al husillo, este puede ser ascendente o no ascendente. En el primer tipo la parte roscada del husillo no sufre corrosión ni erosión por no estar en contacto con el fluido, por lo que no son utilizadas en todos los tamaños para condiciones de servicio severas. En las válvulas de husillo no ascendente es el disco el que asciende en el husillo, utilizándose estas válvulas cuando hay espacio limitado y cuando el fluido que pasa a través de la válvula no erosiona ni deja depósitos en la rosca.

En base al tipo de cuña utilizado, las válvulas de compuerta

pueden ser:

-De cuña maciza.

-De cuña doble.

-De cuña flexible.

El tipo de cuña maciza es el más empleado, ya que sirve para múltiples servicios, si bien presenta el inconveniente de cierto agarrotamiento a temperaturas extremas, ya que el cuerpo se contrae más que la cuña.

La utilización del diseño de cuña flexible está especialmente destinada a evitar el agarrotamiento de la cuña a elevadas temperaturas o cuando se trabaja con fuertes cambios de temperatura.

La cuña doble son dos discos que se fuerzan, al cerrar la válvula, contra los anillos del asiento.

Aunque las válvulas de compuerta no se utilizan para regular el caudal, sustituyen, para tal fin, a las válvulas de asiento en tamaños de 6" y superiores, pero en este caso el disco debe estar guiado en todo su recorrido para evitar el traqueteo que se produciría y que sería causa del deterioro del disco y de los anillos de asiento.

Otro elemento importante de las válvulas son las empaquetaduras que son una serie de anillos que facilitan un cierre hermético entre el husillo y la tapa de la válvula. El material de la empaquetadura va en función de las características y temperatura del fluido circulante.

La figura 1.7 representa la conformación de válvulas de husillo ascendente y no ascendente.

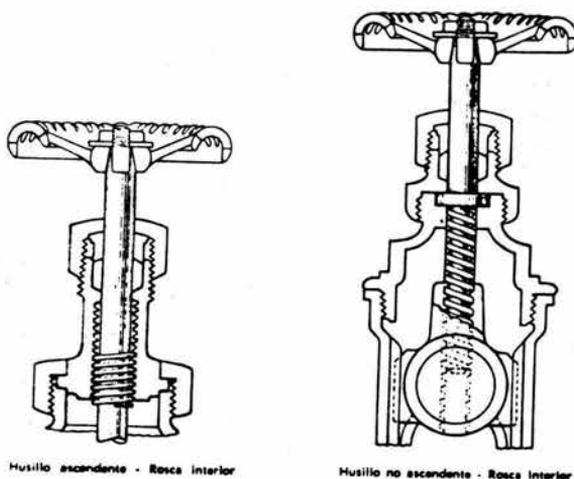


Figura 1.7.

Desde el punto de vista de utilización, las válvulas de compuerta más usuales en el mercado para plantas químicas, en base a normas angloamericanas son:

-De 1/2" a 1 1/2" Con extremos roscados o para soldar a enchufe; intervalos de 800 y 1500 lb, y de acuerdo con la norma API Std 602 o BS.2995.

-De 2" a 24" Con extremos bridados o para soldar a tope; intervalos de 150, 300, 600, 900, 1 500 y 2 500 lb, y de acuerdo con API Std 600 o ANSI B.16.34.

Válvula de Guillotina

Debido a su poco peso son muy usadas para grandes diámetros, empleándose fundamentalmente en líneas con productos fangosos.

Válvula de Asiento

Las válvulas de asiento permiten una regulación de caudal, ya que el fluido cambia de dirección en su interior y tienen, por tanto, una mayor pérdida de carga que las válvulas de compuerta, por lo que la válvula de asiento se utiliza fundamentalmente cuando se desea una acción de regulación del caudal.

Los componentes de las válvulas de asiento son los mismos que los de compuerta y tienen generalmente su asiento en un plano paralelo a la línea de flujo. Un tipo, las llamadas válvulas en Y, no tienen el asiento en esta posición y ofrecen una menor pérdida de carga, siendo utilizadas en servicios corrosivos o erosivos.

Las válvulas de asiento no son recomendadas para servicios donde se requiere aperturas o cierres frecuentes, y su uso generalmente se limita hasta diámetros de 6".

La figura 1.8 relaciona los diferentes elementos de una válvula de asiento.

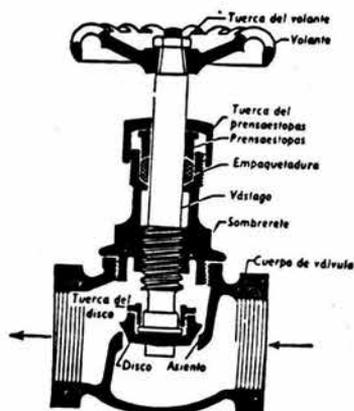


Figura 1.8. Válvula de asiento

Desde el punto de vista de utilización, las válvulas de asiento

más usuales en el mercado para plantas químicas, en base a normas angloamericanas, son:

-De 1/2" a 1 1/2" Con extremos roscados o para soldar a enchufe; intervalos de 800 y 1 500 lb, y de acuerdo con norma API 602 a BS. 2995.

-De 2" a 8" Con extremos bridados o para soldar a tope; intervalos de 150, 300, 600, 900 y 1 500 lb, y de acuerdo con norma BS. 1873.

Válvula de Retención

Las válvulas de retención se utilizan cuando se requiere obtener un flujo unidireccional; son automáticas en su funcionamiento, permitiendo que el flujo vaya en una dirección, pero no en la otra. Los tipos principales de válvulas de retención son: de clapeta y de bola. Las de tipo clapeta se utilizan cuando es necesario minimizar la pérdida de carga; trabajan mejor con líquidos, utilizándose también este tipo en válvulas de diámetro grande, pero no son aptas para líneas de tipo pulsante. La clapeta puede ser de tipo oscilante son las más utilizadas en conducciones de líquidos, y generalmente en aquellos circuitos que tienen válvulas de compuerta, pudiendo colocarse la válvula en posición vertical u horizontal.

En las de tipo clapeta ascendente el movimiento de la misma es vertical, guiado por un cilindro unido a la tapa de válvula; el cierre se produce generalmente por la acción de la gravedad, si bien existen algunas válvulas provistas de resorte que facilitan el cierre. Este tipo de válvulas sólo puede colocarse en posición

horizontal, utilizándose generalmente para tamaños no superiores a 2".

En las válvulas retención de bola la clapeta es sustituida por una bola, que es la que efectúa el cierre, siendo adecuadas estas válvulas para la mayoría de los servicios, empleándose para tamaños hasta de 2", tanto en servicios de gases como de líquidos.

Por último, dentro de las válvulas de retención cabe citar las válvulas de pie, que se utilizan para mantener una columna en la aspiración de las bolas verticales. El diseño de estas válvulas es básicamente una válvula de retención de clapeta ascendente con una malla filtrante de protección.

Desde el punto de vista de utilización, las válvulas de retención más usuales en el mercado, para plantas químicas, en base a normas angloamericanas, son:

-De 1/2" a 1 1/2". Con extremos roscados o para soldar a enchufe; intervalos de 800 y 1 500 lb, y de acuerdo con norma BS.2995 (tipos bola o clapeta ascendente).

-De 2" a 24". Con extremos bridados o para soldar a tope; intervalos de 150, 300, 900 y 1 500 lb, y de acuerdo con norma BS. 1868 (tipo clapeta).

Válvula de Macho.

Se instalan en puntos donde se necesita un cierre rápido. El macho cónico dispone de un agujero en el mismo, de forma que la válvula abre o cierra con un cuarto de vuelta del macho.

Las válvulas de macho se subdividen en lubricadas y no lubricadas. Las de asiento lubricado están menos sometidas a

posibles agarrotamientos o desgastes, si bien hoy en día se utilizan válvulas de macho no lubricadas con manguitos de teflón prensado colocado dentro del cuerpo de la válvula y que sirve como asiento al macho, impidiendo el contacto de dos superficies metálicas y disminuyendo la posibilidad de agarrotamiento; en consecuencia, el manguito de teflón hace la función de lubricante, y las posibles contracciones o dilataciones de dicho material por los cambios de temperatura quedan absorbidos por la construcción especial del cuerpo de la válvula con el manguito de teflón, encapsulado de tal forma en el cuerpo, que no puede moverse ni hacia arriba ni hacia abajo.

Las válvulas de macho ofrecen una mayor seguridad de cierre que las de compuerta y pueden servir también para regular el flujo, aunque en este sentido ofrecen peor servicio que las de asiento.

Desde el punto de vista de utilización, las válvulas de macho más usuales en el mercado para plantas químicas, en base a normas angloamericanas, son:

-De 1/2" a 1 1/2" Con extremos roscados o para soldar a enchufe; intervalo de 600 y 1 500 lb, y de acuerdo con norma API Std 600.

-De 2" a 12" Con extremos bridados o para soldar a tope; intervalos de 150 y 300 lb, y de acuerdo con norma API Std 599.

-De 14" a 24" Con extremos bridados o para soldar a tope; intervalos de 150 y 300 lb, tipo lubricado, y construidas de acuerdo con estándares de fabricantes.

-De 2" a 24" Con extremos bridados o para soldar a tope; intervalos de 600 y 900 lb, tipo lubricado, y construidas de

acuerdo con estándares de fabricantes.

Válvula de Bola

Este tipo de válvulas es un caso particular de las válvulas de macho no lubricadas en las que el tapón cónico se ha sustituido por una bola. La apertura y cierre de la válvula se realiza mediante un cuarto de vuelta de la palanca de acondicionamiento, utilizándose fundamentalmente en conducciones de gases, y no utilizándose, normalmente, estas válvulas para temperaturas superiores a 200°C.

Desde el punto de vista de aplicación, las válvulas de bola más usuales en el mercado, en base a normas angloamericanas; son:

-De 1/2" a 1 1/2" Con extremos roscados; intervalos de 800 lb, de acuerdo con norma BS. 4460.

-De 2" a 16" Con extremos bridados; intervalos de 150 y 300 lb, de acuerdo con norma BS. 4460.

Válvula de Mariposa

Este tipo de válvula tiene un disco que gira alrededor de un eje guiado en ambos extremos por unos cojinetes. El cierre de la válvula se produce por la presión del borde del disco sobre una superficie elástica o metálica del cuerpo. Estas válvulas pueden emplearse para servicio de regulación o cierre, además de ser una válvula compacta de relativo poco peso, lo que es una ventaja, sobre todo en grandes diámetros. Un tipo de estas válvulas tienen un asiento de elastómeros y están limitadas a unas ciertas temperaturas, sobre unos 100°C pero se construye otro tipo con

asiento de anillo metálico para servicios de altas temperaturas.

Válvula de Angulo de 90°

Son de acción similar a las de asiento, diferenciándose de éstas en que la entrada y la salida están defasadas 90°. A veces, para servicios no críticos, se usan estas válvulas en sustitución de una válvula de asiento y un codo, pensando en una cierta economía, pero esta economía no siempre es cierta a la larga, ya que las fatigas y deformaciones que se producen en los codos de un sistema de tuberías no deben trasladarse a las válvulas.

Válvula de Aguja

Son válvulas de acción similar a las de asiento, con el asiento sustituido por un disco cónico, muy puntiagudo. Son válvulas robustas y se utilizan en situaciones donde las condiciones son de muy alta presión y/o muy alta temperatura. También se utilizan para conexiones de instrumentos cuando es necesaria una estrangulación muy precisa.

Válvula de Membrana o Diafragma

Es un tipo especial de válvulas, llamadas también tipo Saunders, en las que el cierre se produce por la acción de una membrana sobre un resorte en el cuerpo de la válvula. Son las válvulas adecuadas para servicios corrosivos o con sólidos en suspensión (lechadas o pastas aguadas) ya que pueden dar un buen servicio de cierre aún quedando atrapadas partículas sobre el asiento. Se debe elegir cuidadosamente el material de la membrana

y el revestimiento del cuerpo, por su parte interna, en base al producto y condiciones de trabajo.

Válvula de Pinza

Son similares a las Saunders, pero en lugar de cerrar una membrana contra el asiento metálico, están constituidas por tubo de goma que cierra apretando sus caras. Se utilizan para aplicaciones similares a las válvulas de membrana.

1.1.5.2. Tipos de válvulas según su acoplamiento

Desde el punto de vista del acoplamiento a las tuberías las válvulas pueden ser:

- Válvulas bridadas.
- Válvulas para soldar a tope.
- Válvulas para soldar a enchufe.
- Válvulas roscadas.

1.1.5.3. Normas referentes a válvulas

Para las válvulas básicamente utilizadas en el sector químico, las normas angloamericanas son las de más generalizada aceptación, pudiendo indicarse como más usuales las siguientes normas:

ANSI B.16.5	Válvulas bridadas; identificación del rating.
ANSI B.16.10	Válvulas bridadas; definición de dimensiones.
ANSI B.16.34	Válvulas para soldar a tope.

ANSI B.2.1	Válvulas roscadas.
API 600	Válvulas de compuerta.
API 602	Válvulas de compuerta de pequeña dimensión.
API 599	Válvulas de macho.
BS.1873	Válvulas de asiento.
BS.1868 y BS.2995	Válvulas de retención.
API 603	Espesor de pared de válvulas.
API 598	Inspección y pruebas de válvulas.

1.2. BOMBAS

De acuerdo con su principio de funcionamiento, las bombas pueden clasificarse en dos grandes grupos, cada uno de los cuales, a su vez, pueden incluir diversos tipos.

1.2.1. De energía cinética:

1.2.1.1. Centrífugas.

1.2.1.2. Especiales.

1.2.2. De desplazamiento positivo o volumétricas:

1.2.2.1. Alternativa.

1.2.2.2. Dosificadoras.

1.2.2.3. Rotativas:

-De engranajes.

-De tornillos.

-De paletas.

1.2.3. Especiales.

1.2.1. Bombas de Energía Cinética

El principio de funcionamiento de las bombas de energía cinética es que el órgano que comunica energía al fluido lo hace en forma de energía de velocidad, mientras que en las bombas de desplazamiento positivo la energía cedida al fluido se hace en forma de energía de presión.

Existe aún un tercer grupo de máquinas hidráulicas que intercambian energía en forma de energía potencial, como son los tornillos de Arquímedes, norias, bombas Mamut, etc; pero estos equipos tienen actualmente sólo aplicación en condiciones muy específicas.

1.2.1.1. Bombas Centrífugas

La denominación de bombas centrífugas se da generalmente a las máquinas que tienen un rodete giratorio montado sobre el eje y una carcasa que está fija. La forma del rodete, y la configuración de su carcasa correspondiente, determina también la manera según la cual es acelerado el fluido a través de la bomba.

La verdadera bomba centrífuga utiliza un impulsor o rodete que origina con su giro un movimiento de rotación del líquido que lo circunda, con dos componentes, una radial debida a la fuerza centrífuga, originada por el giro, y otra tangencial a la periferia del impulsor. La dirección exacta que el líquido tomará es la resultante de las dos componentes y la velocidad que se comunica al líquido representa la energía que se añade al mismo. En las bombas más usuales, de una fase, el líquido, en su movimiento giratorio, se dirige hacia el punto de descarga de la

bomba, conducido por la envolvente o carcasa. Otras formas de rodets, sin embargo, pueden dirigir el flujo en dirección radial y axial simultáneamente, o bien en una dirección puramente axial, siendo conocidas, respectivamente, como bombas de flujo mixto y flujo axial.

Las bombas centrífugas propiamente dichas, las de flujo mixto y de flujo axial, son generalmente consideradas como diferentes tipos de bombas rotodinámicas, lo que en Francia se llama "turbopompes" y en Inglaterra se llama "rotodynamic pumps".

En función de cómo se produce la transformación de la energía cinética en energía de presión en las bombas centrífugas, estas se clasifican en bombas tipo difusor o tipo voluta. Las bombas centrífugas de tipo difusor disponen de álabes guías fijos colocados en una corona alrededor del rodete; estos álabes constituyen canales gradualmente divergentes cuya misión consiste en cambiar la dirección del flujo y transformar la energía cinética en energía de presión. En las bombas tipo voluta el cuerpo que rodea al impulsor va sufriendo un incremento paulatino, en forma de espiral, aumentando continuamente la sección de descarga, produciéndose la transformación de energía, transformación que normalmente se completa en el difusor recto en que termina la voluta. El rendimiento de una bomba tipo voluta puede ser incluso superior al de una bomba tipo difusor y sin las consiguientes desventajas de volumen, peso y costos mayores.

Elementos principales de una bomba centrífuga:

Las bombas centrífugas están constituidas mecánicamente por una serie de elementos con misiones específicas en el funcionamiento de

la bomba.

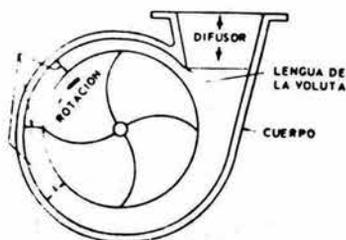


Figura 1.9. Elementos principales de una bomba centrífuga.

La figura 1.10 muestra la sección de una bomba indicando los elementos fundamentales.

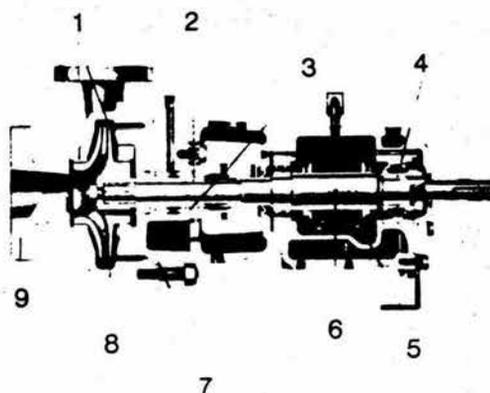


Figura 1.10. Sección de una bomba centrífuga. 1) Anillos de desgaste. 2) Manguito. 3) Alojamiento para empaquetadura o cierre. 4) Cojinetes. 5) Carter. 6) Eje. 7) Cierre con junta. 8) Impulsor. 9) Brida de aspiración.

Los elementos más importantes son:

-Cuerpo o carcasa.- Es la caja en cuyo interior se encuentra emplazado el impulsor. Una función importante de la carcasa es reducir la alta velocidad con que el impulsor descarga el líquido

y convertir su energía cinética en energía. El cuerpo puede ser de tipo voluta o difusor. El tipo voluta es llamado así por su forma en espiral que rodea al impulsor, de forma que va aumentando paulatinamente la sección de descarga. El cuerpo difusor va provisto de un conjunto de paletas difusoras que rodean la periferia del impulsor y convierten la energía de velocidad en energía de presión.

-Impulsor o rodete (figura 1.11).- Es el elemento que hace girar la masa del líquido para que éste adquiera la energía de velocidad, constituyendo el corazón de la bomba.

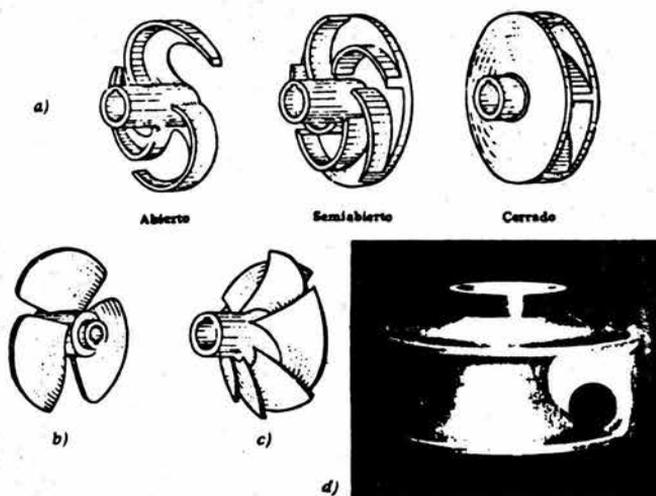


Figura 1.11. Tipos de rodetes para bombas centrífugas. a) Rodetes radiales. b) Rodete axial. c) Rodete mixto. d) Rodete a canal.

Por lo que se refiere a la constitución mecánica del rodete, en general los rodetes cerrados dan mejor rendimiento, pero cuando se trata de líquidos con partículas en suspensión debe irse a rodetes semiabiertos o abiertos, ya que sus rendimientos no se ven tan

enérgicamente afectados por los desgastes. Cuando se trata de bombear líquidos con partículas de una cierta granulometría o líquidos que transportan elementos sólidos, se utilizan rodetes a canal que permiten el paso de los sólidos a través de la bomba sin dañarla.

-Eje.- Es el elemento que transmite al impulsor el giro que a su vez recibe del equipo motriz.

-Camisa del eje.- El eje es uno de los elementos más costosos de la bomba y sufre desgastes en la zona de las empaquetaduras y apoyos. Para evitar tener que cambiar el eje por estos desgastes, se le provee de una camisa fácilmente cambiable cuando ha sufrido desgastes.

-Empaquetaduras y prensaestopas.- Unos puntos críticos de una bomba centrífuga son las zonas por donde el eje giratorio atraviesa el cuerpo de la bomba. Es necesario sellar bien esta zona de paso para evitar la entrada de aire en el interior de la bomba, si la presión en la misma es menor que la atmosférica, o fugas de líquido, si la presión es mayor.

Para ello se utiliza el estopero, que generalmente toma la forma de hueco cilíndrico que aloja varios anillos de empaquetaduras alrededor del eje o camisa del eje. La empaquetadura se comprime para dar ajuste deseado con el eje por medio del prensaestopas. La empaquetadura debe adsorber energía sin dañar al eje, por lo que debe estar convenientemente lubricada.

-Cierres mecánicos (figura 1.12).- Una solución más idónea que las empaquetaduras, para el mismo problema, la constituye los

cierres mecánicos, que aunque más costosos, son ampliamente utilizados hoy en día para muchos servicios. Los diferentes tipos de cierres pueden diferir en algunos aspectos, pero se fundamentan en los mismos principios. Estos elementos se sitúan en un plano perpendicular al eje y se basan en dos superficies altamente pulidas que se deslizan una sobre la otra, estando conectadas una al eje y la otra a la parte estacionaria de la bomba. Estas superficies sobrepuestas, que son de diferentes materiales, se mantienen en contacto continuo por un resorte. La figura muestra la constitución de un cierre mecánico.

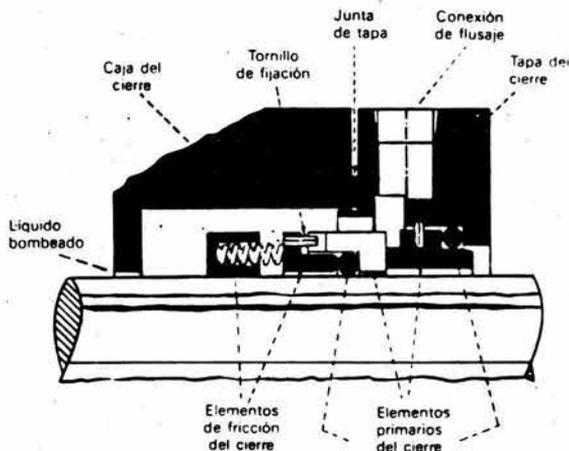


Figura 1.12. Componentes básicos de un cierre mecánico

-Anillo de desgaste.- debido a las estrechas holgaduras existentes entre el rodete y el cuerpo, se producen desgastes en estos elementos.

Para evitar tener que cambiar los elementos más importantes y costosos, se disponen sobre dichos elementos unos anillos que son fácilmente cambiables cuando en ellos se han producido desgastes

que afectan al funcionamiento de la bomba.

-Cojinetes.- La función de los cojinetes en las bombas centrífugas es mantener al eje, que se encuentra sometido a la acción de cargas radiales y axiales, en perfecta alineación con las partes estacionarias de la bomba, absorbiendo dichas cargas. Los cojinetes destinados a absorber los esfuerzos radiales se llaman cojinetes de alineación, y los que absorben los esfuerzos axiales se llaman cojinetes de empuje. Generalmente los cojinetes de empuje y de alineación. Normalmente se utilizan cojinetes de bolas de una o dos hileras.

-Acoplamiento.- Los ejes de las bombas centrífugas están conectados a los ejes de las máquinas motrices por medio de acoplamientos, a excepción de aquellos tipos de motobombas en la que el eje es común para ambas máquinas. Los acoplamientos pueden ser flexibles o rígidos. Un acoplamiento que no permita movimiento relativo axial o radial entre el eje de la bomba y el del motor es rígido, conecta a los ejes en forma tal que los convierte en un sólo eje. Estos acoplamientos están prácticamente restringidos a las bombas verticales.

Los acoplamientos pueden ser de discos flexibles (Metastream), de laminillas en forma de resorte (Falk) o bien de engranes con dientes abombados para permitir desplazamientos angulares entre ejes (Fast).

Tipos de bombas centrífugas: Horizontales y verticales.

Dentro del grupo de bombas horizontales con cámara partida radialmente, el tipo más sencillo es el "monobloc" (figura 1.13)

que se usa generalmente para servicios generales. El tipo "bracket" (figura 1.14) tiene el inconveniente de que hay que desmontar las tuberías de las bridas de aspiración para abrir la bomba, lo que hace que no cumpla ciertas normas para determinados trabajos, como es la norma API 610, pero son bombas robustas; a veces se construyen revestidas internamente con goma o metal duro, muy aptas para lodos abrasivos, con aplicación en minería o plantas de fertilizantes.

El modelo con patas (foot) se ha diseñado para evitar el inconveniente anteriormente indicado y tienen la ventaja de fácil mantenimiento; son ligeras de construcción y económicas.

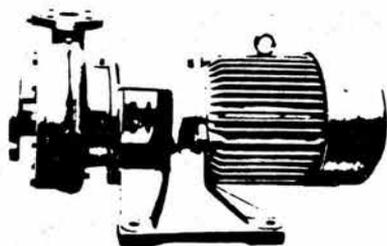


Figura 1.13. "Bomba monobloc".

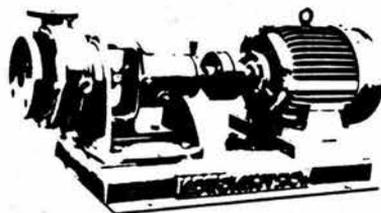


Figura 1.14. Bomba tipo "bracket".

La bomba de cámara partida radialmente y soportes en línea de centros (centerline) es la bomba comúnmente llamada bomba de proceso en la industria del petróleo, diseñada en su totalidad según la norma API 610 para su uso en todos los servicios de una refinería de petróleo. Estas bombas están diseñadas con una corrosión mínima de 1/8" y de modo que soporten una presión de prueba hidrostática de una vez y media la presión máxima de descarga cuando está construida de hierro fundido, y dos veces la

presión máxima de descarga cuando está construida de acero, factores que implican un espesor de carcasa mayor del normal, además de que el intervalo de aspiración sea igual al de la brida de impulsión.

Estas bombas tampoco requieren desconectar las tuberías de las bridas de aspiración y descarga para desmontarlas y sacar el impulsor, y en consecuencia requieren acoplamiento con espaciador.

Cuando se manejan líquidos a alta temperatura, las llamadas bombas de proceso son generalmente centerline, ya que en las bombas tipo químicas (foot), al calentarse, el eje se desplaza verticalmente hacia arriba, sometiendo a un gran esfuerzo al acoplamiento. Esto no sucede en las bombas centerline (figura 1.15), y es por lo que la norma API exige que la bomba sea soportada en la línea de centro para temperaturas a partir de 175°C.

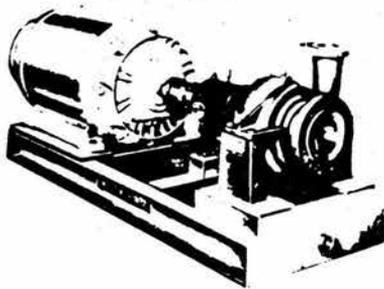


Figura 1.15. Bomba con soportes en línea de centros.

La bomba de cámara partida axialmente (figura 1.16) apareció con el fin de evitar el inconveniente de tener que desconectar las tuberías de las bridas de aspiración y descarga para abrir la bomba, al tiempo que permiten un fácil mantenimiento y reducido

precio, pero tiene el inconveniente de que a partir de ciertas presiones tienen tendencias a producirse desalineación del impulsor.

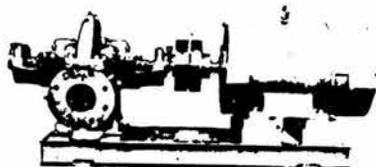


Figura 1.16. Bomba de cámara partida axialmente.

En la figura 1.17 muestra una bomba vertical de pozo seco, que pueden ser de cámara partida axial o radialmente.



Figura 1.17. Bomba vertical, pozo seco, cámara partida radialmente

Las bombas verticales de pozo profundo son de dos tipos: voluta o difusor. La bomba tipo voluta se instala en la disposición llamadas normalmente tipo Sump (figura 1.18) y lleva normalmente impulsores abiertos, usándose fundamentalmente en sumideros.

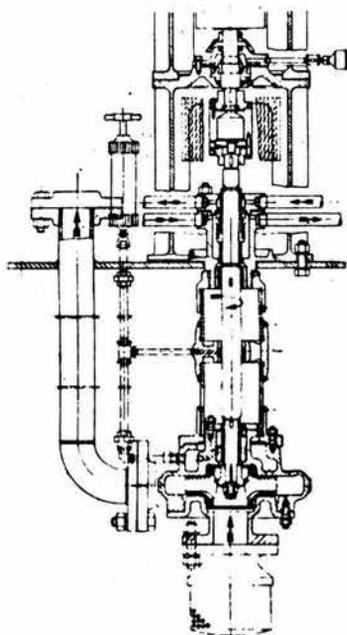


Figura 1.18. Bomba vertical de pozo profundo tipo Sump.

La bomba vertical de pozo profundo con difusor puede estar diseñada con motor superior, como sucede en el caso de bombas de barril o bote (figura 1.19), o con el motor sumergido, utilizadas en elevaciones de agua en pozos de hasta 300 metros de profundidad y pequeño diámetro, y que tienen la ventaja de tener el motor junto al cuerpo de impulsores, ahorrando el eje a lo largo de la columna que complica mecánicamente la instalación y eleva el

precio.

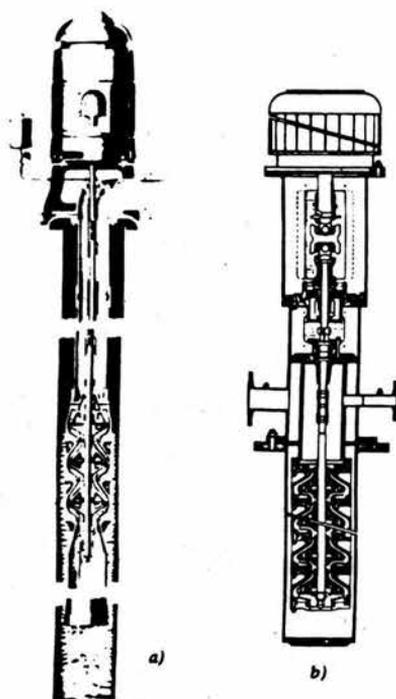


Figura 1.19. a) Bomba vertical de pozo profundo sumergible;
b) bomba vertical de barril o bote.

1.2.2. Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico

Son aquellas que comunican al fluido energía de presión por la acción de un elemento con movimiento alternativo, rotativo, etc. Basándose precisamente en el tipo de acción se encuentran diversos tipos de bombas, de los que los más usuales se describirán seguidamente, y que se han clasificado en dos grandes grupos básicos: alternativas y rotativas, con diferentes tipos en cada uno de estos grupos.

1.2.2.1. Bombas Alternativas

Dentro del grupo de bombas de desplazamiento positivo, las bombas alternativas tienen una importante aplicación para determinados servicios. Estas bombas funcionan por medio del movimiento alternativo de un émbolo de un cilindro, movimiento que es suministrado, en las bombas accionadas mecánicamente, por un mecanismo de biela-manivela accionado por un motor o turbina. En las bombas de acción directa el accionamiento se obtiene a partir del vapor, mediante otro pistón montado con el pistón de la bomba sobre el vástago común.

En su forma más sencilla, la bomba tiene un sólo pistón actuando en una sola dirección, es decir, de simple efecto. En el movimiento de aspiración se abre la válvula de entrada del fluido, y al volver el pistón esta válvula se cierra, abriéndose la válvula de impulsión por la presión comunicada al líquido, saliendo éste por la tubería por la que ha de circular. Si el pistón actúa en ambas direcciones la bomba es de acción doble. Dependiendo del número de pistones, uno, dos, tres, etc; la bomba se llama, respectivamente simplex, dúplex, tríplex, etc.

-Tipos de Bombas Alternativas:

Las bombas alternativas pueden clasificarse en diferentes maneras. Se toma normalmente como base de clasificación el tipo de construcción del cilindro. En este sentido se clasifican fundamentalmente en dos tipos:

-De pistón.

-De émbolo buzo.

La diferencia básica entre ellas es que, en las del primer

tipo, el pistón lleva la empaquetadura con él, mientras que el émbolo buzo se mueve atravesando la empaquetadura, que permanece estacionaria. A medida que la bomba es de mayor tamaño la dificultad de reemplazar la empaquetadura aumenta y, por otra parte, cuando se bombea líquidos que afectan a la empaquetadura se hace necesario cambiar la misma con mayor frecuencia; todo ello ha llevado al diseño de bombas con empaquetadura exterior, más fácilmente cambiabile.

En la figura 1.20 se muestra la sección de una bomba simplex de acción doble accionada por motor eléctrico.

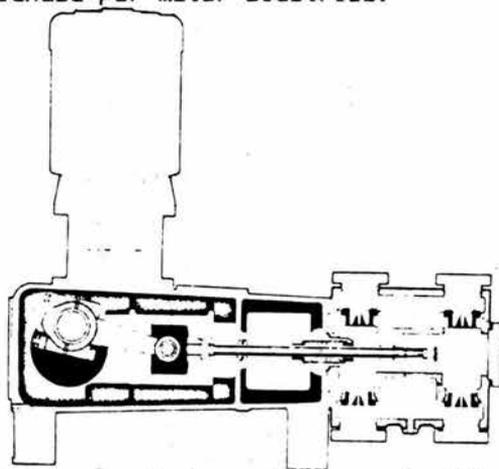


Figura 1.20. Bomba simplex de acción doble:

1.2.2.2. Bombas Dosificadoras:

En los procesos industriales aparece con cierta frecuencia la necesidad de tener que dosificar una cierta cantidad de un líquido. Para este fin, uno de los sistemas más prácticos y precisos son las bombas dosificadoras, que permiten dosificaciones volumétricas con precisión del orden del 2%.

Sustancialmente las bombas dosificadoras son bombas de tipo alternativo, pero a veces el pistón no actúa directamente sobre el líquido a bombear, sino que se dispone un elemento intermedio, generalmente una membrana, que a su vez es accionada por el pistón, a través de un fluido motor. Las bombas de membrana o fuelle se utilizan fundamentalmente para aquellos casos en que no pueden permitirse fugas o cuando el fluido bombeado contiene partículas erosivas que pueden afectar al cilindro y al pistón. De acuerdo con lo indicado anteriormente, los tipos más usuales de bombas dosificadoras son las de pistón y membrana, si bien otros tipos sustituyen el sistema de membrana por un sistema de fuelle. La figura 1.21 muestra la sección de una bomba dosificadora de membrana.

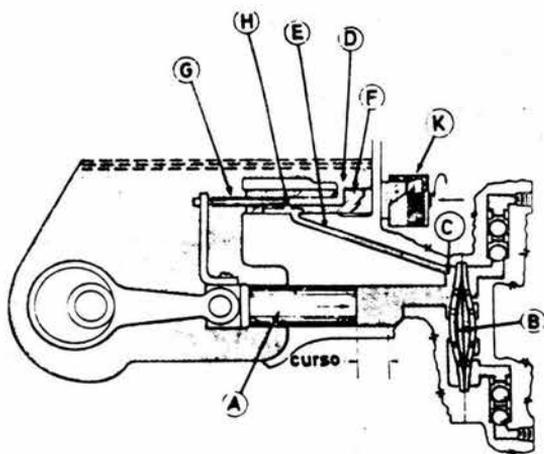


Figura 1.21. Sección de bomba dosificadora de membrana. a) Pistón motriz. b) Membrana flexible. c) Alojamiento de la membrana. d) Carter. e) Canal de by-pass del fluido motor. f) Camisa regulable. g) Pistón de regulación. h) Orificio. k) Botón de regulación.

1.2.2.3. Bombas Rotativas

Las bombas rotativas son máquinas de desplazamiento positivo

que efectúa impulsiones por medio de un eje giratorio provisto de rotores que pueden estar constituidos por elementos de diferentes tipos: engranajes, paletas, tornillos, etc; que giran en una carcasa cerrada. El diseño de la bomba rotativa normal no incluye válvulas ni canales complicados, lo que permite que se alcancen buenos rendimientos para trasiego de líquidos de diferentes viscosidades, así como un bajo NPSH requerido.

Ventajas:

- Son autocebadoras.
- El NPSH requerido es bajo.
- Permiten amplio campo de velocidades.
- Permiten altas velocidades con buenos rendimientos.
- Pueden utilizarse en un amplio campo de capacidades y alturas.

Dado que las bombas rotativas son de desplazamiento positivo, generalmente se precisa una válvula de seguridad en el sistema, ya que si una válvula de la descarga se halla accidentalmente cerrada la bomba continuará impulsando. En bombas pequeñas, la válvula de seguridad suele ir incorporada en la propia bomba, y en las de mayor tamaño la válvula se incorpora en un by-pass en la impulsión, recirculando el líquido descargado, según se muestra en la figura 1.22.

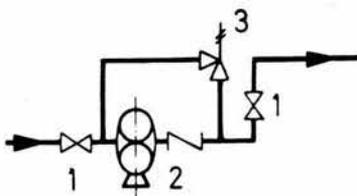


Figura 1.22. Bomba rotativa con válvula de seguridad.

Normalmente la válvula de seguridad se tara a un 10% por encima de la presión normal de descarga. Los tipos más importantes, normalmente utilizados en la industria, de bombas rotativas son:

-Bombas de engranajes externos (figura 1.23).- Son tal vez las más utilizadas. Estas bombas están constituidas por dos engranajes, uno motriz fijo al eje de accionamiento y otro conducido, libre sobre un eje debidamente lubricado, ambos ajustados al cuerpo de la bomba.

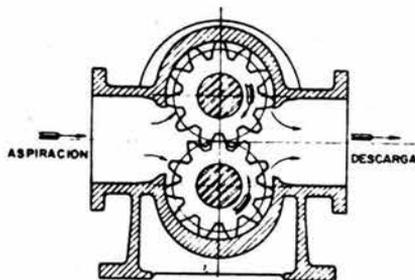


Figura 1.23. Sección de bomba de engranajes externos.

La eficiencia no suele ser superior al 60%. Estas bombas no son aptas para vehicular líquidos que lleven sólidos en suspensión, encontrando su mejor aplicación para manipular fluidos que tienen buenas características lubricantes, que evitan desgastes, como son aceites de viscosidades bajas o moderadamente altas, y limpios.

Son bombas constructivamente sencillas y que abarcan una amplia gama de tamaños, desde unidades pequeñas hasta de grandes capacidades, como son 400 litros por minuto y mayores. Son también apropiadas para trabajar a elevadas presiones (por ejemplo, hasta

100 Kg/cm²), especialmente con aceites limpios.

-Bombas de rotor lobular.- Tienen dos rotores que están accionados y sincronizados por engranajes de interconexión o una cadena de transmisión montada en el exterior; de esta manera no puede haber desgaste por fricción de los propios rotores y, si es necesario, se pueden ajustar los juegos a los requisitos impuestos por el fluido manipulado, en particular con respecto al deslizamiento y rendimiento de funcionamiento, o bien incluso a los sólidos que pasan. La considerable variedad de formas de rotores que se pueden emplear aporta también una posibilidad de control sobre el rendimiento, idoneidad para la manipulación de un producto en particular, y capacidad. Por lo que requieren para su funcionamiento una altura de carga positiva en la aspiración. Una vez cebadas son capaces de desarrollar una buena altura de aspiración.

Las bombas de rotor lobular también son capaces de manipular fluido que contienen gases arrastrados o disueltos, aunque en tales casos se producirá un descenso del rendimiento. Los rotores

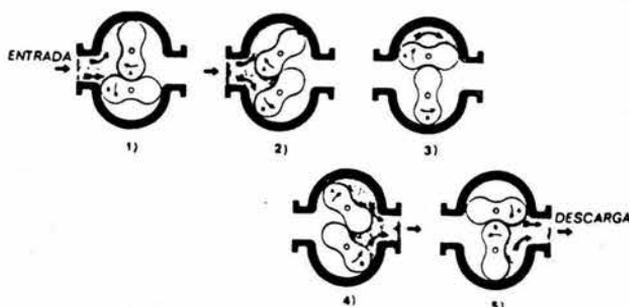


Figura 1. 24. Ciclo de funcionamiento de bomba rotativa con rotor tipo "Root".

convencionales no son adecuados para manipular sólidos duros o abrasivos en suspensión; para estos servicios se pueden emplear rotores de materiales elastómeros o recubiertos con ellos.

La figura 1.24 muestra el esquema de funcionamiento de una bomba lobular con rotor tipo root.

-Bombas de tornillo.- Dispone como elemento de impulsión de uno, dos, o tres tornillos de rosca helicoidal alojados en el interior de una carcasa. El tipo de un sólo tornillo, llamado tornillo salomónico, permite mediante la adecuada selección de los materiales de construcción, el manejo de líquidos cargados.

Es posible llegar a presiones de 100 Kg/cm^2 y aún superiores. Estas bombas se construyen en una amplia gama de capacidades, y así los modelos normalizados del mercado tienen capacidades que varían desde 5 l/min a 800 l/min, y aún mayores.

-Bombas de paletas deslizantes (figura 1.25).- La bomba de paletas deslizantes sencilla comprende de un rotor ranurado montado asimétricamente en una carcasa prácticamente circular. Las paletas rígidas están montadas en dichas ranuras del rotor por las que se deslizan en dirección radial.

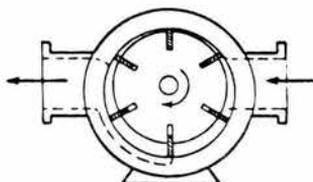


Figura 1.25. Esquema de bomba de paletas deslizantes.

1.2.3. Bombas Especiales

Naturalmente estos dispositivos encuentran su aplicación práctica en servicios específicos, por lo que su utilización está limitada a los mismos.

- a) Bomba de anillo líquido.
- b) Bomba "Rota".
- c) Grupo de presión.
- d) Bomba "Mamut".
- e) Bomba de "Tornillo de Arquímedes".

Las bombas a) y b) son, en realidad, bombas rotativas especiales. Los grupos de presión son la conjunción de una bomba con un recipiente pulmón presurizado, mientras que las bombas d) y e) son dispositivos especiales que trabajan en base a principios diferentes.

Bomba de anillo líquido:

Una bomba de anillo líquido consta de un rotor con varias paletas, montado excéntricamente en el interior de una carcasa de sección circular parcialmente llena de líquido. La rotación del rodete impele el líquido contra la pared de la carcasa, lo que ocasiona la formación de un anillo de líquido que da origen al nombre de la bomba. El rotor crea una serie de bolsas o celdas sin líquido entre las paletas, pero debido a su posición excéntrica, el volumen de cada celda experimenta una variación que en cada revolución pasa por los valores máximo y mínimo. Las lumbreras, situadas en el lugar adecuado de la parte posterior de la carcasa, proporcionan entrada por aspiración en un lado (en la región donde

el volumen de la celda aumenta) y una descarga a presión en el otro lado (en la región donde se reduce el volumen de la celda). Por lo tanto, la máquina funciona como una bomba para manipular cualquier fluido que no sea miscible con el líquido que forma el anillo. En la práctica, el fluido anular suele ser agua (este tipo de bomba se llama generalmente bomba de "anillo de agua") y el fluido transportado es un gas.

Los inconvenientes de estas bombas son:

- Sólo son apropiadas para el bombeo de gases.
- Tienen bajo rendimiento.

Su aplicación básica es en producción de vacíos y en servicios de ciertos tipos de industrias, como ejemplo es la compresión del CO₂ saliente del horno de cal y coque en las indutrias azucareras, gasificación de líquidos y otros.

La figura 1.26 muestra una sección esquemática de una bomba de anillo líquido.

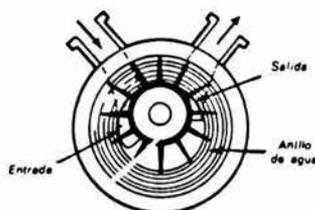


Figura 1.26. Esquema de bomba de anillo líquido.

Bomba "Rota":

Esta bomba (figura 1.27), muy aplicada en la industria azucarera, es una bomba rotatoria que puede ser incluida dentro del grupo de bombas rotativas especiales y que tiene su principal

aplicación en el bombeo de las masas cocidas que salen de las tachas en el proceso de producción de azúcar. Las mieles pueden manejarse con bombas de engranajes, pero resulta difícil de bombear las masas cocidas con este tipo de bombas. Ninguna bomba dio un resultado satisfactorio hasta que la Cía. Hallesche Maschinenfabrik sacó al mercado la bomba "Rota". es ésta una bomba de desplazamiento positivo que dispone de un impulsor de sección elíptica que gira dentro de la carcasa de la bomba y en el que descansa una rasqueta de resorte.

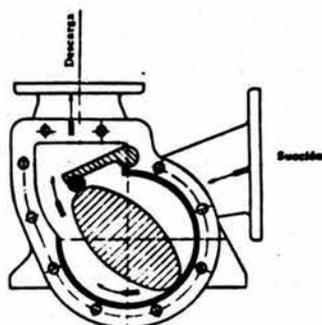


Figura 1.27. Sección de bomba "Rota".

Grupo de presión:

En las ciudades y en las industrias, cuando la presión de agua en la red general es insuficiente, se hace necesario aumentarla para que llegue a los puntos de consumo. Para esto es muy útil los servicios de una instalación con grupo electro-bomba y depósito de presión. El agua, tomada por la bomba de la misma red general, o bien de un depósito abierto alimentado desde la red general, es bombeada al depósito de presión en el cual se ha inyectado

previamente una cierta cantidad de aire, dando lugar a una precompresión inicial. La bomba sigue inyectando agua y la cámara de aire se reduce de volumen aumentando la presión hasta un límite determinado en cuyo momento, por la acción de un presostato conectado al depósito, se interrumpe la marcha del grupo electro-bomba. Al consumir agua los usuarios, el nivel bajo y la presión de la cámara de aire desciende y, al llegar a cierto límite, el presostato acciona de nuevo el grupo poniéndolo en marcha, comenzando el mismo ciclo anterior.

Las bombas autoaspirantes tienen una ventaja evidente para ser utilizadas en los grupos electroautomáticos con depósito de presión, ya que al ser capaces de aspirar agua y aire, pueden funcionar como compresor de anillo líquido e inyector por sí mismas el aire necesario para la creación de la cámara de compresión del depósito. Además, si hay fugas en la instalación no

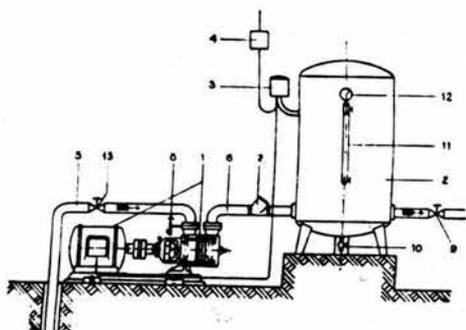


Figura 1.28. 1) Grupo electro-bomba con bomba autoaspirante y motor eléctrico. 2) Depósito de presión. 3) Presostato. 4) Guardamotor o arrancador automático estrella triángulo. 5) Tubería de aspiración de la bomba. 6) Tubería de impulsión de la bomba al depósito. 7) Válvula de retención. 8) Válvula de aspiración del aire destinado a crear la cámara de compresión del depósito. 9) Válvula de paso para aislar en caso necesario el depósito de presión de la red a alimentar. 10) Grifo de purga. 11) Tubo de nivel de vidrio provisto de grifos de cierre. 12) Manómetro. 13) Válvula de cierre.

se desceban ya que pueden aspirar el aire que entra por las tuberías, vehiculándolo mezclado con el agua.

La figura 1.28 muestra la constitución de un grupo de presión.

Bombas "Mamut":

Este dispositivo (figura 1.29) eleva un líquido introduciendo un fluido no miscible y menos denso, generalmente aire comprimido.

El principio de funcionamiento, es que al introducir el aire en la base de la columna la densidad del líquido en la misma disminuye, por lo que el nivel del líquido en dicha columna tiene a elevarse.

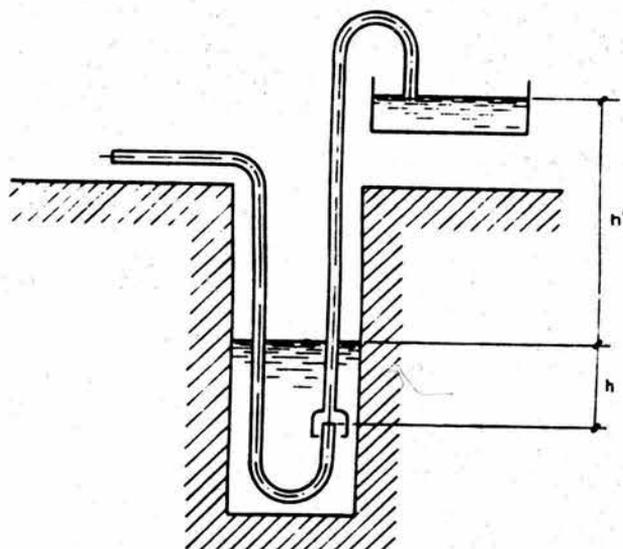


Figura 1.29. Esquema de principio de funcionamiento de la bomba o elevador "Mamut".

Bomba tipo "Tornillo de Arquímedes":

Este dispositivo se emplea en drenajes y elevación de aguas residuales, por su simplicidad y permitir el paso de sólidos.

Se pueden conseguir con facilidad alturas de elevación de 7m. El caudal de elevación de un tornillo de Arquímedes depende de su diámetro, r.p.m., inclinación, disposición del tornillo y otros factores que deben ser cuidadosamente estudiados. Los diámetros normales son de 400 a 200 mm, que permiten elevaciones para dichos diámetros de unos 100 y 3 500 m³/h, respectivamente, pero pueden construirse tornillos para caudales de hasta 10,000 m³/h, e incluso superiores.

1.2.4. Ensayo de Bombas

Para la construcción de las bombas, y en función de su servicio, existen determinadas Normas Internacionales, de las cuales las más usualmente utilizadas son:

A) Para bombas centrífugas:

- API núm. 610.
- DIN núm. 1 944.
- Hidraulic Institute Standards.

B) Para bombas alternativas:

- API número 674.
- Hidraulic Institute Standards.

C) Para bombas rotativas:

- API NÚM. 676.

1.3. VENTILADORES

Los ventiladores son máquinas capaces de suministrar energía a un flujo bajo la forma de aumento de presión y de velocidad por medio de un elemento de rotación. Para producir y mantener el

movimiento de un fluido dentro de un conducto se necesita una presión determinada, o incremento de ella, que viene generada por los ventiladores. Este incremento tiene dos componentes: presión estática y presión dinámica. La presión estática es ejercida por el gas sobre las paredes del conducto y que, en parte, se consume en vencer la resistencia de frotamiento a lo largo del propio conducto y las resistencias ocasionadas ofrecidas por los filtros, separadores, desviadores, etc; que puedan encontrarse a lo largo del mismo. En cambio, la presión dinámica es la presión necesaria para dar al gas la velocidad con que se mueve dentro del conducto.

1.3.1. Tipos de ventiladores

De acuerdo con su construcción, los ventiladores pueden ser centrífugos y helicoidales o axiales.

1.3.1.1. Ventiladores Centrífugos

En estos ventiladores el flujo viene determinado por la fuerza centrífuga provocada en una columna del fluido puesta en rotación y por la velocidad tangencial del fluido que sale de la rueda. La caja del ventilador, en forma de concha, se ocupa de transformar gradualmente la presión dinámica en presión estática. La rueda consta de dos anillos coaxiales y paralelos, entre los cuales van fijadas las aletas. Estas adoptan diferentes formas, según sean las finalidades propias de cada ventilador, y pueden dividirse en tres tipos:

- a) Aletas directas.
- b) Aletas invertidas.

c) Aletas radiales.

La figura 1.30 nos muestra los diagramas vectoriales respectivos para cada uno de los tres tipos. La velocidad V_1 indica la velocidad periférica o tangencial, y la velocidad V_2 la radial a la salida de la rueda, correspondiente a la propia rueda. La velocidad resultante es R .

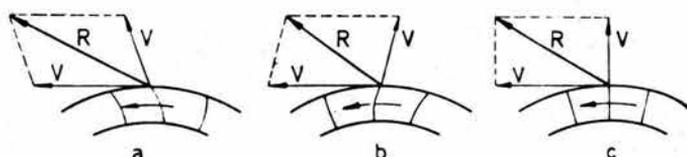


Figura 1.30 a) Aletas directas. b) Aletas invertidas. c) Aletas radiales.

Del exámen de estos diagramas se deduce que, a igualdad de V_1 y V_2 , la resultante R es máxima en el caso de aletas directas y mínima en el caso de aletas invertidas. Esta observación explica que para lograr el mismo resultado (determinado por el valor R), un ventilador centrífugo de aletas invertidas tiene que girar a mayor velocidad que uno de aletas directas.

El ventilador centrífugo de aletas directas trabaja a poca velocidad, es silencioso.

El ventilador centrífugo de aletas invertidas funciona a gran velocidad y da buen rendimiento.

El ventilador centrífugo de aletas radiales tiene características intermedias entre los dos tipos ya tratados; estos últimos ventiladores se emplean frecuentemente en los casos en que deba tratarse aire con gran contenido de sustancias extrañas

(transportes neumáticos). Además, en este caso, proyecto de la rueda prevé una construcción más robusta, para evitar también la posibilidad de acumulación de las sustancias transportadas (figura 1.31).



Figura 1.31. Rueda impulsora de un ventilador centrífugo.

1.3.1.2. Ventiladores Helicoidales o Axiales

Estos ventiladores (figura 1.32) están contruidos por un núcleo giratorio con palas de forma helicoidal que gira de modo que la velocidad relativa entre el aire y cada uno de los perfiles de las palas actúa como el ala de un avión, provocando una depresión en una cara de las palas y una presión en la opuesta que producen la impulsión axial del aire a través del ventilador. Si el ventilador gira en sentido opuesto al proyectado, se invierte el sentido de circulación del aire, pero por trabajar la pala en condiciones no previstas, el caudal y el rendimiento bajan considerablemente por lo que debe tenerse cuidado en que estos ventiladores giren en el sentido adecuado. En estos ventiladores el movimiento del aire se produce por la impulsión que ejercen las aletas inclinadas de la rueda: el flujo del aire tiene una

componente principal paralelo al eje de rotación de la rueda y un movimiento de rotación con centro en el propio eje. Los ventiladores helicoidales pueden adoptar diferentes formas: con sólo la rueda; con la rueda introducida en una cámara cilíndrica; e incluso colocando en este eventuales deflectores de guía. El primer tipo, por razón de la escasa recuperación de presión dinámica en forma de presión estática, es aplicable solamente cuando se exijan pequeños incrementos de presión. El segundo, en cambio, puede adoptarse para incrementos de hasta 50-70 mm.c.a., o bien, si está provisto de deflectores de guía que recuperen la energía anexa a la componente tangencial de velocidad, se pueden obtener incrementos que pueden sobrepasar los 300 mm.c.a.

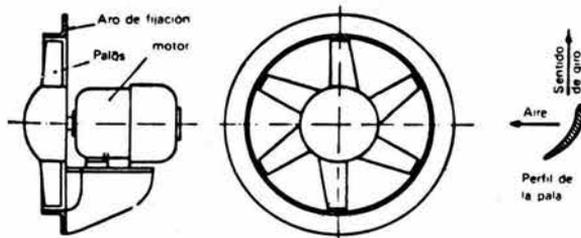


Figura 1. 92. Ventilador axial.

Una de las características principales del ventilador helicoidal es la marcha descendente de la potencia absorbida al aumentar el volumen. Entre las ventajas de estos ventiladores está la simplicidad de su construcción y la posibilidad de su acoplamiento directo al motor que lo acciona. En este caso, sin embargo, estando el motor sumergido en el flujo de aire, hay una limitación en la temperatura del mismo.

1.4. COMPRESORES

El compresor es una máquina térmica que aspira un gas a una baja presión y lo impulsa comprimido a una presión mayor que la aspiración.

Los compresores se clasifican generalmente en base a su funcionamiento:

1.4.1. De desplazamiento positivo o volumétricos:

1.4.1.1. Alternativos.

1.4.1.2. Rotativos:

-Paletas.

-Anillo líquido.

-Roots.

-De tornillo.

1.4.2. De desplazamiento cinéticos:

1.4.2.1. Centrífugos.

1.4.2.2. Axiales.

1.4.1.1. Compresores Alternativos

El principio general de un compresor alternativo se representa en la figura 1.33.

Y consiste en un pistón P que se desplaza en el interior de un cilindro. En la culata del cilindro hay unas válvulas que actúan en sentido inverso, unas abriendo para la aspiración y otras para la impulsión. Suponiendo el pistón en su posición más alta, comienza el ciclo con las válvulas de admisión y descarga cerradas; al ir aumentando el volumen de la cámara la presión del gas

contenido en su interior desciende hasta que se alcanza un cierto valor entre la presión externa y la interna, lo que provoca la apertura de la válvula de entrada del gas. Al final del recorrido de descenso del pistón, la cámara se halla llena de gas a la presión de aspiración, el cilindro comienza su carrera de ascenso y la válvula de entrada se cierra; el gas se comprime y al llegar

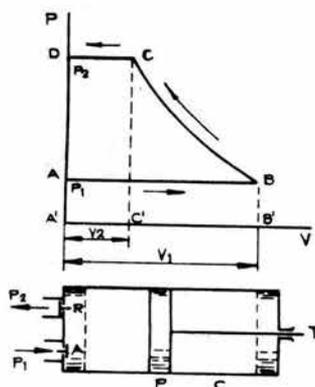


Figura 1.33. Esquema y diagrama teórico de un compresor de pistón.

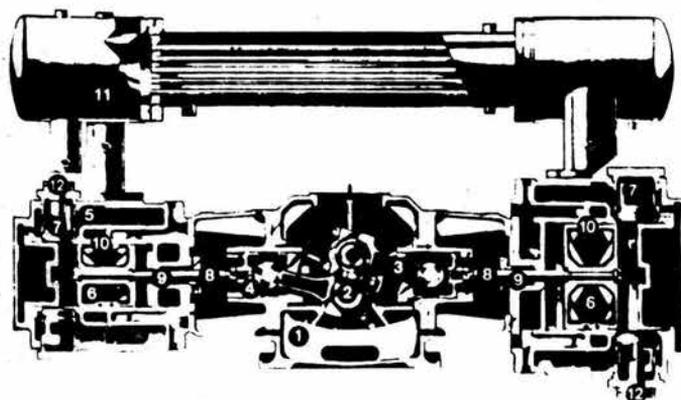


Figura 1.34. Sección de compresor horizontal de dos etapas. 1) Carter. 2) Cabeza de biela. 3) Cuerpo de biela. 4) Pie de biela. 5) Cilindro. 6) Pistón. 7) Válvula. 8) Vástago de pistón. 9) Cierre. 10) Segmento. 11) Refrigerador intermedio. 12) Regulador.

a cierto punto del recorrido del pistón la presión en el interior de la cámara provoca la apertura de la válvula de descarga, que se mantiene abierta hasta que la salida del gas hace descender la presión en el interior de la cámara, y la válvula se cierra cuando las presiones interna y externa se igualan.

1.4.1.2. Compresores Rotativos

Basan su principio de funcionamiento en el movimiento giratorio del elemento compresor accionado directamente por el eje de rotación de la máquina. La reducción volumétrica de los gases se consigue en el espacio cerrado comprendido entre el cilindro estator y el elemento rotor. En función del tipo del elemento rotor y la forma de producir la reducción volumétrica de los gases, se distinguen los diferentes tipos de estos compresores, tales como:

- Compresores de paletas.
- Compresores de anillo líquido.
- Compresores tipo "Root".
- Compresores de tornillo.

-Compresor de Paletas (figura 1.35):

Consta de un rotor cilíndrico con un número de paletas montadas en ranuras longitudinales radiales de rotor. Al girar el rotor las paletas se mueven en las ranuras del mismo manteniéndose siempre en contacto con la pared del estator. Los espacios entre dos paletas se llenan de gas al pasar por la aspiración y se va comprimiendo al disminuir dichos espacios en el giro.

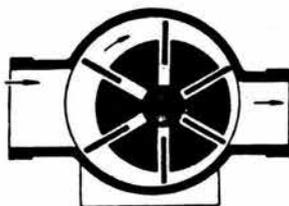


Figura 1.95. Esquema de compresor rotativo de paletas.

-Compresor de Anillo Líquido (Figura 1.36):

Este compresor consiste de una carcasa que encierra un rotor colocado excéntricamente y provisto de paletas fijas. La carcasa está parcialmente llena con un fluido, el cual se pone en movimiento por las paletas del rotor, siendo lanzado contra las paredes de la carcasa por la fuerza centrífuga, sustituyendo un anillo girante en el interior del compresor. La excentricidad del rotor hace que el compresor actúe de forma similar a la de un compresor de paletas.

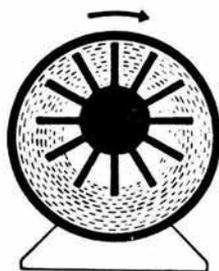


Figura 1.96. Esquema de compresor rotativo de anillo líquido.

Los inconvenientes de este tipo de compresor es que debe disponer de algún elemento que mantenga constante el nivel del líquido ya que pueden producirse erosiones por cavitación. Tienen

un alto consumo de energía, por lo que no suele utilizarse para presiones superiores a 5.5 Kg/cm^2 .

- Compresor de Dos Rotores Tipo "Root" (figura 1.37):

Estos compresores están constituidos por dos palas de perfil adecuado para que al girar ambas a la misma velocidad, una en sentido contrario a la otra, se ajustan perfectamente entre sí y la carcasa como si fuera una bomba de engranajes. La situación de los ejes respecto a la carcasa permite que las palas incomuniquen la cámara de aspiración con la de impulsión, impulsando y comprimiendo el aire.

No suelen utilizarse para presiones superiores a 2 Kg/cm^2 .

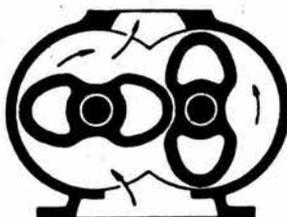


Figura 1.37. Esquema de compresor rotativo tipo "Root".

-Compresores de Dos Rotores Helicoidales (De Tornillo) (figura 1.38):

En el caso de dos rotadores con dentado helicoidal, el movimiento de rotación del gas está combinado con un movimiento de traslación en el sentido axial; esta traslación obliga a desplazar los orificios de aspiración e impulsión en el sentido del eje de la máquina y, al mismo tiempo, permite decrecer de una manera continua el volumen disponible para el gas. De ello resulta que

cuando el gas ha alcanzado el orificio de salida ha sufrido ya la reducción de volumen que corresponde al incremento de presión deseado.

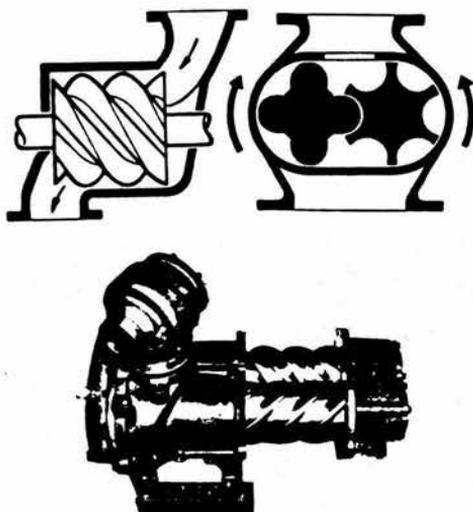


Figura 1.38. Esquema seccional y conjunto de compresor de tornillo

Fases de funcionamiento:

- Aspiración.
- Transporte.
- Compresión.
- Impulsión.

El compresor de tornillo consta de los siguientes elementos fundamentales:

- El cárter fijo.
- Una lumbrera de entrada o de aspiración.
- Una lumbrera de salida o de impulsión.
- Dos engranajes helicoidales, de perfil semicircular, uno macho con cuatro lóbulos y otro hembra con seis huecos.

- Dos cojinetes radiales delanteros (parte de la entrada).
- Dos cojinetes radiales traseros (parte de la salida).
- Dos cojinetes axiales traseros (parte de la salida).
- Un pistón equilibrador del empuje axial.
- Cierre hermético del eje.

La gama de utilización de los compresores de tornillos es la de 100 a 575 Nm³/min para presiones manométricas de 7 Kg/cm².

1.4.2.1. Compresores Centrífugos

El compresor centrífugo consta de uno o varios rodetes (rotor) que comunican a los gases atrapados por su centro de una gran velocidad periférica, y de uno o varios difusores (estator) donde la energía de velocidad se transforma en energía de presión, por reducción de velocidad. En el compresor centrífugo no existen válvulas, émbolo, cilindros, segmentos, etc; ni partes de rozamiento; esto quiere decir que se trata de una máquina segura y con pocos desgastes. Como además, son compresores que giran a elevada velocidad, son de pequeño tamaño comparados con otros tipos de potencias similares.

La energía mecánica del agente motor se transforma, en el rodete del impulsor, en energía de velocidad y después, por reducción de la velocidad, en energía de presión en el difusor que rodea al rodete. Cuando en los álabes del rodete no varía la presión se habla de compresores centrífugos de acción, y cuando se proyectan los álabes con un perfil adecuado y, dentro del rodete, aumenta la presión, se habla de compresores de reacción.

Para alcanzar unas determinadas presiones es necesario utilizar

un compresor centrífugo de varias células (compresor multicelular). En un compresor de este tipo el rodete de cada célula del compresor lleva los álabes normalmente curvilíneos o inclinados hacia atrás; el rodete está seguido por un difusor que también suele estar provisto de álabes. A la salida del difusor el fluido atraviesa un codo que transforma el movimiento centrífugo en movimiento centrípeto a fin de conducirlo a la aspiración de la célula siguiente, y en el curso de este movimiento centrípeto el fluido es guiado por álabes fijos que forman el canal de retorno y en modo tal que la salida de estos álabes está orientada de manera que no se produzcan choques a la entrada del rodete siguiente. Tanto los álabes del difusor como los del canal de retorno están fijados a un diafragma; la estanqueidad entre este diafragma y el rotor está asegurada por medio de juntas laberínticas. Para unas condiciones de funcionamiento dadas, el número de células de un compresor y las dimensiones de este varían con la velocidad de rotación. Si la tasa de compresión que se debe realizar es elevado puede ser conveniente dividir el compresor en varias partes que tengan cada una de ellas una velocidad de rotación apropiada; a medida que la presión aumenta, y consecuentemente el volumen del fluido disminuye, la velocidad de rotación puede aumentar, lo que permite disminuir las dimensiones del compresor. La compresión en varias etapas es de gran interés cuando se trata de relaciones de compresión superiores a 2 ó 3.

Elementos Básicos de un Compresor Centrífugo (figura 1.39):

El compresor centrífugo se compone de una serie de elementos rotativos y otros elementos estacionarios. Los elementos rotativos

son:

- Eje de accionamiento.
- Rodetes, con sus correspondientes álabes.
- Pistón equilibrador del empuje lateral.
- Disco de empuje.
- Cojinetes exteriores.
- Acoplamiento del elemento motor.
- Bomba de aceite.

Los elementos estacionarios son:

- Difusores y canales de retorno.
- Apoyos de cojinetes.
- Cierres laberínticos entre los rodetes.
- Cierres de laberinto en los extremos de eje.
- Cierre hermético del eje.

Las ventajas e inconvenientes de este compresor son:

-Es muy apropiado para trabajar con refrigerantes de baja presión.

- Máquina pequeña y de poco peso.
- Fácil regulación de la potencia frigorífica.
- No tiene problemas con aceite lubricante.
- Simplicidad mecánica, al carecer de válvulas, émbolos, bielas, cigueñal, etc.

-Máquina de caudal continuo.

-Es poco apropiada para trabajar con refrigerantes de alta presión.

-Máquina que cubre solamente el campo de grandes potencias.

Por trabajar preferentemente en el campo de las altas

temperaturas y en instalaciones de gran potencia, el compresor centrífugo encuentra su mejor aplicación en instalaciones de aire acondicionado más que en el de la producción de frío industrial.

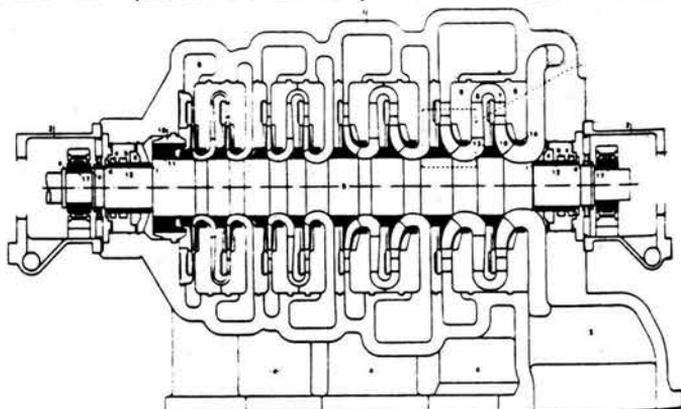


Figura 1. 39. Sección de compresor centrífugo.

1.4.2.2. Compresor Axial

Los compresores axiales están constituidos básicamente por un elemento rotor que dispone de varias ruedas giratorias de álabes en alternancia con paletas directrices fijas solidarias a la carcasa del compresor. En estos compresores la compresión se realiza por el efecto de los sucesivos cambios de dirección a que se somete el gas a comprimir, que se mueve en dirección fundamentalmente axial. Los impulsores transmiten su propia energía al gas, y las paletas directrices orientan convenientemente el flujo con el fin de lograr una correcta entrada del gas en la siguiente rueda o la fila de impulsores. Estos compresores requieren, a igualdad de relación de compresión, un mayor número de etapas que un compresor centrífugo, ya que en este último la compresión tiene lugar en buena parte por la acción

de la fuerza centrífuga.

En comparación con los compresores centrífugos, los axiales son más adecuados cuando se trata de comprimir grandes caudales con bajas relaciones de compresión, presentando un mejor rendimiento, en el punto de proyecto, debido a que el flujo del gas en el interior del compresor es más regular.

Asimismo, a paridad de caudales tratados, el compresor axial es de menores dimensiones que uno centrífugo, y trabaja a mayor velocidad.

1.4.3. Ensayo de compresores

Una vez construidos los compresores es necesario someterlos a una serie de ensayos para comprobar su correcto funcionamiento y cumplimiento de las especificaciones. En los compresores alternativos se realizan pruebas de funcionamiento mecánico; cuando el tipo de gas de trabajo lo requiera se debiera realizar prueba de presión interior, utilizándose normalmente con helio. Las normas de referencia más usualmente seguidas para el de estos compresores son:

API - 618

ASME - PTC - 9

En los compresores centrífugos de proceso se realiza una prueba mecánica, sin carga. Es importante la determinación del punto de bombeo y las velocidades críticas de la máquina.

Las normas de referencia más usuales son:

API - 617

ASME - PTC - 10

En el caso de compresores centrífugos para aire, las normas usuales son: (2)

API - 672

ASME - PTC - 10

1.5. FILTROS

1.5.1. Filtros de torta

Los filtros que acumulan cantidades visibles y apreciables de sólidos filtrados en la superficie del medio de filtración se denominan filtros de torta. La alimentación que se va a filtrar contiene por lo común, por lo menos, 1% de sólidos suspendidos y puede llegar a 40% o más.

1.5.2. Filtros por gravedad (de carga hidrostática)

En un filtro por gravedad, el flujo de filtrado se produce debido a la presión hidrostática de la columna de material para filtrar, que permanece por encima de la superficie de la torta o el medio de filtro. Esta presión es relativamente baja y va de un máximo de unos cuantos centímetros de fluido en un embudo de laboratorio a unos cuantos pies de fluido en un filtro de planta. Por tanto se usan filtros por gravedad sólo para materiales de filtración relativamente libre y en los casos en que no se requieren velocidades más elevadas. Las ventajas de los filtros por gravedad son:

-Gran simplicidad.

-Su dependencia de los accesorios más sencillos.

-Por tanto, su bajo costo inicial.

-La posibilidad de construirlo casi de cualquier material; por ejemplo, de porcelana o loza química.

-Las ventajas de cualquier filtro horizontal de superficie superior: las partículas grandes se asientan con rapidez en la superficie de filtración, para proporcionar un prerrecubrimiento de baja resistencia para las partículas más finas; el lavado de la torta es efectivo y eficiente.

Las desventajas son:

-Las velocidades relativamente bajas de filtración.

-El área excesiva de piso que se ocupa por unidad de área de filtración.

-Los costos elevados de mano de obra que se requieren.

-Problemas difíciles de limpieza.

Excepto en los laboratorios de química, en las obras o en las plantas de escala muy pequeña, los filtros por gravedad se usan raramente en las industrias de procesamiento.

1.5.2.1. Filtro de succión por gravedad.

Un filtro de succión es un tanque equipado con un fondo falso, perforado o poroso, que puede soportar un medio de filtración o actuar como septo. En un filtro de succión por gravedad, la lechada contenida en el tanque se filtra por su propia carga hidrostática, el filtrado se recoge en un resumidero bajo el filtro o corre directamente al alcantarillado.

1.5.2.2. Filtros de bolsa.

Los filtros de bolsa por gravedad, que consisten en bolsones o bolsas de tela de filtro, fieltro o piel, que cuelgan de armazones suspendidos, han sido desplazados en gran parte por otros filtros más eficientes. Sin embargo, se utilizan todavía, a veces, para operaciones simples de filtración, como el retiro de grumos de la pintura o la suciedad de los aceites lubricantes. No se recomiendan para filtraciones de procesamiento.

1.5.2.3. Filtros de arena.

El tipo más común de filtro de gravedad es el de lecho de antracita o arena. Consiste en un tanque o una tolva, donde se ponen estratos graduados de grava y arena y antracita pulverizada. El tamaño de partículas del lecho disminuye del fondo hacia la parte superior. El lecho granular es el medio de filtración y se agrega el material que se va a filtrar en su parte superior. El filtrado se retira por un fondo falso o tuberías de drenaje perforadas, empotradas en el medio, cerca del fondo. El filtro puede estar encerrado y funcionar a presión, en lugar de hacerlo por gravedad.

1.5.3. Filtros a presión

Los filtros a presión funcionan a una presión superior a la atmosférica en la superficie de filtración y atmosférica o mayor en el lado de corriente abajo del septo.

Las ventajas de los filtros a presión son:

-Su utilización de presión elevada de filtración que permite las filtraciones relativamente rápidas y, la realización de

separaciones difíciles que, de otro modo, serían prohibitivamente lentas.

-Su tamaño compacto proporciona un área grande de filtración por unidad de espacio de piso ocupado por el filtro.

-Los filtros a presión por lotes ofrecen mayor flexibilidad que los de cualquier otro tipo, a un costo inicial relativamente bajo.

Las desventajas son:

-El filtro a presión por lotes, seguro y bien desarrollado, tiene dificultades para adaptarse a los procesos continuos y, en muchas aplicaciones, su manejo resulta costoso.

-Por otra parte, los filtros continuos a presión son bastante inflexibles y los equipos, costosos.

1.5.3.1. Filtros a presión por lotes

1.5.3.1.1. Filtro de arena de flujo ascendente.

El material que se va a filtrar se bombea hacia arriba a través del lecho granulado de arena y grava, desplazándose en el sentido de disminución de tamaño de los granos. Así, todo el lecho sirve como trampa de suciedad. Se utilizan primordialmente para el agua, incluyendo agua de mar o freática, agua de efluente de procesamiento de desechos y agua de inyección o salmuera para pozos profundos.

1.5.3.1.2 Filtros prensa.

El filtro prensa es el más simple de los filtros a presión y sigue siendo uno de los más utilizados. Hay dos diseños básicos: la prensa de placas a nivel o la de placas y marcos y la prensa de

placas con recesos. Una prensa de placas y marcos, como lo implica su nombre, es un conjunto de placas sólidas alternas, cuyas caras están horadas, ranuradas o perforadas, para permitir el drenaje y marcos huecos, en que se recoge la torta durante la filtración (figura 1.40). Un medio de filtración, por lo común tela, cubre las dos caras de cada una de las placas. Por lo común, las placas y los marcos son rectangulares; aun cuando pueden ser también triangulares o circulares (figura 1.41).

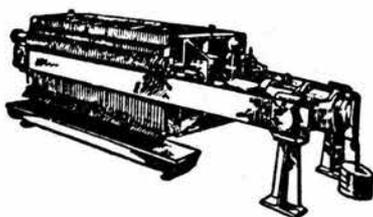


Figura 1.40. Filtro prensa de placas y marcos. (T. Shriver Co., Inc.).

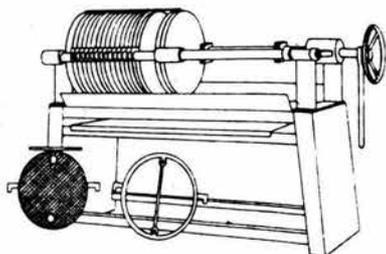


Figura 1.41. Filtro prensa de placas circulares metálicas. (Star Tank and Filter Corp.).

Se alimentan las prensas y se descarga el filtrado a través de canales en las esquinas de las placas y los marcos o en pestañas que se proyectan de los lados de las placas y los marcos. Está última disposición elimina los orificios del canal en la tela de filtro, que son a veces causas de dificultades y fugas. El canal

de filtrado puede ir a todo lo largo de la prensa, hasta una tubería de descarga situada en un extremo (descarga cerrada), o bien, se puede descargar por llaves individuales, una en la parte lateral de cada placa, a una artesa situada por debajo de la prensa (descarga abierta). Las llaves son útiles cuando se requiere un filtrado absolutamente claro, puesto que la llave de una placa con fugas que deja pasar sólidos se puede cerrar para retirar la placa del servicio. De otro modo, se prefiere la descarga cerrada y es esencial cuando se filtran materiales tóxicos o volátiles. Son posibles diferentes disposiciones de alimentación y descarga: la alimentación por el fondo y la descarga por la parte superior permite un desplazamiento rápido del aire y producen una torta de uniformidad máxima, con sólidos normales; la alimentación por la parte superior y la descarga por el fondo proporcionan una recuperación máxima de filtrado y una desecación máxima de la torta, por lo cual es el método más apropiado para los sólidos pesados que se sedimentan y tienden a atascar los orificios de la entrada inferior; la alimentación doble y la descarga doble dan acomodo a materiales que se filtran a velocidades elevadas y los materiales de gran viscosidad y esta disposición es particularmente apropiada para el recubrimiento y el drenaje de productos del filtro al final de una corrida. Un fabricante ofrece un diseño de "rodillo", que permite el paso de la alimentación superior a la inferior, entre las filtraciones o durante ellas (Star Tank and Filter Corp.).

Se emplean dos técnicas de lavado en los filtros prensa, que se ilustran en la figura 1.42. En el lavado simple, el licor de

lavado sigue la misma trayectoria que el filtrado y el material que se va a filtrar. A menos que las tortas sean extremadamente uniformes y muy permeables, el lavado simple no es eficiente en un filtro bien lleno. Otra técnica más eficaz es el lavado completo, un proceso en que el licor de lavado se admite a las caras de placas alternas (cuyos canales de descarga se corta), donde pasa a lo largo de todo el espesor de la torta, para drenarse sobre las caras de las otras placas.

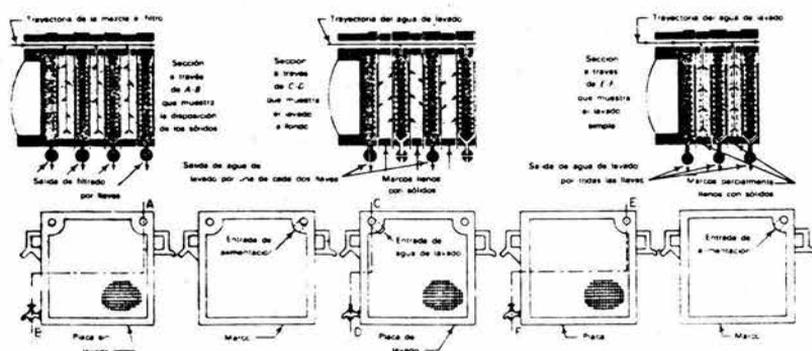


Figura 1.42. Patrones de llenado y flujo de lavado en un filtro prensa (D. R. Sperry Co.).

Un filtro prensa de placas con recesos sólo tiene placas. Las dos caras de cada placa se ahuecan para formar una cámara para la acumulación de la torta entre cada dos placas. En un filtro común de placas con recesos, la alimentación entra por un orificio central y el filtrado se descarga en una esquina. Una tela de filtro con un orificio central cubre la placa y se conecta a través del orificio de alimentación a la tela de la cara opuesta de la placa, mediante sujetadores o un tubo de tela al que van

cocidos los dos tejidos del filtro.

Las placas con recesos de juntas calafateadas (placas de filtro de tipo CGR de Shriver) eliminan los inconvenientes de las placas tradicionales con recesos. Sus características se ilustran en la figura 1.43.

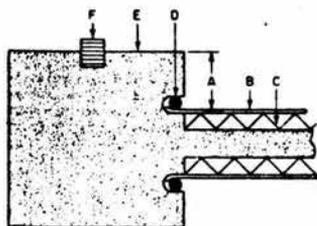


Figura 1.43. Detalle de sección de placa filtradora calefateada y con empaques y recesos. A) Receso de aglutinación. B) Tela filtradora. C) Superficie de desague de la placa. D) Banda de calafateo. E) Junta de la placa. F) Empaque sellador. (T. Shriver Co., Inc.).

1.5.3.2. Filtros de presión continua

1.5.3.2.1. Los filtros giratorios de presión continua.

Los tambores de compartimientos múltiples-y, en menor grado, los discos divididos en sectores- controlados por una válvula giratoria y con descarga mediante una cuchilla, son los elementos esenciales de los filtros giratorios continuos de presión.

1.5.4. Filtros al vacío

Los filtros al vacío funcionan a una presión menor que la atmosférica en el lado corriente abajo del septo del filtro.

Se utilizan filtros tanto por lotes como continuos en aplicaciones de procesamiento; pero el número predominante de

instalaciones es, por mucho del último tipo. De hecho, la principal justificación de la filtración al vacío es su adaptabilidad a los sistemas continuos.

Las ventajas de los filtros al vacío son:

-Se pueden diseñar como filtros continuos eficaces.

-Como tales, utilizan poca mano de obra y son adiciones eficientes para los procesos continuos.

- La filtración se puede abrir a la atmósfera y, por consiguiente, es fácil llegar a ella para efectuar inspecciones y reparaciones.

-Por lo común, los costos de mantenimiento son reducidos.

Las desventajas son:

-Se debe mantener un sistema de vacío.

-No se pueden usar filtros al vacío con filtrados volátiles, ya sea debido a un punto normal de ebullición bajo o a una temperatura de operación elevada.

-La mayoría de los filtros al vacío no pueden manejar sólidos compresibles cuya filtración es difícil.

-Los filtros continuos al vacío son inflexibles y no ofrecen un buen desempeño si su corriente de alimentación cambia con respecto a la velocidad, la consistencia o el carácter de los sólidos.

Los filtros continos al vacío manejan probablemente un mayor tonelaje de sólidos que todos los demás tipos de filtros combinados. Por otra parte, los filtros al vacío por lotes tienen un aprovechamiento local limitado en el procesamiento químico.

1.5.4.1. Filtros al vacío por lotes

Hay filtros de succión al vacío que son útiles en las operaciones pequeñas con productos químicos finos.

1.5.4.2. Filtros continuos al vacío

Los filtros continuos al vacío, muy utilizados en las industrias de procesamiento, se clasifican en tres categorías: de tambor, de disco (figura 1.44) y horizontales. Los últimos se representan por medio de los tipos de mesa, bandeja y banda. Aun cuando hay diferencias sorprendentes entre los diseños y las aplicaciones de los filtros continuos al vacío que usan en la actualidad a nivel comercial, todos tienen las mismas características en común: una superficie de filtración que se desplaza de un punto de aplicación de la lechada, en donde se deposita la torta bajo el impulso de un vacío, a un punto de separación de sólidos, donde se descarga la torta por métodos mecánicos y neumáticos y, de ahí, de regreso al punto de aplicación de la lechada; una válvula (o un equivalente) que regula la presión por debajo de la superficie en varias etapas de su recorrido; un ciclo aparentemente continuo de funcionamiento

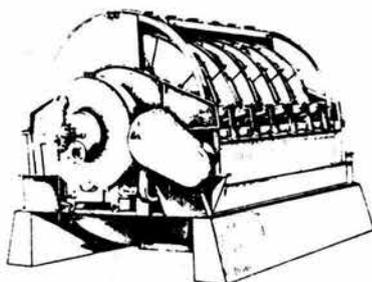


Figura 1.44. Filtro de discos American (Dorr-Oliver, Inc.).

que, de hecho, es una serie sinfín de eventos estrechamente espaciados por lotes que se aproximan a un patrón continuo.

1.5.4.3. Filtros continuos horizontales al vacío

Una clase de filtros horizontales al vacío se caracteriza por una superficie horizontal de filtración en forma de una mesa (figura 1.45), una banda o bandejas múltiples en disposición lineal o circular. Sea cual fuere la forma, esos filtros tienen en común ciertas ventajas y desventajas genéricas. Del lado positivo, permiten una elección independiente de la torta, el tiempo de lavado y el ciclo de desecación. Filtran eficientemente sólidos pesados y densos, permiten la inundación de la torta con disolvente de lavado y se adaptan con facilidad al lavado o a la

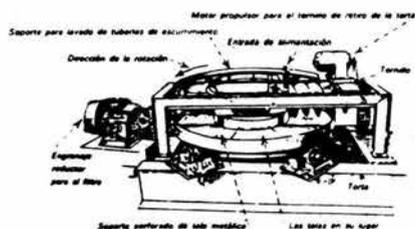


Figura 1.45. Filtro continuo de mesa horizontal al vacío (Dorr-Oliver, Inc.).

lixiviación a contracorriente. Del lado negativo, su construcción es más costosa que la de los filtros de tambor y emplea cantidades relativamente grandes de espacio de piso por unidad de área de filtración. Se han usado sobretodo para filtrar yeso y residuos de fosfato de roca en el proceso por vía húmeda de H_2PO_4 , para lodos metalúrgicos, el lavado de pulpas y la extracción de semillas

oleaginosas por medio de disolventes.

1.5.5. Filtros de clarificación

Los filtros de clarificación se utilizan para hacer mezclas líquidas que contienen cantidades muy pequeñas de sólidos. Cuando los sólidos están finamente divididos de modo que sólo se ven como una especie de aureola, el filtro que los separa se denomina a veces filtro pulidor. La lechada original a la filtración no contiene en general más del 0.10% de sólidos, cuyo tamaño puede variar mucho (de 0.001 a 100 micras). Por lo común, el filtro no produce una torta visible, a veces, debido a lo reducido, a la cantidad de sólidos separados, y en otras ocasiones a causa de que las partículas se extraen al quedar atrapadas en el medio de filtración en lugar de acumularse sobre él. En comparación con los filtros de torta, los clarificadores tienen menor importancia en los trabajos de procesamientos químicos y sus aplicaciones más sobresalientes se asocian con los campos de las bebidas y la purificación de aguas, la filtración farmacéutica, la clarificación de aceites combustibles y lubricantes, el condicionamiento de soluciones de electrodeposición y la recuperación de disolventes para la limpieza en seco. Sin embargo son esenciales para los procesos de extrusión de películas y devanado de fibras; la solución de hilado o devanado debe estar libre de partículas mayores que cierto tamaño, a fin de mantener la calidad del producto y evitar que se taponen los rodillos.

Los filtros clarificadores se clasifican como prensas de disco y placa filtros de presión de prerrecubrimiento (figura 1.46),

clarificadores de cartucho y varios otros tipos. Los ultrafiltros constituyen una clase especial de prensas de placas y filtros de cartucho.

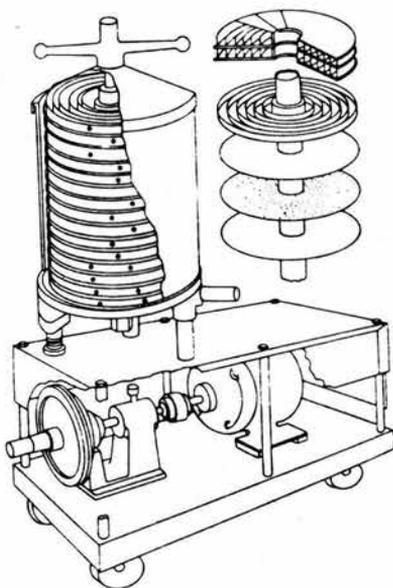


Figura 1.46. Montaje de filtro clarificador de discos y placas (Aleop Engineering Corp.).

1.5.6. Selección de Equipos de Filtración

Las características de la lechada determinan si es apropiado un filtro clarificador o de torta y, si se emplea este último, determinan la velocidad de formación y la naturaleza de la torta. Afectan la elección de la fuerza impulsora y el ciclo, así como el diseño específico de la máquina. En las tablas 1.1 y 1.2 se resumen las características de los tipos más comunes de filtros para varias clases de lechadas.

Los requisitos de lavado de la torta pueden afectar también

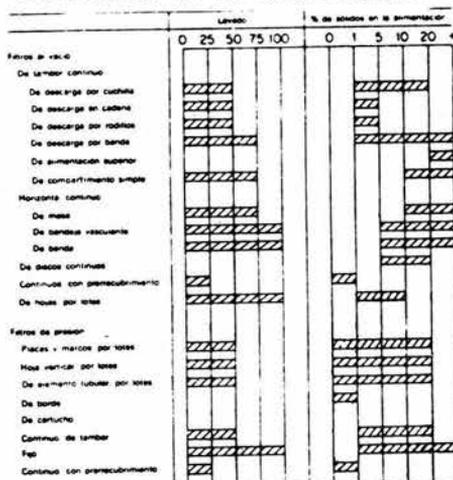
considerablemente la elección del equipo, puesto que la capacidad de lavado varía mucho con la clase de filtro de que se trate. En la tabla 1.2 se indican las eficiencias relativas de lavado de ciertos tipos de filtros. (3)

TABLA 1.1. SELECCION DE FILTROS: CARACTERISTICAS DE LA LECHADA*

	Filtración rápida	Filtración media	Filtración lenta	Diálisis	Módulo
Características de la lechada					
Velocidad de formación de torta	>20%	10-20%	0.05-0.25 pulg. min	<0.05 pulg. min	<0.1%
Concentración habitual de sólidos	Max. rápida >500	Rápida 50-500	Lenta 5-50	Lenta <5	<0.1%
Velocidad de asentamiento	>5	0.2-5	0.01-0.02	0.01-2	0.01-2
Velocidad de filtración, gal. (min) por pie					
Filtros					
Continuos al vacío					
de tambor de compartimientos múltiples	X	X	X		
de tambor de compartimiento simple	X				
Empirco	X				
de alimentación superior	X				
de placa horizontal	X	X			
de bandeja oscilante	X	X			
de placa horizontal	X	X			
de discos		X	X		
perforados				X	X
De hoja al vacío por lotes		X	X	X	X
Filtro de succión por lotes	X	X	X	X	X
Filtros de presión por lotes					
de placas y marcos		X	X	X	X
hojas verticales		X	X	X	X
tubulares		X	X	X	X
de placa horizontal	X	X	X	X	X
de fondo Ton cartucho					X
Filtros de presión continua					
tambor		X	X		
Empirco		X	X	X	
perforados				X	X

* Fuente: de Pinter y colaboradores, Chem. Eng. 78:4, 40 (1971).

TABLA 1.2. SELECCION DE FILTROS: CAPACIDAD DE LAVADO Y CONTENIDO DE SÓLIDOS DE LA ALIMENTACION*



* Adaptada de Van Note y Weems, Ind. Eng. Chem., 53, 549 (1961), con la autorización de American Chemical Society, propietaria de los derechos de autor.

1.6. INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor son los equipos en los que se transfiere calor de un fluido a otro sin contacto directo entre ellos, y sin que exista acción directa del fuego. El intercambio de calor se realiza por los mecanismos de conducción y convección, pudiendo ser esta última de tipo natural o forzada siendo la del tipo forzada la más frecuente.

La clasificación de estos equipos se realiza fundamentalmente en base a dos conceptos: su función o su forma constructiva.

1.6.1. Clasificación en base a la función que realizan

a) Refrigerantes.- Su misión es la de enfriar un fluido, y se realiza normalmente mediante agua o aire, que se calientan a una temperatura máxima fijada.

b) Condensadores.- Son equipos en los que el fluido caliente entra total o parcialmente en fase vapor y sale en fase líquida. El enfriamiento se puede realizar calentando otro fluido de proceso o bien, si la temperatura de condensación es baja, por medio de agua de refrigeración o aire, como en el caso de los refrigerantes.

c) Hervidores.- Son equipos en los que el fluido frío es calentado con el fin de producir un cambio de fase, pasando de la fase líquida a la de vapor. El calentamiento del fluido frío se realiza normalmente con vapor de agua.

d) Intercambiadores en general.- Son aquellos cuya misión es intercambiar calor de un fluido a otro sin que se produzca cambio de fase entre ellos.

1.6.2. Clasificación en base a su forma constructiva

Siguiendo este criterio, se incluyen generalmente los siguientes tipos fundamentales:

a) Intercambiador de doble tubo.- Estan constituidos por dos tubos coaxiales de forma que por dentro del tubo interior circula un fluido y por fuera de este el otro. En el caso que se sustituya el tubo interior por más de uno, se obtiene el tipo llamado "multitubos". Estos tipos son muy utilizados para satisfacer servicios en que se requiera pequeños intercambiadores de calor.

b) Serpentin.- Consiste en un tubo sumergido en el líquido contenido en un tanque o recipiente, y cuya misión es la de mantener a una determinada temperatura a este líquido, pudiendo actuar como elemento calefactor o refrigerador. Los fluidos de calentamiento o refrigeración normalmente utilizados son: vapor de agua, agua o aceites calientes y agua de refrigeración.

c) Refrigerante por aire.- Es el intercambiador cuyo fluido refrigerante es el aire.

d) Intercambiadores de placas.- Están constituidos por un paquete de placas que dejan separaciones entre ellas, trabajando de forma tal que un fluido circula entre las separaciones pares y el otro por los impares.

e) Intercambiador de haz tubular.- Es el más utilizado en la industria.

1.6.3. Intercambiadores de Haz Tubular

Las partes fundamentales son:

a) Haz tubular.- Es un cierto número de tubos unidos, por

mandrinado o soldadura, a dos placas tubulares perpendiculares a ellos y colocados de una forma regular. La soportación intermedia de estos tubos se hace mediante unas chapas perpendiculares a los mismos espaciadas regularmente y denominadas diafragmas o pantallas.

b) Carcasa.- Es el cilindro exterior que envuelve el haz tubular. En el están soldadas las silletas que soportan el intercambiador y que le apoyan sobre la cimentación.

c) Distribuidor.- Es la parte por la que entra el fluido que debe pasar por el interior de los tubos, encaminándole por los diferentes pasos de los mismos hasta que sale del intercambiador.

d) Fondo de carcasa.- Es la tapa de la carcasa por el lado contrario al que ocupa el distribuidor.

Cada uno de estos elementos básicos de los intercambiadores puede ser de diversa forma y, por tanto, la combinación de estas formas da una gran cantidad de tipos de intercambiadores. Con el fin de simplificar la definición de los intercambiadores y facilitar su construcción se ha pretendido obtener una clasificación que recoja las formas constructivas más usuales. Esta clasificación, internacionalmente reconocida, es la contemplada en la norma TEMA (Tubular Exchangers Manufacturers Association), que normaliza e indica los requisitos exigidos para la construcción correcta de los intercambiadores de calor de haz tubular.

Como se muestra en la figura 1.47, la denominación de los intercambiadores se realiza con tres letras, indicando sucesivamente cada una de ellas:

-Tipo de distribuidor.

-Tipo de carcasa.

-Tipo de fondo de carcasa o parte posterior.

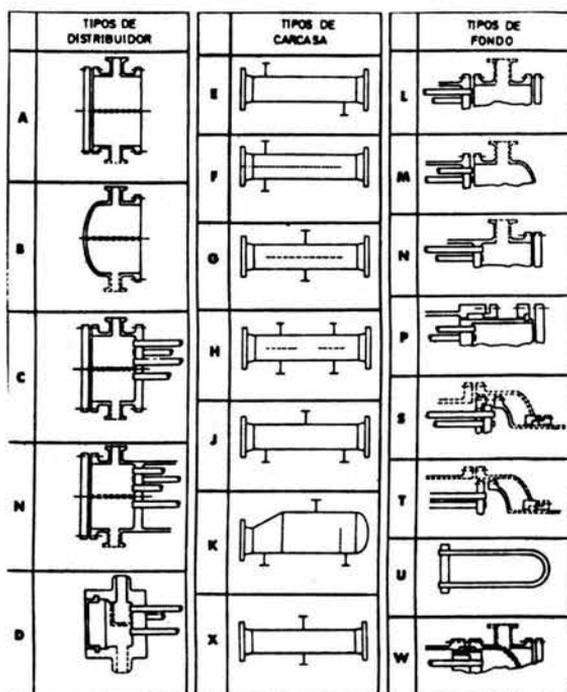


Figura 1.47. Cambiadores tipo TEMA. a) Distribuidor con tapa desmontable. b) Tapa y distribuidor en una sola pieza. c) Distribuidor con placa tubular en una sola pieza y tapa desmontable (con haz tubular extraíble). n) Distribuidor con placa tubular en una sola pieza y tapa desmontable (placa tubular fija). d) Cierre especial de alta presión. e) Carcasa de un solo paso. f) Carcasa de dos pasos con diafragma longitudinal. g) Flujo partido. h) Doble flujo partido. j) Flujo dividido. k) Hervidor (tipo Kettle). x) Flujo cruzado. l) Placa tubular fija (con distribuidor tipo "A"). m) Placa tubular fija con distribuidor tipo "B". n) Placa tubular fija (con distribuidor tipo "N"). p) Fondo flotante con prensaestopas exterior. a) Fondo flotante con anillo cierre. t) Fondo flotante tipo "Pull Through". u) Haz tubular con tubos en U. v) Placa tubular flotante empaquetada con anillos de cierre.

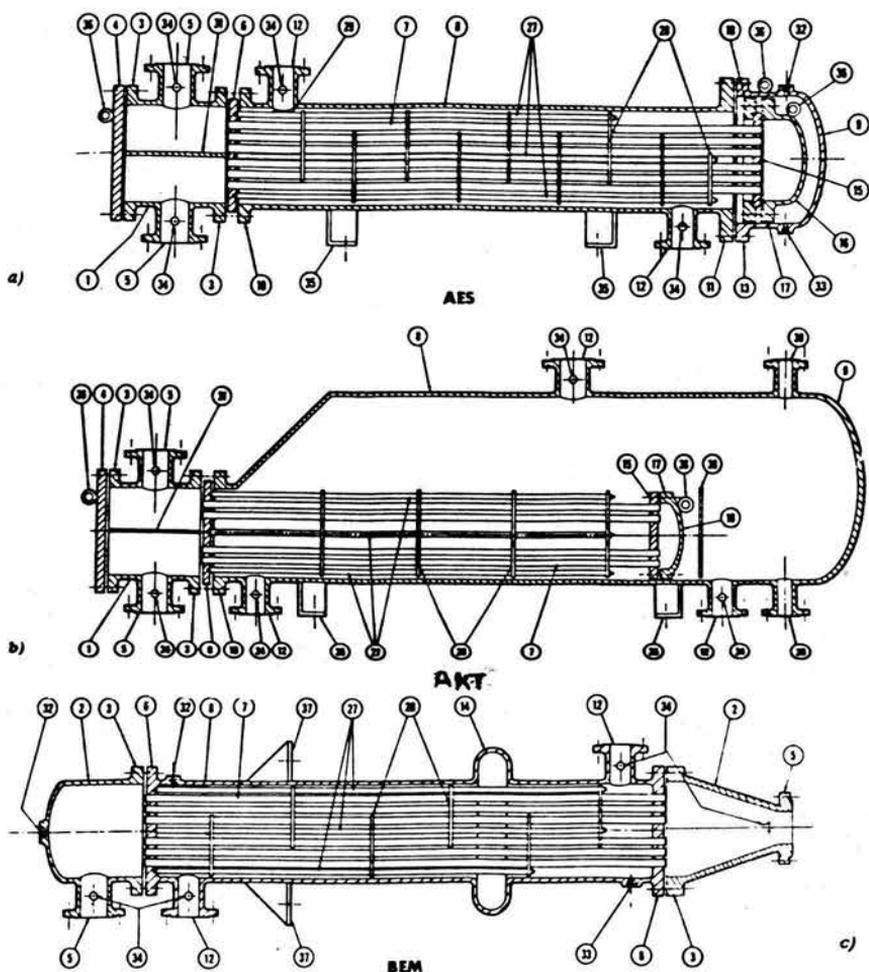


Figura 1.48. Figura seccional de intercambiadores TEMA tipos: a) AES. y b) AKT. c) BEM. 1. Distribuidor. 2. Distribuidor tipo "tapa integral". 3. Brida de distribuidor. 4. Tapa del distribuidor. 5. conexión del distribuidor. 6. Placa tubular fija. 7. Tubos. 8. Carcasa. 9. Fondo de carcasa. 10. Brida carcasa-distribuidor. 11. Brida carcasa-fondo. 12. Conexión de carcasa. 13. Brida del fondo de la carcasa. 14. Junta de expansión. 15. Placa tubular flotante. 16. Fondo del cabezal flotante. 17. Brida del cabezal flotante. 18. Contrabrida para cabezal flotante. 19. Tirantes y espaciadores. 20. Diafragmas transversales. 21. Placas de choque. 22. Placas de partición. 23. conexión para venteo. 24. Conexión para drenaje. 25. Conexión para instrumentos. 26. Sillas o apoyos del intercambiador. 27. Oreja de izado. 28. Mensulas de apoyo. 29. Placa vertedero. 30. Conexión de salida del líquido.

Con ayuda de esta clasificación e indicando las dimensiones generales del equipo, se define el intercambiador simplificado. En concreto, la definición correcta se efectúa indicando:

-Simbología tipo TEMA.

-Diámetro interior de la carcasa y longitud recta de los tubos. En caso de carcasa del tipo "K", se deberán indicar los diámetros existentes en la carcasa.

Ejemplo: Intercambiador A E S 28'' X 20 pies, siendo 28'' el diámetro interior de la carcasa y 20 pies la longitud recta de los tubos utilizados.

En la figura 1.48 se muestra como ejemplo la sección de intercambiadores TEMA tipo AES, AKT y BEM, indicando las partes más características que, a la vez, se presentan en los otros tipos de intercambiadores.

Con el fin de visualizar simplificado los tipos de intercambiadores TEMA más usuales, en la figura 1.49 se muestran los esquemas unifilares de estos intercambiadores.

A veces, cuando el servicio que debe realizar el intercambiador exige grandes caudales de fluidos o la cantidad de calor a intercambiar es muy grande, así como por otros motivos termodinámicos que es necesario instalar más de un intercambiador o cuerpo. La disposición de estos cuerpos puede ser:

a) En serie, si se desea que el caudal completo de los fluidos recorra todos los cuerpos.

b) En paralelo, si se divide el caudal en partes, de forma que cada una sólo recorra un cuerpo.

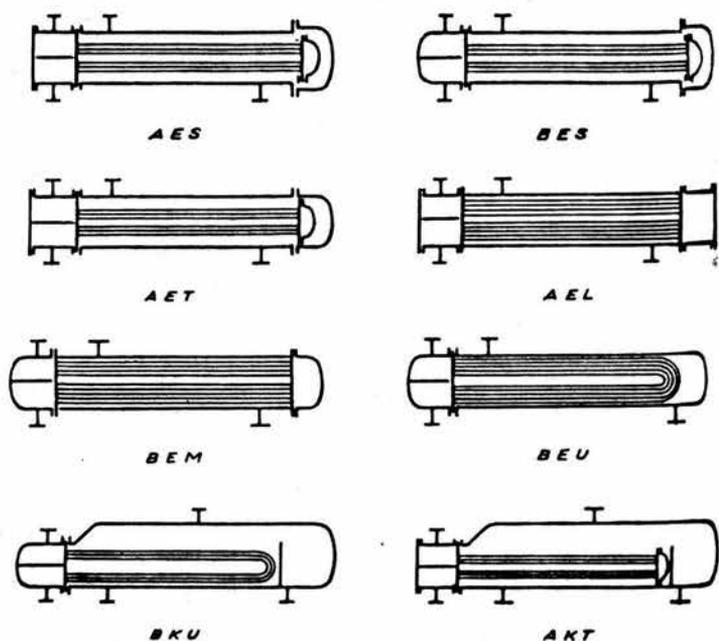


Figura 1.49. Esquemas unifilares de intercambiadores TEMA más usuales.

1.6.3.1. Descripción

El haz tubular está formado por numerosos elementos, que no es todos los intercambiadores son los mismos. Los más comunes son:

- Placas tubulares.
- Tubos.- Trazado de placas tubulares.

Los tubos en el haz están dispuestos de una forma regular, ocupando generalmente los vértices de una de las siguientes figuras geométricas (figura 1.50):

- Triángulo equilátero.
- Cuadrado o cuadrado girado 45°.

-Rombo.

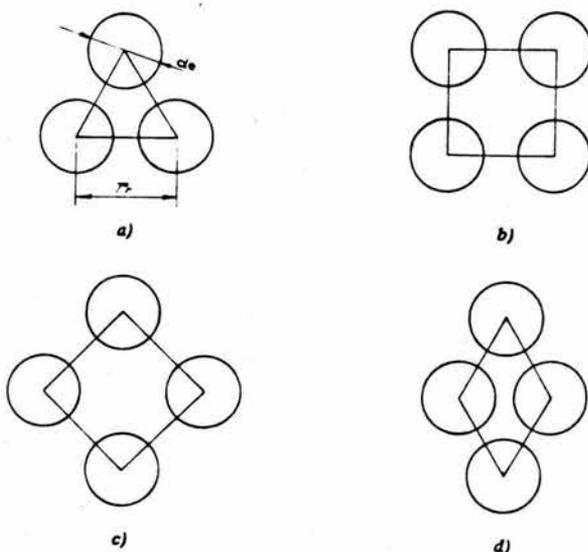


Figura 1.50. Disposición de los tubos en un intercambiador de haz tubular. a) Triangular. b) Cuadrada. c) Cuadrada girada 45° . d) Rombica.

Disposición de los tubos en un intercambiador de haz tubular. a) Triangular. b) Cuadrada. c) Cuadrada girada 45° . d) Rombica.

La disposición triangular no permite la limpieza mecánica de la superficie exterior de los tubos, pero en cambio mejora el intercambio de calor y consigue que para una misma carcasa quepan aproximadamente el 15% más de tubos que usando la disposición cuadrada, lo que abarata la inversión; esta inversión es utilizada, por tanto, en el caso en que los fluidos sean limpios o los materiales soporten la limpieza química.

Como ambos casos no son los más numerosos, la disposición triangular es menos utilizada que la cuadrada, que permite la

limpieza mecánica de los tubos por su parte exterior. La disposición rómbica es raramente utilizada en la actualidad, ya que no ofrece ventajas substanciales en relación a las otras disposiciones.

c) Unión tubo-placa tubular.- Debe:

-Impedir el paso de fluido, evitando la contaminación de un fluido con otro.

-Ser lo suficientemente fuerte como para soportar las fuerzas debidas al peso de los tubos y a la dilatación térmica.

d) Diafragmas (figura 1.51).- Son chapas circulares situadas perpendicularmente a la dirección de los tubos y atravesadas por éstos, y cuya misión es conseguir:

-Soportar los tubos, manteniéndoles a la distancia fijada por el paso a lo largo de toda la longitud del intercambiador.

-Conducir el fluido que circula por el lado de la carcasa, haciéndole recorrer el camino con recorridos transversales y longitudinales, a la vez creando una mayor turbulencia de forma que se mejore el intercambio de calor.

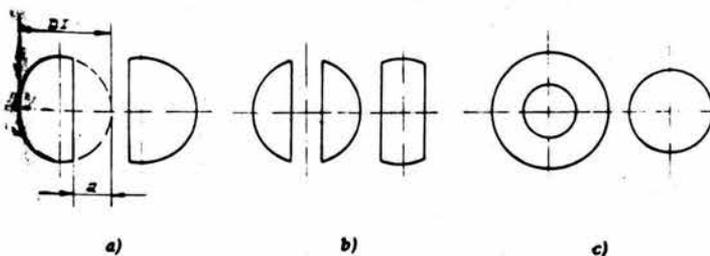


Figura 1.51. Tipos de diafragmas. a) Segmental. b) Doble segmental c) Anillo-disco.

-Segmental.- Son aquellos que tienen un sólo corte vertical u

horizontal que permite el paso del fluido situado en el lado contrario al diafragma anterior. Si el corte es vertical el fluido se desplaza de lado a lado para pasar luego por el corte o ventana del diafragma; este tipo de flujo es denominado de lado-lado. Si el corte es horizontal el fluido se desplaza de arriba a abajo del intercambiador pasando alternativamente por una ventana en la parte superior y otra en la parte inferior; a este tipo de flujo se le denomina arriba-abajo. El corte del diafragma se debe establecer de forma que la velocidad del fluido en su recorrido transversal y longitudinal sea similar, para lo cual el área de paso a través del corte (superficie cortada-superficie que ocupan los tubos que pasan por el corte) sea igual al área de paso existente entre diafragma y diafragma. El valor del corte se define como el tanto por ciento de la altura del corte con relación al diámetro del diafragma, es decir,

$$\text{corte} = a / (DI) (100)$$

De entre todos los tipos de diafragma este es el más utilizado.

-Doble segmental.- Tiene dos cortes verticales u horizontales. Es utilizado cuando la caída de presión a lo largo del intercambiador debe ser mínima en el fluido que circula por el exterior de los tubos. Este tipo de diafragma apenas produce turbulencias y los cambios de dirección son más suaves, por lo que la caída de presión es muy pequeña. También es generalmente utilizada cuando el fluido es gas. Si la caída de presión debe ser inferior a la conseguida con este tipo se puede recurrir al triple segmental.

-Anillo-disco, cuyo corte es circular, colocándose

alternativamente anillo y disco. Son raramente utilizados y sólo es posible su empleo en un intercambiador con fluido líquido, sin cambio de fase y sin que contenga gases disueltos ni sedimentos.

e) Tirantes.- Los tirantes, junto con los tubos que en ellos se insertan, realizan la misión de distanciadores de los diafragmas y son barras roscadas a la placa tubular y que recorren el intercambiador atravesando los diafragmas hasta el último, donde se le rosca una tuerca.

f) Pletinas de sellado.- Cuando entre los tubos del haz y la parte interna de la carcasa existe un espacio demasiado grande, el fluido pasará por este espacio sin intercambiar calor en los tubos. Para evitar este inconveniente se usan las pletinas de sellado, que son unas chapas longitudinales que se insertan en los diafragmas desde el primero al último de ellos, y que impiden el recorrido helicoidal del fluido que circula por el lado exterior de los tubos.

g) Placa de choque.- Es una chapa que se sitúa para proteger a la primera fila de los tubos en la de la tobera de entrada con el fin de evitar la erosión de estos tubos por el choque del fluido en la entrada. Normalmente esta chapa está soldada a dos o más distanciadores, y debe de cubrir toda la primera fila de tubos y en dirección longitudinal el diámetro de la tobera más de 100mm. El área de paso que debe quedar libre entre la carcasa y esta placa de choque debe ser como mínimo el área de la tobera, y normalmente se dimensiona de forma que esta área de paso supere el área de paso de la tobera en un 50%.

1.6.4. Refrigerantes de Aire o Aerorrefrigerantes

Antes de proceder con el estudio de los aerorrefrigerantes es conveniente definir una serie de términos que se utilizan frecuentemente:

-Haz tubular: Conjunto formado por tubos, cabezal y bastidores.

-Sección: Conjunto de uno o más haces tubulares servidos por uno o más ventiladores, con estructura, cámaras de aire y otras partes comunes.

-Unidad: Conjunto de uno o más haces tubulares dispuestos en una o más secciones con un único servicio (por ejemplo: condensador de nafta).

-Grupo: Conjunto de una o más unidades dispuestas en una estructura continua.

En la figura 1.52 se incluye una planimetría en la que se puede observar las diferencias entre estos cuatro términos enumerados.

Un aerorrefrigerante está formado, básicamente, por las siguientes partes:

-Haz tubular.

-Cámaras de aire.

-Grupo de ventilador-motor.

-Accesorios.

En la figura 1.53 se incluye el alzado esquemático de dos aerorrefrigerantes donde se muestran las partes fundamentales antes mencionadas para aerorrefrigerantes de tiro forzado y de tiro inducido.

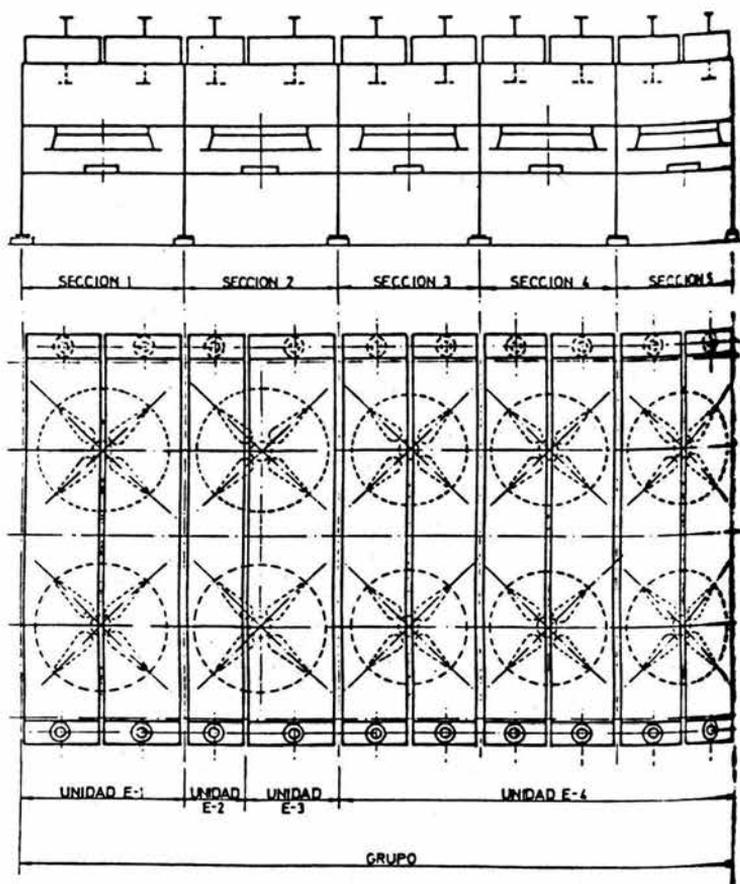


Figura 1.52. Disposición de un grupo de aerorrefrigerantes.

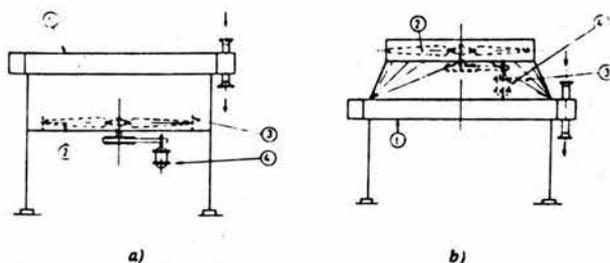


Figura 1.53. Esquema de aerorrefrigerantes. a) Tipo tiro forzado. b) Tipo tiro inducido. 1) Haz tubular. 2) Ventilador. 3) Cámara de aire. 4) Motor.

Haz Tubular

Es el conjunto formado por los tubos, cabezales y bastidor, que está situado sobre (o bajo) las cámaras de aire dependiendo de que el tiro sea forzado o inducido.

Un aerorrefrigerante de tiro forzado es aquel en el que el aire es impulsado sobre el haz tubular por los ventiladores; en este caso el haz tubular está situado sobre el conjunto ventilador-motor.

Un aerorrefrigerante de tiro inducido es aquel en el que el aire es aspirado por los ventiladores, circulando a través del haz tubular, que está situado bajo el conjunto motor-ventilador.

Dentro del haz tubular hay que distinguir los siguientes elementos básicos:

a) Tubos

Los tubos utilizados en los aerorrefrigerantes son, generalmente, aletados y formados por un tubo base de material idóneo para el fluido que circula por su interior, y unas aletas transversales, normalmente circulares, de material adecuado para su construcción.

El objeto de aletar los tubos es aumentar la superficie de intercambio para compensar que el coeficiente de intercambio por el lado aire es muy bajo. Los requisitos fundamentales que deben cumplir estos tubos aletados son:

- Contacto íntimo entre aleta y tubo, estando libre su unión de aire u óxido que dificulten la transferencia de calor.

- Indeformabilidad y rigidez de las aletas, evitando que se

doblen y junten unas con otras que imposibilitarían la pérdida de carga con el aire a través de haz, por lo que aumentaría la pérdida de carga con el consiguiente mayor consumo de energía.

- Resistencia a la corrosión de los agentes atmosféricos.

La unión tubo-aleta puede ser realizada de varias formas, y entre las más usuales están las que a continuación se indican:

1. Tubo bimetalico con aletas extruidas, consistente en un tubo encamisado con otro de aluminio (o cobre) del cual se obtienen las aletas por extrusión (figura 1.54.a). Como variante al tubo bimetalico existe el tubo monometalico, en el que las aletas provienen del mismo tubo base. Este tipo de unión garantiza un buen contacto tubo-aleta y protegen al tubo base de los agentes corrosivos de la superficie exterior. Al no existir ranuras para el encastramiento de las aletas en el tubo, permite utilizar espesores menores en el tubo base (salvo en caso de monometalico). Este tipo de aletas sólo permiten un número máximo de ocho aletas/pulgada. Mecánicamente son de una resistencia aceptable.

2. Tubo con aletas helicoidales incrustadas mecánicamente, denominado normalmente tubo con aleta "G" (figura 1.54.b). La aleta de aluminio está enrollada e incrustada en una ranura de 0.25 mm de profundidad. El espesor del tubo base, a efectos de resistencia a la presión, debe ser tomado desde el fondo de la ranura. El contacto entre tubo-aleta es bueno y no existe problema de formación de óxido entre ambas superficies que impida la correcta transferencia de calor. Mecánicamente este tipo de aletas

son suficientemente resistentes.

3. Tubo con aletas helicoidales enrolladas bajo tensión, denominado normalmente tubo con aleta "L" (figura 1.54.c). La aleta de aluminio lleva un pie en forma de "L" y se enrolla bajo tensión al tubo. El tubo base queda algo mejor protegido contra la corrosión que en el caso de aletas en "G". El contacto tubo aleta es malo, ya que la formación de óxido en el tubo y aleta lo dificulta, al igual que la posible presencia de aire entre ambos. En caso de tubos de material costoso, este tipo de aletas permite usar tubos de menor espesor, ya que no es preciso ranurar los mismos. Mecánicamente son poco resistentes, por lo que se deforman y despegan fácilmente.

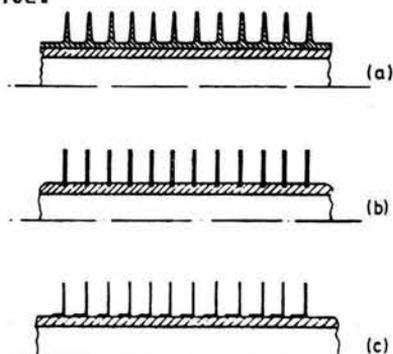


Figura 1.54. Tipos de tubos aletados. a) Bimetálicos. b) Aletas incrustadas. c) Aletas enrolladas.

b) Cabezales

Los cabezales son los elementos por donde ingresa y sale el fluido al equipo, distribuyéndolo por los diferentes pasos de tubos, siendo una de sus paredes la placa tubular. Los tipos más usuales son los que brevemente se describen a continuación:

1. **Cabezal con tapa desmontable.**- Son cajas en forma de paralelepípedo, cuya cara opuesta a la cara tubular es una tapa desmontable. Esta última tapa es bridada, lo que permite su rápido desmontaje, realizándose con mayor facilidad la limpieza mecánica de los tubos. Este tipo de cabezales es generalmente usado para servicios cuyas presiones de ejercicio no son elevadas y con fluidos muy sucios (figura 1.55.a).

2. **Cabezal soldado con tapones.**- Al igual que los anteriores, son cajas en forma de paralelepípedo, con todas sus caras soldadas y en los que la cara opuesta a la placa tubular está provista de agujeros con sus respectivos tapones, frente a cada tubo. Esta disposición permite la limpieza mecánica tubo a tubo por medio de rascador. Este tipo de cabezal es el de mayor utilización, y es recomendable para servicios de presiones medias y bajas y para todo tipo de fluidos, excepto para los que son excesivamente sucios (figura 1.55.b).

3) **Cabezales cilíndricos.**- Cuando las presiones son superiores a 130 kg/cm^2 no se deben utilizar los tipos anteriores, ya que sus paredes planas exigen grandes espesores para resistir estas presiones. Para estas condiciones se deben utilizar cabezales cilíndricos, más adecuados a las altas presiones. En estos cabezales la placa tubular es, lógicamente, un sector del cilindro (figura 1.55.c).

4. **Cabezales partidos.**- Cuando la diferencia de temperatura

entre la entrada y la salida del fluido que circula por los tubos es grande (mayor de 150°F) y el número de pasos del fluido por los tubos es mayor de uno, se producen unas sucesivas diferencias de dilataciones entre los tubos de los diferentes pasos. Para compensar estas diferentes dilataciones se instalan cabezales partidos, que permiten dichas diferentes dilataciones entre los tubos de unos pasos y otros.

El cabezal partido está compuesto de dos cajas o cabezales independientes, sirviendo el superior de entrada del fluido y distribuidor de los primeros pasos de tubos y el inferior de salida y distribuidor de los pasos últimos; la comunicación del fluido se realiza por el cabezal de retorno (o el principal si el partido es el cabezal de retorno) (figura 1.55.d).

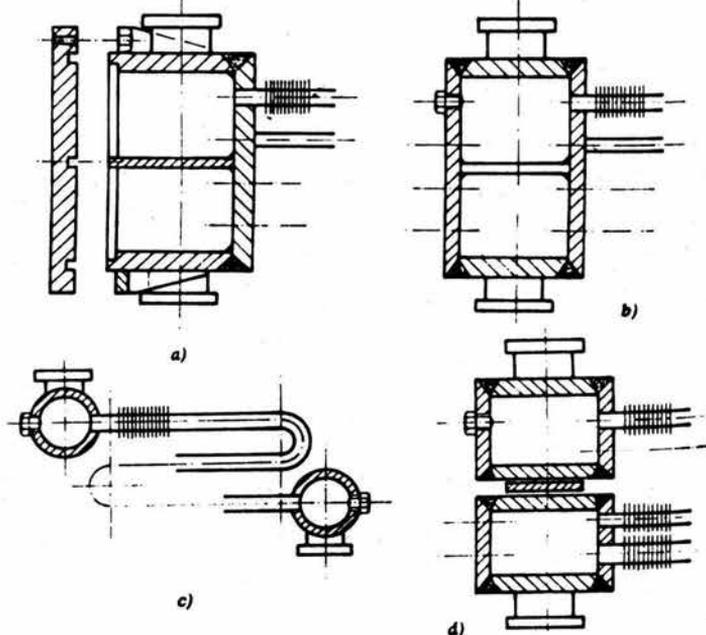


Figura 1.55. Tipos de cabezales. a) Con tapa demontable. b) Soldado con tapones. c) Cilíndrico. d) Partido.

Cámaras de Aire

La misión de las cámaras de aire es conducir el aire desde el ventilador hasta su choque con el haz tubular. Básicamente son de dos tipos: de panel y cónicas. En la figura 1.56 se representan esquemáticamente estos dos tipos en caso de tiro forzado, pero los dos mismos tipos se utilizan para el tiro inducido. En general, las cámaras de aire cónicas son más efectivas, pero su coste es más elevado que las de tipo panel, estando el uso del primer tipo más extendido; en el caso de tiro inducido el uso de cámaras cónicas es de utilización casi exclusivo.

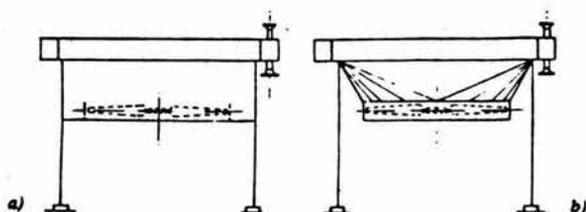


Figura 1.56. Tipo de cámaras de aire. a) Tipo de panel b) Tipo cónica.

Ventiladores

Los ventiladores utilizados son de flujo axial con 4-6 palas, que dan grandes caudales y pequeñas presiones. Las palas son, habitualmente, de resinas poliésteres reforzadas con fibra de vidrio, existiendo en el mercado también palas de aluminio y otras de aleaciones ligeras.

Los ventiladores utilizados en los aerorrefrigerantes son de dos tipos: ventilador con "regulación manual", en el que se puede variar el ángulo de ataque de las palas solamente a ventilador

parado y manualmente, y ventilador con regulación automática, o autovariable, que varía el ángulo de ataque durante la marcha por medio de una cabeza servomotora a la que llega una señal en función de la temperatura de salida del fluido.

Accesorios

- **Persianas:** son elementos que se colocan a la descarga del aire y tiene por objeto regular el caudal de aire que atraviesa el haz tubular. Son muy utilizadas en climas extremos como ayuda a la difícil regulación del caudal de aire, ya que en estos casos dicho caudal suele ser grande. Las persianas pueden instalarse de regulación manual o automática, según el procedimiento utilizado para su apertura y cierre.

- **Interruptores de vibración:** es un dispositivo que se coloca para desconectar los accionamientos de ventiladores en caso de vibraciones excesivas. Protegen a la estructura, por lo tanto, de los esfuerzos por vibraciones. Su utilización está muy extendida actualmente.

- **Serpentín de calentamiento:** cuando con la parada del aerorrefrigerante pueda quedarse fluido en los tubos, y éste solidificarse o convertirse en excesivamente viscoso, se instala un dispositivo que licúa de nuevo o rebaja la viscosidad del fluido contenido en ellos, permitiendo su bombeo normalmente. Este dispositivo consiste en una o dos filas de tubos, situadas por debajo de las normas del haz tubular, y por los que se hace

circular vapor durante una o dos horas antes de la puesta en operación con los ventiladores en funcionamiento, para que calienten los tubos de haz y funda el fluido que se encuentra en ellos. Esta fila o filas, denominadas serpentín de calentamiento, constituyen un impedimento permanente al aire, por lo que supone una mayor caída de presión y, por lo tanto, un mayor consumo de energía permanente, por lo que se debe evitar su utilización siempre que sea posible.

1.6.5. Intercambiadores de Placas

Los intercambiadores de placas están constituidos por una serie de placas corrugadas, realizadas por estampación, que se encuentran taladradas convenientemente en sus extremos con el fin de permitir o dirigir el flujo de líquido a calentar o enfriar. Los fluidos circulan entre placas, pasando uno por las separaciones pares y el otro por las impares. el hecho de ser corrugadas las placas hacen que aumente la superficie de intercambio, así como la turbulencia en los fluidos, lo que aumenta el coeficiente global de transferencia.

Estas placas se encuentran colocadas una frente a otra, formando un paquete y comprimidas, bien por varios tornillos para soportar la presión interior, según se muestra en la figura 1.57, o por un solo tornillo central, como es normal en los intercambiadores de apertura rápida que se utilizan especialmente en aplicaciones de la industria alimentaria.

Entre cada placa se instala una junta, que es la que asegura la estanqueidad y la separación necesaria entre placa y placa. Una

vez formado el paquete de placas, la disposición de los taladros dirige el paso de los líquidos. El número de pasos puede modificarse fácilmente variando la disposición de los taladros en las placas, y con ello se puede conseguir una mayor o menor caída de presión, o un menor o mayor flujo, según las placas estén conectadas en serie o en paralelo. Esta disposición de pasos no tiene que ser la misma para ambos fluidos, es decir, puede preverse que todas las placas de un fluido estén conectadas en serie y todas las de otro fluido en paralelo, con lo cual pueden obtenerse unas posibilidades de relación entre el volumen de líquido a enfriar y el volumen de líquido a calentar prácticamente ilimitadas.

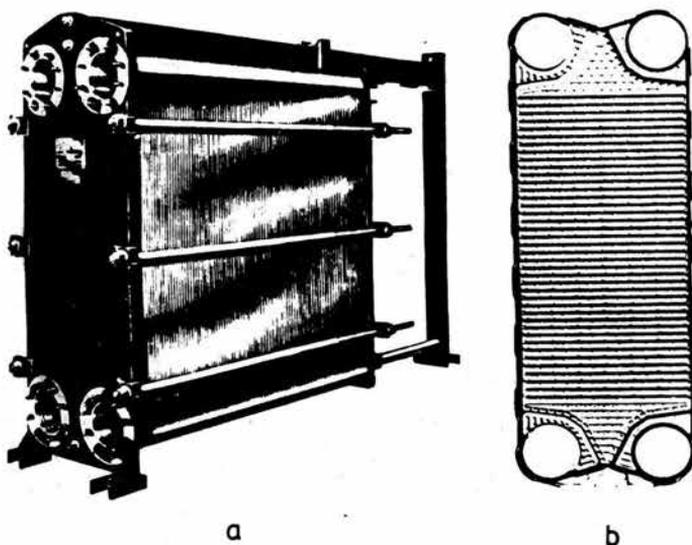


Figura 1. 57. Intercambiador de placas. a) Disposición general.
b) Placa.

Con la instalación de piezas normalizadas y combinando convenientemente las placas y sus taladros es posible obtener un intercambiador por el que circulan tres o más fluidos y con una gran flexibilidad de servicios. En la figura 1.58 se puede observar un esquema de posible ejecución utilizando la filosofía de acoplamientos enunciada. (4)

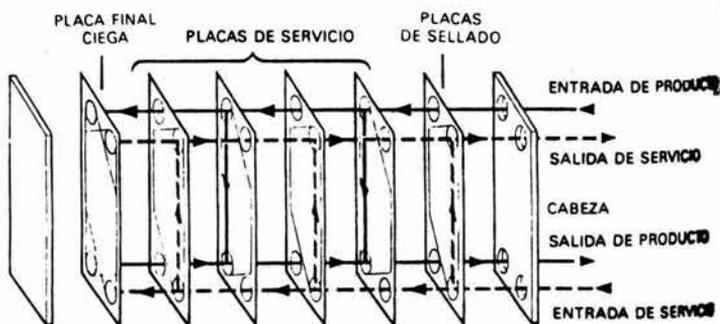


Figura 1.58. Esquema de funcionamiento de un intercambiador de placas.

1.7. EVAPORADORES

Cuando en conexión con un sistema de generar potencia se usa un evaporador para la producción de agua pura o para cualquiera de los procesos asociados con la generación de potencia, se llaman **evaporadores para plantas de fuerza**. Cuando se usa un evaporador para concentrar una solución química mediante la evaporación del solvente agua, se llama evaporador químico.

1.7.1. Evaporadores para plantas de fuerza

Uno de los principales propósitos de los evaporadores para plantas de fuerza es proveer de agua relativamente pura para la

alimentación de la caldera. Las principales características incorporadas en los evaporadores para plantas de fuerza, son, un elemento calefactor tubular, un espacio en el que las gotitas del líquido que se arrastran debido al estallido de las burbujas pueden separarse, y un medio para remover la incrustación de la parte exterior de los tubos. Tres ejemplos típicos, cada uno con sus características, se muestran en las figuras 1.59 a 1.61. En la figura 1.59 el haz de tubos se coloca al ras y el alimento se introduce en el fondo. En la figura 1.60 el haz es cilíndrico y la alimentación se introduce justamente debajo del nivel del líquido. Todos operan llenos de agua hasta la mitad, la mitad superior es el espacio en el cual las gotas de agua se separan del vapor y, asimismo, todos están equipados con separadores que regresan el líquido al evaporador debajo del nivel de trabajo del evaporador.

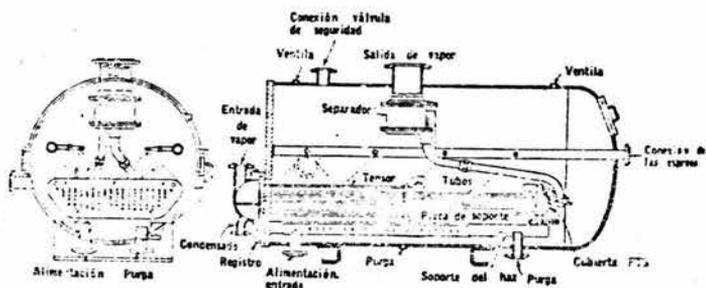


Figura 1.59. Evaporador para planta de fuerza. (The Lummus Company)

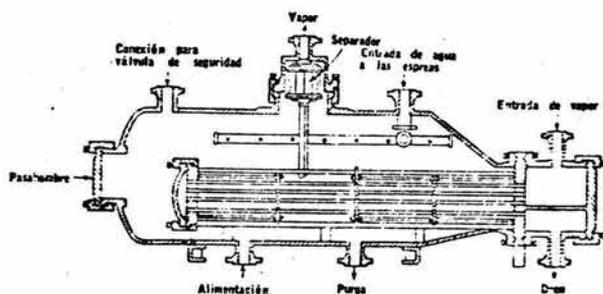


Figura 1. 60. Evaporador para planta de fuerza. (Alco Products)

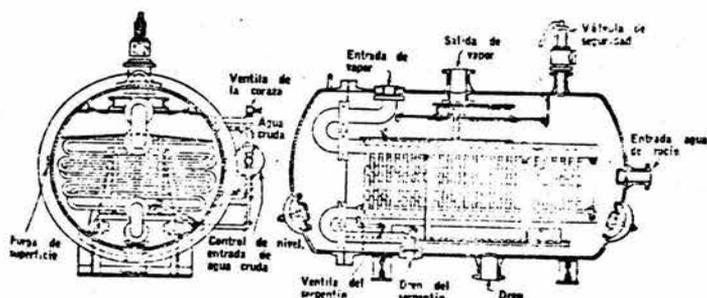


Figura 1. 61. Evaporador para planta de fuerza. (Foster Wheeler Corporation)

1.7.2. Evaporadores Químicos

Los evaporadores químicos se clasifican en dos grupos: de circulación natural y de circulación forzada. Los evaporadores de circulación natural se usan unitariamente o en efecto múltiple para los requerimientos más simples de evaporación. Los evaporadores de circulación forzada se usan para líquidos viscosos, para los que forman sales, y las soluciones que tienden a incrustarse. Los evaporadores de circulación natural se clasifican en cuatro clases principales:

1. Tubos horizontales

2. Calandria con tubos verticales

3. Tubos verticales con canasta

4. Tubos verticales largos

1.7.2.1. Evaporadores de tubos horizontales. Son los tipos más antiguos de evaporadores químicos. Aun cuando en cierto tiempo tuvieron una aceptación muy amplia, están dejando lugar a otros. Consisten en un cuerpo cilíndrico o rectangular y de haz de tubos que usualmente es de sección cuadrada. Este tipo de evaporadores no aprovechan bien las corrientes térmicas inducidas por el calentamiento, y por lo mismo, no son tan aceptables como los tipos que los han reemplazado. El evaporador horizontal es el único tipo de evaporador que emplea vapor dentro de los tubos. La principal ventaja de los evaporadores horizontales es el reducido espacio requerido para su instalación en la dimensión vertical y el arreglo del haz de tubos, de manera que el aire puede purgarse con el vapor no permitiendo que bloquee superficie de calentamiento. El evaporador horizontal es menos satisfactorio para líquidos que formen incrustaciones o que depositen sales; los depósitos se forman en el exterior de los tubos, y son, por lo tanto, usados únicamente para problemas de concentración relativamente simples, en lugar de la preparación de un líquido para una cristalización posterior. Están indicados para procesos en los que el producto final es un líquido en lugar de un sólido, tal como jarabes de azúcar industriales, donde el gran volumen de líquido almacenado en el evaporador puede permitir un ajuste preciso de la densidad final cambiando la cantidad retenida en el

evaporador. La longitud de los tubos está determinada por el tamaño del evaporador. Debido a que la evaporación tiene lugar fuera de los tubos, eliminándose el problema de incrustación dentro de los mismos, el evaporador de tubo horizontal usa diámetros de tubos menores que cualquier otro, de 3/4 a 1 1/4 plg DE.

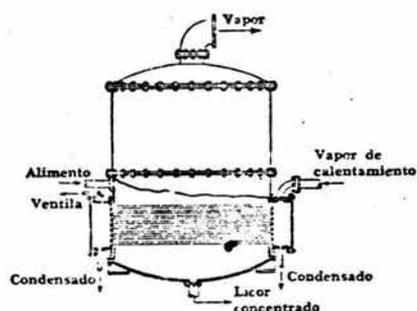


Figura 1.62. Evaporador de tubos horizontales. (Svenson Evaporator Company)

1.7.2.2. Evaporadores de calandria. El evaporador de calandria se muestra en la figura 1.63. Consiste en un haz de tubos vertical, corto, usualmente de no más de 6'0" de altura, colocado

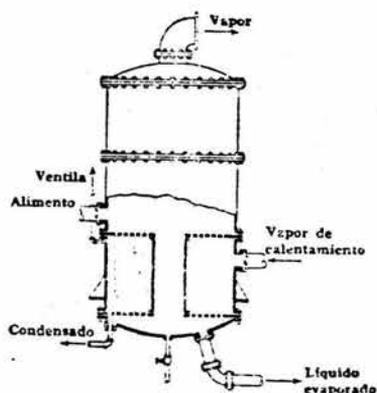


Figura 1.63. Evaporador de calandria. (Svenson Evaporator Company)

entre dos espejos que se remachan en la bridas del cuerpo del evaporador. El vapor fluye por fuera de los tubos en la calandria, y hay un gran paso circular de derrame en el centro del haz de tubos donde el líquido más frío recircula hacia la parte inferior de los tubos. El área de este derrame varía desde la mitad del área de los tubos hasta una área igual a ella. Los tubos son grandes, hasta de 3 plg DE, para reducir la caída de presión y permitir una rápida circulación, y se instalan en espejos encasquillados. La distribución de una calandria típica se muestra en la figura 1.64. Uno de los problemas es colocar deflectores en el espacio vapor, de manera que haya una distribución relativamente completa del vapor en los tubos. Otro problema es el de proveer de puntos de purga adecuados para que no se formen bolsas de gases no condensables. El condensado se remueve en

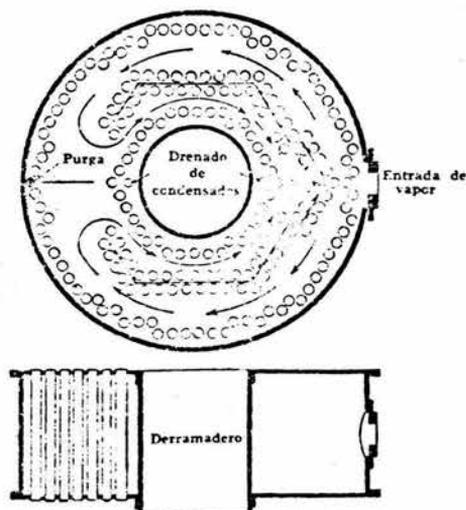


Figura 1.64. Colocación típica de los deflectores en una calandria. Las flechas indican la dirección del flujo. Las áreas sombreadas indican la colocación de las purgas de no-condensables.

cualquier punto conveniente. El espacio sobre el nivel del líquido en la calandria, sirve primariamente para liberar el líquido que es arrastrado por el vapor. Un accesorio común a todos los evaporadores es una trampa que está instalada en la línea de vapor con el propósito de remover el líquido arrastrado y de devolverlo al cuerpo del líquido. En las figuras 1.65a y b se muestran dos de estas trampas que son típicas. Su principio de operación es la eliminación centrífuga de las gotitas de líquido.

Los evaporadores de calandria son tan comunes que a menudo se les llama evaporadores estándar. Puesto que la incrustación ocurre dentro de los tubos, es posible emplear el evaporador estándar para servicios más rigurosos que el evaporador de tubos horizontales, y además, puede instalarse un agitador en el fondo cónico o abombado para aumentar la circulación.

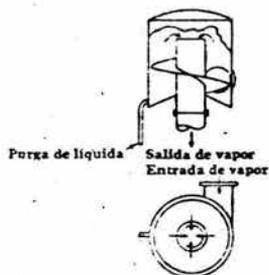


Figura 1.65. a. Trampa con salida inferior

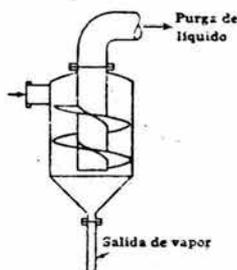


Figura 1.65. b. Trampa con salida superior

1.7.2.3. Evaporador de canasta. Un evaporador de canasta se muestra en la figura 1.66. Es similar el evaporador de calandria, excepto en que tiene el haz de tubos desmontable, lo que permite una limpieza rápida. El haz de tubos se soporta sobre ménsulas interiores, y el derramadero está situado entre el haz de tubos y

el cuerpo del evaporador, en lugar de en la parte central. Debido a que los espejos están soportados libremente, el problema de la expansión diferencial entre los tubos y el cuerpo vapor no es importante. Este tipo frecuentemente se diseña con fondo cónico y se le puede instalar un agitador para aumentar la circulación. Como resultado de estas ventajas mecánicas, el evaporador de canasta puede usarse para licores con tendencia a incrustar, aun cuando se recomienda para líquidos con altas viscosidades o muy incrustantes. La selección de evaporadores de canasta o de calandria sigue usualmente la política establecida de diferentes industrias, en las que son usados después de muchos años de experiencia con modificaciones sugeridas por los fabricantes.

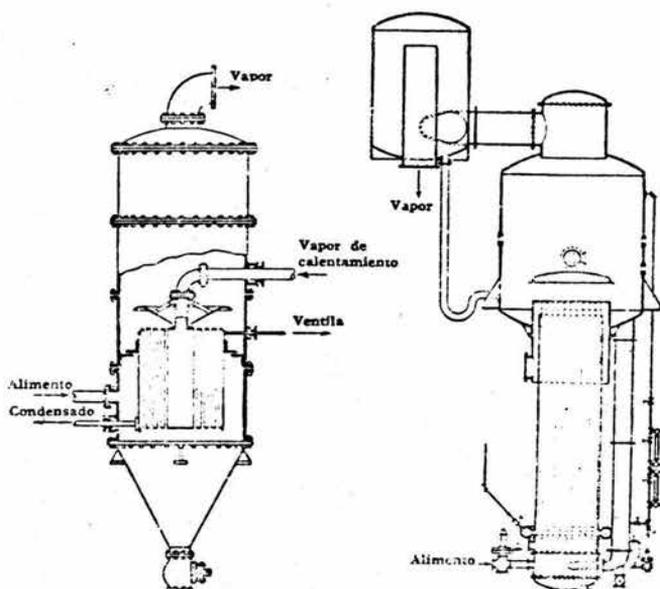


Figura 1.66. Evaporador de canasta.
(Svenson Evaporator company)

Figura 1.67. Evaporador de
tubos verticales largos.
(General American
Transportation Company)

Algunos fabricantes tienen preferencia por un tipo para cierta aplicación, mientras que otro preferirá el segundo tipo para el mismo servicio.

1.7.2.4. Evaporadores de tubos verticales largos. Un evaporador de tubos verticales largos, se muestra en la figura 1.67. Está formado por un elemento calefactor tubular diseñado para el paso de los licores a través de los tubos sólo una vez, movidos por circulación natural. El vapor entra a través del cinturón y el haz de tubos tiene deflectores de manera de lograr un movimiento libre del vapor, condensados y no condensados hacia abajo. El espejo superior de los tubos está libre, y justamente sobre él hay un deflector de vapor para reducir el arrastre. Este tipo de evaporador no es especialmente adaptable a los licores incrustantes o que depositan sales, pero es excelente para el manejo de líquidos espumosos o que forman natas. La velocidad del vapor que sale de los tubos es mayor que en los tipos de tubos verticales cortos. Cuando se dispone para recirculación, el aparato es como se muestra en la figura 1.68. Los tubos son usualmente de 1 1/4 plg a 2 plg DE, y de 12 a 14 pies de longitud. En este tipo la liberación de los vapores ocurre fuera del cuerpo del evaporador.

1.7.2.5. Evaporadores de circulación forzada. Los evaporadores de circulación forzada se fabrican en gran variedad de arreglos, como se indica en las figuras 1.69 a 1.71. Los evaporadores de circulación forzada pueden no ser tan económicos en operación como

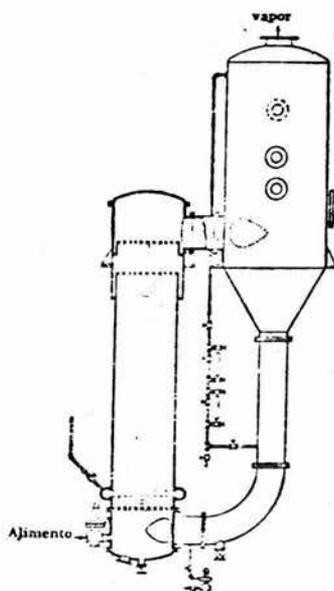


Figura 1.68. Evaporador de tubos largos con recirculación. (General American Transportation Company)

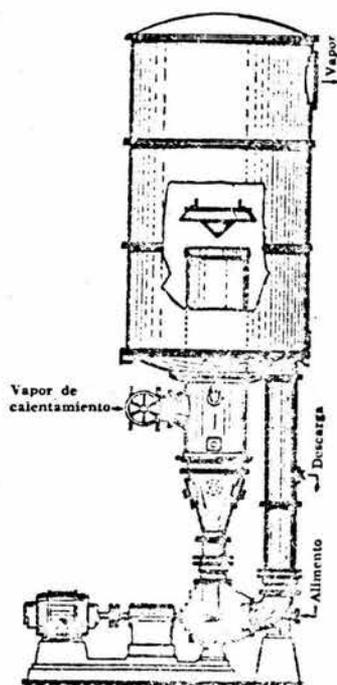


Figura 1.69. Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor vertical (Svenson Evaporator Company)

los evaporadores de circulación natural, pero son necesarios cuando los problemas de concentración involucran soluciones de flujo pobre, incrustantes, y ciertas características térmicas. Puesto que el grupo de Grashof ($D^3 \rho^2 g \beta \Delta t / \mu^2$) varía inversamente con el cuadrado de la viscosidad, hay un límite de viscosidades de soluciones que recirculan naturalmente. Con materiales muy viscosos no hay otra alternativa sino la de usar este tipo de evaporador. También, donde hay una tendencia a la formación de

incrustaciones o al depósito de sales, las altas velocidades que se obtienen por el uso de las bombas de recirculación, son los únicos medios de prevenir la formación de depósitos excesivos. Los evaporadores de circulación forzada están bien adaptados para un control preciso del flujo, particularmente cuando un tiempo de contacto excesivo puede ser perjudicial a la solución química. Los tubos para los evaporadores de circulación forzada, son más pequeños que en los tipos de circulación natural, y generalmente no exceden a las 2 plg DE.

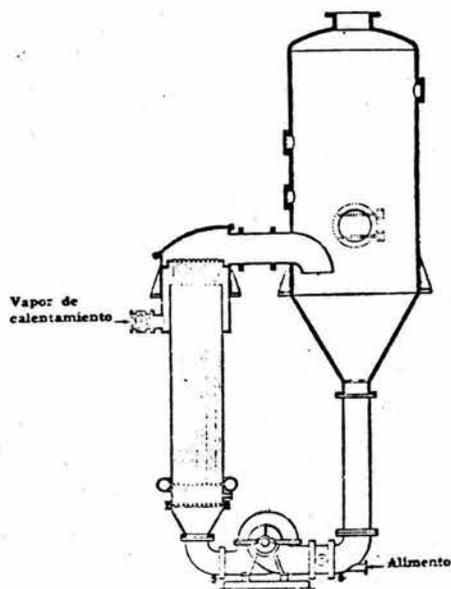


Figura 1.70. Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor externo. (General American Transportation Corporation).

En la figura 1.67 el vapor de calentamiento entra al haz de tubos por la parte exterior del cuerpo del evaporador, y tiene

contacto con los tubos en la parte superior del haz en el espacio anular provisto para este fin. En la parte superior del espejo se coloca un deflector, y la bomba de recirculación se instala al nivel del piso. En la figura 1.70 se logra el mismo efecto mediante un haz de tubos externo, lo que simplifica la construcción pero no lo hace tan compacto. La figura 1.71 es una variación de este modelo con sistema calefactor horizontal que se aplica particularmente en alturas reducidas. (5)

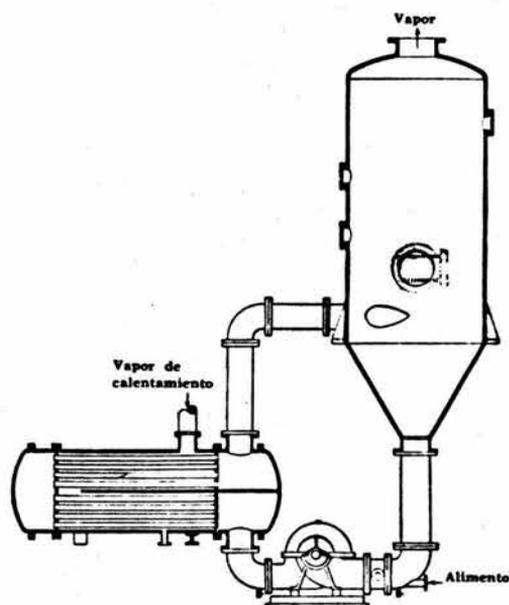


Figura 1.71. Evaporador de circulación forzada con elemento calefactor externo horizontal. (General American Transportation Corporation)

1.7.3. Estándares y Códigos

Una variedad de estándares y códigos se pueden aplicar para el diseño, construcción y evaluación de los evaporadores. (6)

Componentes estándares y códigos

Partes a presión	ASME Sección VIII, Div. 1
Materiales de construcción	ASTM
Toberas, juntas o tuercas	ANSI
Superficies de transferencia de calor	TEMA
Tubos o placas de transferencia de calor	Estándares de fabricantes
Procedimientos para evaluar los evaporadores	AICHE, procedimientos para evaluar equipos, 2n. ed., 1978

1.8. CALDERAS

Las calderas son aparatos tubulares calentados directamente, que por principio convierten la energía del combustible en calor latente de vaporización.

Calderas generadoras de vapor. Hay dos tipos generales de calderas generadoras de vapor. La caldera de tubos de humo y la caldera de tubos de agua. El primer tipo consiste de recipientes cilíndricos que tienen tubos que pasan a lo largo de ellos y que se rolan a los cabezales del recipiente. El haz de tubos, generalmente es horizontal, y la parte superior del recipiente no tiene tubos. Los gases de combustión pasan a través de los tubos y en el recipiente se mantiene cierto nivel de agua para tener los tubos completamente sumergidos en ella, pero al mismo tiempo se dispone de espacio para permitir la separación del vapor y las

gotas de agua. Cuando se usan tubos verticales en calderas de este tipo, los tubos deben sumergirse en agua hasta una altura suficiente para reducir la temperatura de los gases suficientemente y evitar un sobrecalentamiento de la parte superior de los tubos que no está enfriada por el agua. Algunas de las partes enfriadas por agua, tales como la coraza o los espejos, pueden sujetarse a radiación de los gases de combustión, puesto que estas partes son una porción de la cámara de combustión. El principal mecanismo de la transferencia de calor de los gases de combustión a los tubos es convección. Las calderas de tubos de humo raras veces exceden a los 8 pies en diámetro, y la presión de vapor generalmente se limita de 100 a 150 lb/plg²g. Las calderas de tubos de humo se usan para demandas de baja capacidad, generalmente de 15 000 a 20 000 lb/h de vapor para uso industrial, doméstico y de proceso y para generación de potencia en pequeña escala como en las locomotoras, etc. Como combustibles pueden emplearse carbón, petróleo o gas, y en algunos casos, combustibles tales como, la madera, lodos secos, etc.

Las calderas de tubos de agua, como lo indica su nombre, tienen agua dentro de los tubos. La combustión en el "stoker" o carbón pulverizado y coque, o gas o petróleo, proveen la radiación para los tubos, además de transferencia de calor que se efectúa mediante arreglo del flujo de gases calientes para lograr transferencia de calor por convección. Hay tres clasificaciones importantes de calderas de tubos de agua: tambor longitudinal, tambor cruzado con tubos rectos, y tambor cruzado con tubos encorvados. El último es el más importante de los tres.

La figura 1.72 muestra una caldera típica de baja presión diseñada para generar 200 000 lb/h de vapor a 235 lb/plg²g y 500°F. Puesto que la temperatura de saturación a esta presión es únicamente de 401°F, se requieren 99°F de sobrecalentamiento. Debido a que la carga total de sobrecalentamiento es solamente alrededor de 5% de la carga total de la caldera, sólo se hace necesario un sobrecalentador pequeño. Los tubos radiantes de la caldera cubren toda la pared y techo formando una "pared de agua" mediante la cual la temperatura de la pared del refractario se mantiene baja disminuyendo su mantenimiento. A menudo los tubos de agua están incrustados parcialmente en las paredes. La sección radiante de las paredes a veces se protege de sobrecalentamiento circulando aire frío por la parte exterior. En la caldera mostrada, el agua se alimenta por gravedad de los tambores superiores a los calentadores en el fondo de la pared de agua en los cuatro lados. La circulación es hacia arriba a través de estos tubos, y el vapor se separa del agua en los tambores superiores pasando después a través de un separador de vapor antes de sobrecalentarse. En las calderas de baja presión, los tubos de convección reducen la temperatura de los gases de combustión lo suficiente para que éstos pasen directamente al precalentador de aire evitándose la necesidad de un economizador (precalentador de agua de alimentación). Estos tubos de convección son los tubos curvados que van de los tambores superiores a los inferiores. La circulación en estos tubos es, en general, hacia abajo en el banco izquierdo (enfriador) y hacia arriba en el banco caliente.

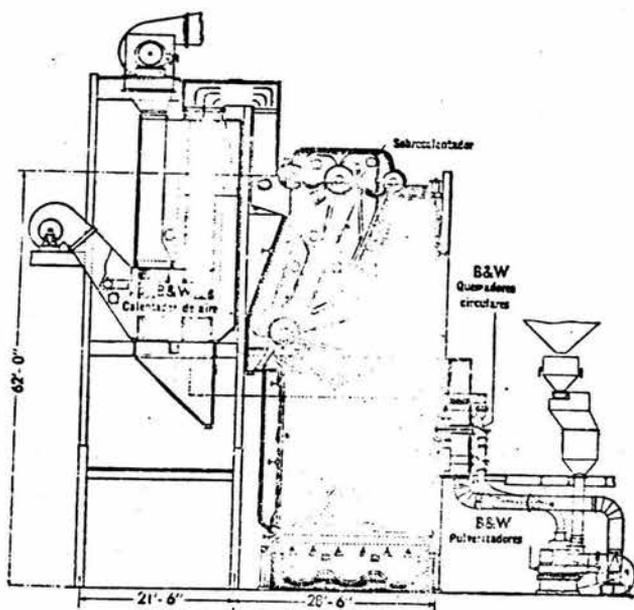


Figura 1.72. Caldera de baja presión para quemar carbón pulverizado (Babcock Wilcox Company)

En la figura 1.73 se muestra una caldera generadora de vapor para planta de fuerza. Tiene una capacidad de 450 000 lb/h de vapor a 900 lb/plg² y 875 °F. Puesto que la temperatura de saturación a 900 lb/plg² es 532 °F, se requiere un grado considerable de sobrecalentamiento. Entre la caldera radiante y el sobrecalentador sólo se puede poner una superficie de convección muy pequeña ya que los gases de combustión a alta temperatura, deben usarse para alcanzar la temperatura de sobrecalentamiento requerida con una superficie razonable en el sobrecalentador. Puesto que el agua de alimentación debe tenerse esencialmente a la temperatura de saturación antes de ser admitida en los tambores, se absorbe considerable cantidad de calor en la sección del

economizador en donde se precalienta el agua, y la eficiencia térmica de la unidad se incrementa un poco más precalentando el aire de combustión con los gases antes de que éstos pasen a la chimenea.

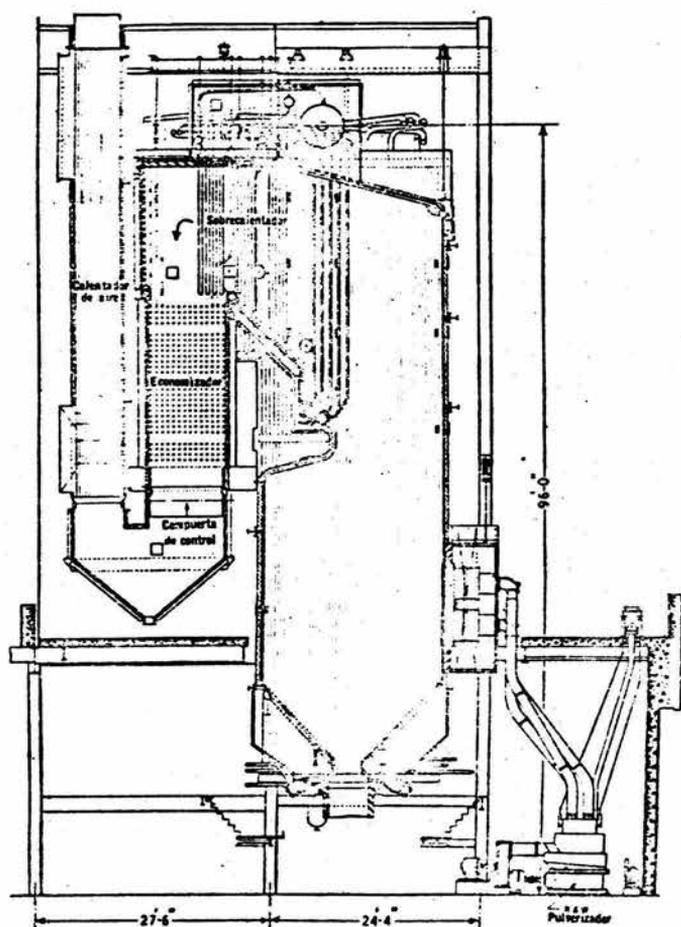


Figura 1.79. Caldera radiante para generación de potencia, para quemar carbon pulverizado. (Babcock Wilcox Company)

Para la construcción de calderas se aplica el Código ASME,

Sección 1.

Se requieren cuatro datos para especificar una caldera:

1. Los límites dimensionales del horno.

El criterio principal en dimensionar el horno es el de tratar de reducir al mínimo absorciones fuertes locales de calor y aumentar al máximo las distancias entre quemadores y a las paredes del horno.

2. Temperatura de salida de los gases.

3. Superficie de calefacción.

4. Sopladores de hollín.

1.9. HORNOS

Hornos para la industria petrolera. En las operaciones de destilación atmosférica y al vacío de crudos, "cracking térmico", y los modernos procesos de gas a alta temperatura, los hornos tubulares de calentamiento directo son factor primario en las unidades de refinación. Los hornos se usan ampliamente en operaciones de calentamiento, tratamiento y vaporización. En las refinerías se requieren hornos para manejar fluidos a temperaturas hasta de 1 500 °F y combinaciones tan severas como temperaturas de 1 100 °F y 1 600 lb/plg²g.

En hornos se usa como combustible exclusivamente petróleo o gas, aunque en un futuro próximo pueden desarrollarse para quemar subproductos del petróleo como de coque.

Los hornos de las refinerías usualmente contienen superficie radiante y de transferencia de calor por convección. Ocasionalmente para los hornos de baja capacidad se emplea

solamente superficie radiante y sus capacidades ordinarias llegan a los 5 000 000 de Btu/h. Los precalentadores de aire casi no han sido usados debido a la relativa falta de importancia de la economía de combustible; sin embargo, aun con combustibles de precio moderado, generalmente se puede demostrar que son económicos.

En la figura 1.74 se muestra un horno de tipo caja calentado por la parte inferior de la sección radiante. Los hornos de este tipo pueden tener capacidades que varían de 25 a 100 millones de Btu/h. Los tubos radiantes cubren las paredes laterales, techo, y sección del puente (porción entre las secciones radiantes y de convección). El petróleo se precalienta en la parte inferior e hileras superiores del banco de convección, pasando luego a los tubos radiantes. Después de alcanzar una temperatura elevada (900 a 1 000°F) se pasa a través de un gran número de tubos de la sección de convección donde se mantiene a alta temperatura por tiempo suficiente para efectuar el grado deseado de cracking. Estos tubos de convección se llaman sección de empape. El tipo particular de horno de la figura 1.74 emplea recirculación de los gases de combustión, lo que sirve para aumentar la capacidad de la sección de convección y reduce la carga de la sección radiante. La cantidad de gases de combustión recirculados se controla por dos factores, (1) limitación del flujo de calor de la sección radiante para prevenir sobrecalentamientos en los tubos y depósitos de coque dentro dentro de ellos, (2) controlar el gradiente de temperatura en la sección de empape. Entre más constante se mantenga la temperatura del petróleo para cierta temperatura de

salida del horno, mayor será el "factor de empape" y el cracking correspondiente. Esto supone, por supuesto, que la temperatura de salida es la temperatura más alta del petróleo. El calor de la reacción endotérmica del cracking puede resultar en una condición en la que la temperatura del petróleo disminuya de la entrada a la salida de la sección de empape. Una disminución de la temperatura es indeseable, particularmente en el cracking en fase vapor, ya que los polímeros que forman en la fase vapor, pueden condensar en las paredes del tubo y crackizarse luego para producir coque.

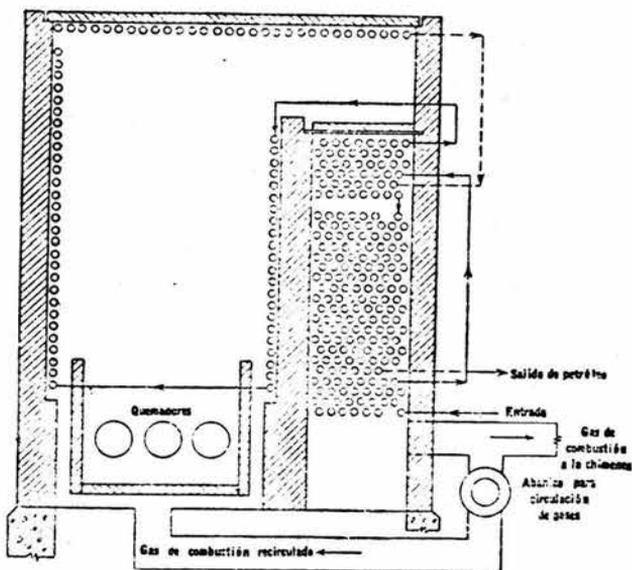


Figura 1.74. Horno tipo caja (Lobo and Evans, Transacciones AICHE)

La figura 1.75 muestra el horno tipo De Florez que tiene sección transversal circular y emplea tubos verticales. Todos los tubos radiantes están equidistantes de los quemadores, asegurando

una buena distribución circunferencial del calor, pero el flujo de calor puede variar considerablemente de la parte inferior de los tubos a la superior. Este horno se enciende por la parte inferior y tiene tan poca superficie de convección que para mejorar la eficiencia térmica se emplea precalentador de aire.

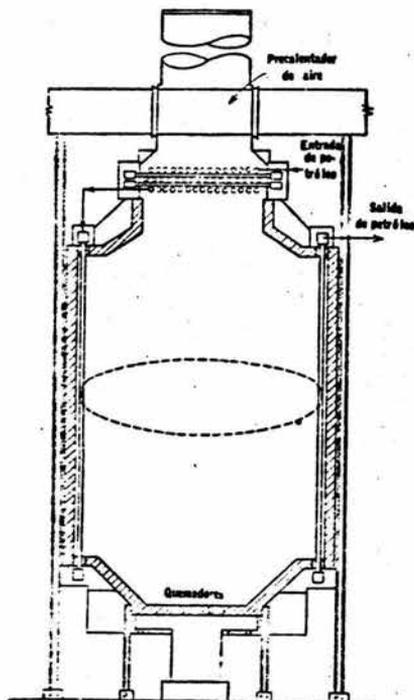


Figura 1.75. Horno circular De Flores. (Lobo Evans, Transacciones AIChE)

La figura 1.76 muestra un horno tipo caja de sección radiante doble. Los tubos de la sección de convección y los de una sección radiante se emplean para un solo servicio, mientras que la otra sección radiante se controla independientemente para efectuar otro servicio. La figura 1.77 muestra un horno con banco de convección

superior y del tipo de caja, la chimenea está localizada en la parte superior del banco de convección. Una de este tipo permite ahorros en la obra del ducto y chimenea para gases de combustión en comparación con los arreglos de flujo de "tiro invertido" que

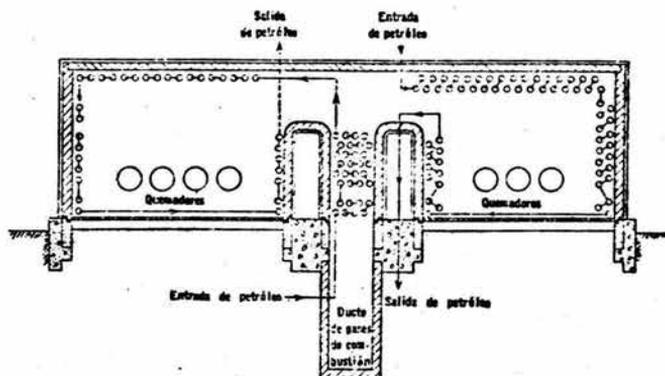


Figura 1.76. Horno tipo caja de sección radiante doble. (Lobo and Evans, Transactions AICHE)

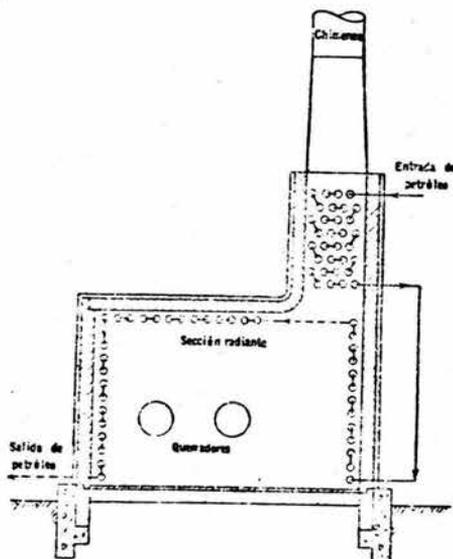


Figura 1.77. Horno simple con banco de convección superior. (M. W. Kellogg Co.)

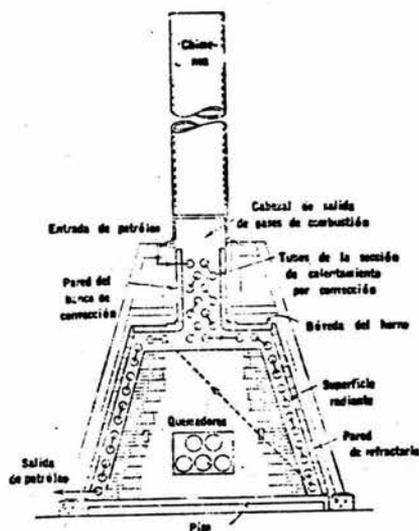


Figura 1.78. Horno tipo "A" para calentamiento de petróleo. (M. W. Kellogg Co.)

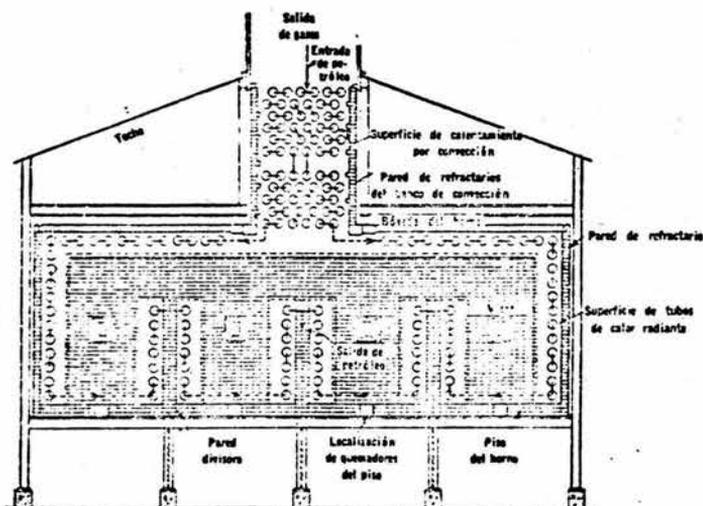


Figura 1.79. Horno para calentamiento de petróleo con banco de convección superior provisto con secciones radiantes de encendido independiente. (M. W. Kellogg Co.)

tienen los bancos de convección en las figuras 1.74 y 1.76. La figura 1.78 muestra un horno algo similar al anterior, que emplea esqueleto tipo "A" en su construcción, utilizando acero estructural rígido para reducir los costos de construcción.

La figura 1.79 presenta un horno moderno de sección radiante múltiple. El banco de convección se usa para calentar dos corrientes de petróleo separadas. Cada una de estas corrientes se calienta idénticamente en una de las secciones exteriores radiantes "calentadoras", y se les permite empaparse en una de las secciones de radiación "empapadora". Los empapadores radiantes se prefieren a los de convección debido a que pueden ser controlados mejor en cuanto al calor que se suministra. Además, puesto que los tubos pueden verse durante la operación, cualquier deformación en ellos puede notarse evitándose fallas en los tubos con el consiguiente incendio. El encendido del horno en su piso permite el uso de gran número de pequeños quemadores distribuidos a lo largo de la longitud de los tubos, asegurando una distribución uniforme de flujo térmico. Los pequeños quemadores pueden localizarse cerca de la pared o de los tubos en la bóveda, sin peligro de que la flama de los quemadores golpee directamente en los tubos. Como resultado, las dimensiones de la sección transversal de este horno pueden reducirse y los tubos pueden ser más largos que un horno que se calienta por la parte inferior de la pared con quemadores grandes. Además, se puede lograr un ahorro considerable de tubos doblados expresos o "cabezales" que por lo general son caros. (7)

1.10. TORRES DE ENFRIAMIENTO

Una torre de enfriamiento es una instalación destinada a enfriar el agua caliente procedente del enfriamiento de un proceso con aire, circulando en flujo a contracorriente o cruzado, ambos fluidos moviéndose a través de un relleno y produciéndose una transferencia de masa y calor.

1.10.1. Clasificación de las Torres de Enfriamiento

1.10.1.1. De tiro natural.

1.10.1.2. De tiro mecánico:

-Forzado.

-Inducido.

1.10.1.3. De tiro mixto.

1.10.1.1. Las torres de tiro natural están constituidas por una gran chimenea cuya misión es inducir el tiro a través del relleno. Son torres de bajo costo de mantenimiento, pero de elevado costo de implantación. La corriente de aire se establece por tiro natural, pues la diferencia de temperatura entre el aire en las condiciones atmosféricas y en las condiciones de salida de la envolvente hiperbólica de la torre, crea una diferencia de densidades que induce una corriente de aire a través del sistema. Las torres de tiro natural, aunque más caras en costo inicial que las de tiro inducido, tienen la ventaja de requerir menos consumo y muy poco mantenimiento. Estas torres se utilizan para enfriar grandes volúmenes de agua, que llegan a los 100 000 m³/h y aún superiores. Debido a la altura de estas torres se consigue una

mejor dispersión de la nube de vapor, ventaja que se traduce en menor formación de nieblas localizadas.

1.10.1.2. Las torres de tiro mecánico son aquellas que fuerzan al aire a pasar a través del relleno; el aire debe ser forzado por ventiladores desde abajo (tiro forzado) o aspirado desde arriba (tiro inducido). Estas torres permiten una mayor carga de agua, rellenos más compactos y, por tanto, torres más pequeñas, a la vez que se puede lograr una mayor aproximación a la temperatura húmeda, pero con el inconveniente de mayores costos de mantenimiento y mayor peligro de averías. Las torres de tiro forzado son más ligeras, al no tener que soportar el peso de los equipos mecánicos, pero al encontrarse en sobre presión las pérdidas de agua son más probables. Las de tiro inducido son más empleadas para grandes caudales, ya que al ser de mayor tamaño, el peso de los equipos de aspiración representa un menor problema.

- En las torres de tiro forzado el agua escurre a través del relleno en contracorriente con el aire. Este tipo de torre se usa para pequeñas instalaciones o en casos muy específicos; ya que los vapores que se descargan a la atmósfera tienden a recircular hacia la aspiración de los ventiladores, pudiendo reducir el rendimiento de la torre hasta un 20% y producir además, en climas fríos, depósito de hielo en los equipos mecánicos.

- En las torres de tiro inducido el sentido de las corrientes aire-agua puede ser cruzado o en contra corriente. En el primer

caso se produce una corriente horizontal de aire inducido sobre una cámara de succión que actúa de "pletum". En el segundo caso el aire hace un recorrido vertical ascendente, en contracorriente con el agua que cae desde arriba. comparando las torres de tiro inducido cruzado con las de tiro inducido en contracorriente, las primeras tienen un menor rendimiento térmico, pero presenta la ventaja de menor resistencia a través del relleno, lo que permite velocidades de aire superiores y en general menor potencia y estructuras más bajas.

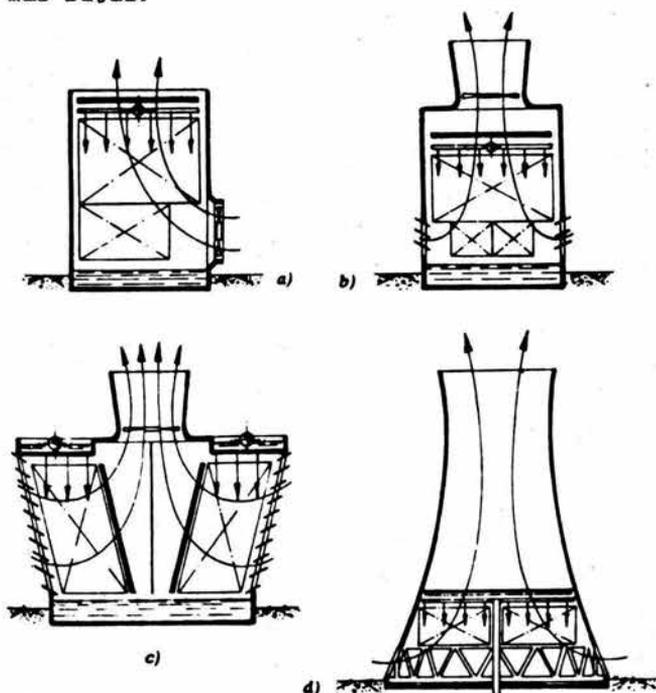


Figura 1.80. Esquema de funcionamiento de los diferentes tipos de torres de acuerdo con el sistema de tiro. a) Tiro forzado. b) Tiro inducido en contracorriente. c) Tiro inducido cruzado. d) Tiro natural.

De acuerdo al caudal de agua a enfriar, el campo normal de

utilización de los diferentes tipos de torres es:

- Tiro natural: de 10 000 a 100 000 m³/h.
- Tiro inducido: de 10 a 50 000 m³/h.
- Tiro forzado axial: de 10 a 10 000 m³/h.
- Tiro forzado centrífugo: de 10 a 600 m³/h.

1.10.2. Partes Constituyentes de una Torre de Enfriamiento.

Los elementos base de una torre se pueden concretar en:

- A) Estructura.- Es el esqueleto portante de la torre.
- B) Relleno.

Los pisos de madera, están normalizados. En la figura 1.81 se muestran los diversos tipos.

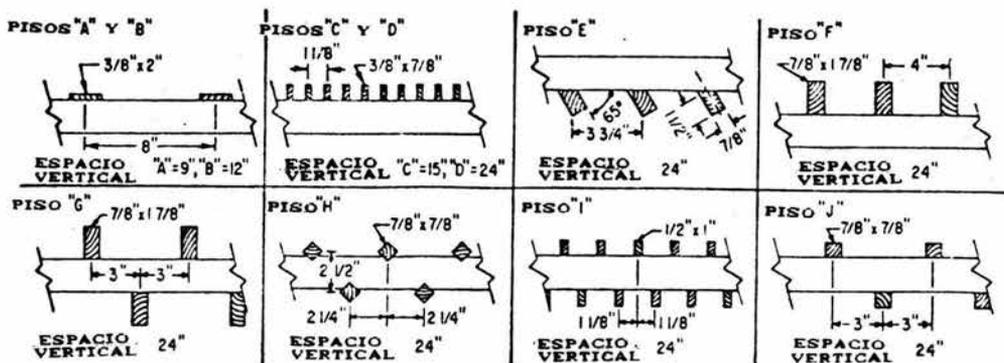


Figura 1.81. Tipos de pisos estandarizados.

C) Eliminadores de niebla.- Para evitar, al menos parcialmente el arrastre de gotas de agua por el aire caliente que sale de la torre, se utilizan los llamados eliminadores de niebla, situados por encima de los sistemas de distribución, y que actúan

generalmente haciendo variar bruscamente la dirección del aire caliente, separándose así el agua, que se va acumulando en los eliminadores y que cae de nuevo, en forma de gotas, sobre el relleno.

D) Chimeneas y ventiladores.- En las torres de tiro inducido, que son las más utilizadas a nivel industrial, encima de los eliminadores de niebla van instalados los ventiladores, alojados en unas chimeneas o cilindros que tienen como principal cometido el proporcionar al ventilador una cámara para un más efectivo funcionamiento y para dirigir el chorro de aire húmedo lejos de la torre, evitando en lo posible la recirculación. El diseño de estas chimeneas es importante, ya que un buen diseño de las mismas puede suponer un ahorro en la potencia del ventilador.

Los ventiladores, para controlar mejor el flujo de aire, pueden estar accionados por motores de dos velocidades, lo que permitirá ahorrar energía en caso de necesitar menor cantidad de aire.

Se admite, como valor medio, que la potencia consumida por una torre de tiro inducido es de 1 CV por cada $200 \text{ m}^3/\text{min}$ de aire.

E) Piscina.- Es la balsa de recogida de agua fría.

F) Cerramiento.- Son las paredes de la torre.

1.11. RECIPIENTES A PRESION Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Con la denominación de recipientes a presión se encuadra a los aparatos constituidos por una envolvente, normalmente metálica, capaz de contener un fluido, líquido o gaseoso, cuyas condiciones

de temperatura y presión son distintas a las del medio ambiente.

En toda planta industrial existen recipientes a presión que desarrollan diversas funciones, tales como:

-Reactores: en ellos se producen transformaciones químicas. Normalmente sus condiciones de presión y temperatura son severas.

-Torres: en ellas se producen transformaciones físicas. Algunas de estas transformaciones son: separación de componentes ligeros y pesados, absorción, arrastre de vapor, etc.

-Recipientes: en ellos pueden producirse transformaciones físicas (separación de líquido-vapor, separación de dos líquidos no miscibles con diferentes densidades) o simplemente realizan la misión de acumulación de fluido.

La forma más común de los recipientes a presión es la cilíndrica, por su más fácil construcción y requerir menores espesores que otras formas geométricas para resistir una misma presión, salvo la forma esférica, cuyo uso se reduce a grandes esferas de almacenamiento, dada su mayor complejidad en la construcción.

Es muy común que en las plantas industriales sean necesarios equipos que almacenen materias primas, o bien productos intermedios o finales en estado líquido. En la industria química su utilización es obligada para productos como petróleo, fuel-oil, gasolinas, aceites lubricantes, ácidos, amoníaco, aceites, alcoholes, agua, etc.

Los equipos utilizados para tal fin son los tanques de almacenamiento, que tienen como función única la de servir de almacén de grandes cantidades de líquidos. Como su función

complementa a la realizada por los recipientes a presión, y aún distinguiéndose de éstos básicamente en no estar sometido a presión o estarlo a presión muy baja.

1.11.1. Recipientes a presión

Todo recipiente a presión está formado por la envolvente, dispositivo de sujeción o apoyo del propio equipo, conexiones por las que entran y salen los fluidos, elementos en el interior y accesorios en el exterior del recipiente. A continuación se procede a describir brevemente cada una de estas partes, mostrando la diversidad de posibilidades de cada una de ellas.

1.11.1.1. Envolvente

Es la envoltura metálica que forma propiamente el recipiente y está formada, básicamente, por dos elementos: la parte cilíndrica o carcasa y los fondos o tapas. Si la carcasa está constituida por varios cilindros de diversos diámetros, la unión entre ellos se realiza generalmente por figuras troncocónicas que realizan la transición.

-Carcasa

La carcasa está formada por una serie de virolas soldadas unas a otras, entendiéndose por virola un trozo de tubería o una chapa (o más si el diámetro es muy grande) que convenientemente curvada y soldada forma un cilindro sin soldaduras circunferenciales.

La unión de varias virolas forman la carcasa, de forma que la suma de las alturas de los cilindros obtenidos por las virolas sea

la requerida para la carcasa.

Las soldaduras de una virola son axiales o longitudinales, ya que están realizadas siguiendo la generatriz del cilindro, y al contrario, las soldaduras que unen virolas, o los fondos con la carcasa, son circunferenciales o transversales, por estar realizadas siguiendo una circunferencia situada, obviamente, en un plano perpendicular al eje del cilindro.

Cuando el diámetro de la carcasa es menor de 609 mm (24"), se utiliza, normalmente, tubería, y en diámetros superiores se realiza a partir de chapa; como dato indicativo, las dimensiones de éstas suelen oscilar entre 2 y 2.4 m de anchura y 6 y 8 m de longitud. Cuando los espesores requeridos para la carcasa son muy grandes se procede a realizarla con material forjado, o con varias carcasas de menor espesor embebidas en caliente. Actualmente las maquinarias de curvar pueden realizar el curvado de chapas de hasta 150 mm de espesor, aunque este valor es función del diámetro del cilindro. A partir de espesores mayores se debe recurrir a una de las soluciones antes indicadas.

-Fondos

Los fondos son las tapas que cierran la carcasa. Los fondos generalmente son bombeados, existiendo una gran diversidad de tipos entre ellos, y como excepción existen los fondos cónicos y planos, de muy reducida utilización.

Todos estos fondos se realizan a partir de chapa, a la que mediante estampación se le da forma deseada, salvo el caso de fondos cónicos y planos.

En todos los fondos se realiza la transición de una figura bombeada a una cilíndrica, que es la carcasa; esta línea de transición, denominada justamente línea de tangencia, está sometida a grandes tensiones axiales que se traducen en fuertes tensiones locales, y este es el punto más débil del recipiente; por esta razón no es aconsejable realizar la soldadura de unión fondo-carcasa a lo largo de esta línea. Para evitar esta coincidencia, los fondos bombeados (y algunos cónicos) se construyen con una parte cilíndrica, denominada pestaña o faldilla, cuya altura mínima "h" varía según la Norma o Código de Cálculo utilizado.

En la figura 1.82 se muestra una unión carcasa-fondo, representándose las líneas de soldadura y tangencia.

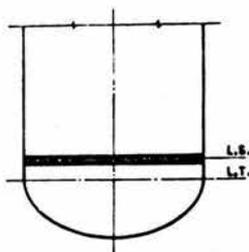


Figura 1.82. Unión fondo-carcasa

Los tipos más usuales de fondos son:

- Semiesféricos.
- Elípticos.
- Policéntricos.
- Cónicos.
- Planos.

a) Semiesféricos

Son los formados por media esfera soldada a la carcasa. Su radio medio es igual al radio medio de la carcasa. El espesor requerido para resistir la presión es inferior al requerido en la carcasa cilíndrica, y como dato aproximado se puede adoptar que el espesor del fondo es la mitad del espesor de la carcasa. La construcción de este tipo de fondos es más costosa que el resto de los fondos bombeados, por lo que su utilización se restringe a casos específicos de grandes espesores o materiales especiales.

En la figura 1.83 se muestra una sección del fondo semiesférico con el detalle de la unión fondo carcasa.

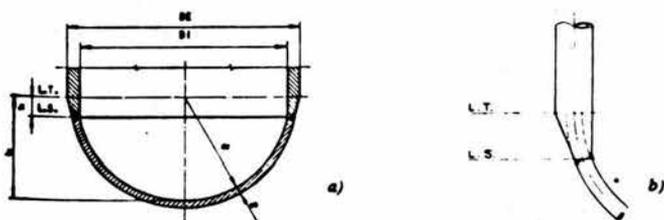


Figura 1.83. a) Fondo semiesférico. b) Detalle de unión fondo-carcasa.

b)Elípticos

Son los fondos formados por una elipse de revolución. Los fondos utilizados son los elípticos con relación de ejes 2:1. Este tipo de fondos son, junto con los policéntricos, los más utilizados para bajas y medianas presiones, y a veces para altas presiones.

La facilidad de su estampación a mutiplicado su utilización.

En la figura 1.84 se muestra la sección del fondo elíptico,

acotadas las dimensiones fundamentales a tener en cuenta.

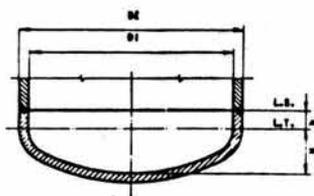


Figura 1.84. Fondo elíptico

c) Policéntricos

Formados por una figura de revolución cuyo perfil (sección del fondo con plano que pasa por eje del cilindro) interno está obtenido mediante dos radios de curvatura con centros diversos.

Su construcción es por estampación. Los pseudoelípticos tienen el mismo campo de utilización que los elípticos, mientras que solamente en casos de baja presión se usan policéntricos 10:1, ya que éstos requieren mayores espesores.

En la figura 1.85 se representan las secciones de ambos fondos, acotadas las dimensiones fundamentales.

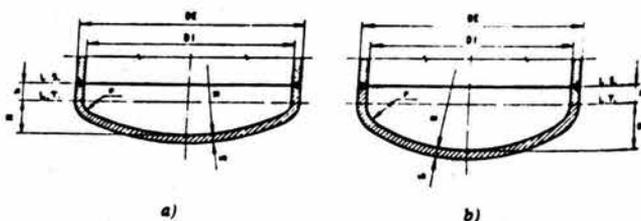


Figura 1.85. a) Fondo policéntrico 10:1. b) Fondo policéntrico 2:1.

d) Fondos cónicos

Los fondos cónicos están formados por un cono fabricado con chapa y por su forma se excluyen de los fondos denominados bombeados. Dependiendo de la unión con la carcasa se presentan dos formas de fondo:

-Con radio de acuerdo o transición de cono cilíndrico por medio de zona esférica tangente a ambos elementos (ver fig. 1.86a).

El valor del radio de acuerdo no puede ser inferior a tres veces el espesor del cono o carcasa. Como en los fondos bombeados, se prolonga el fondo con un borde cilíndrico de altura 25 mm. El valor del semiángulo puede ser cualquiera, pero no es recomendable utilizar mayores de 45°.

-Unión directa entre cono-carcasa (ver fig. 1.86b). Este tipo de fondo ofrece una menor resistencia a presión, por lo que su uso está limitado a fondos con valor del semiángulo inferior (β) a 30°, y aún así no es recomendable utilizarlo para valores de $\beta > 20^\circ$. En esta clase de fondos es preciso comprobar si es necesario reforzar la carcasa debido a la sobresolicitación a la que se somete el entorno de la línea de soldadura, y a poca resistencia que esta zona ofrece a una posible ovalización.

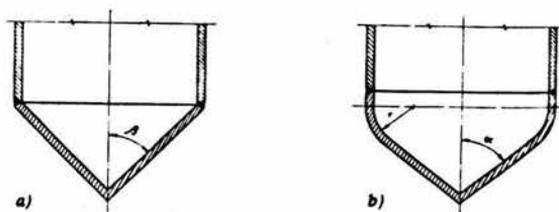


Figura 1.86. a) Fondo cónico sin radio de acuerdo. b) Fondo cónico con radio de acuerdo.

e) Fondos planos

Consistentes en una chapa plana soldada directamente a la carcasa. En la figura 1.87 se muestran dos tipos de unión del fondo plano. Su utilización es muy escasa por presentar una sección muy poco resistente a la presión, lo que requiere grandes espesores, además de existir el punto débil de la soldadura en que se produce una concentración de tensiones. Su uso se restringe a recipientes de muy baja presión y diámetro pequeño.

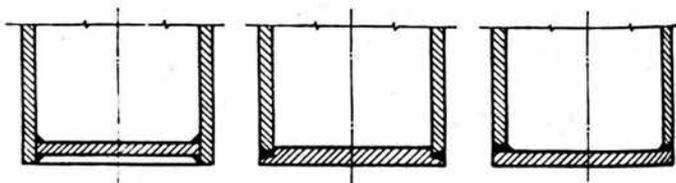


Figura 1.87. Fondos planos.

-Transición Trococónica

Cuando la carcasa está compuesta de varios cilindros de diverso diámetro es preciso incluir una figura 1.88 de transición que normalmente es trococónica. Las formas de la unión así, como las recomendaciones, son las indicadas en los fondos cónicos; siendo válidas para las dos uniones, esto es, al cilindro de diámetro mayor y al cilindro de diámetro menor.

En este caso, al igual que en los fondos, se recomienda utilizar las uniones con radio de acuerdo, aunque su coste es superior.

1.11.1.2. Dispositivos de sujeción o apoyo

Todo recipiente debe ser soportado, es decir, su carga debe ser transmitida al suelo o a alguna estructura que las transmita al suelo; esta misión la cumplen los dispositivos de sujeción o apoyo. Las cargas a las que está sometido el recipiente y que transmitirá al suelo a través de su apoyo son:

-Peso propio.

-Peso del líquido en operación normal, o agua en la prueba hidráulica.

-Peso de todos los accesorios internos y externos.

-Cargas debidas al viento.

-Cargas debidas al terremoto.

Los recipientes a presión se subdividen en dos clases, dependiendo de la posición en que se encuentren instalados:

-Recipientes destinados a trabajar en posición vertical, denominados "recipientes verticales".

-Recipientes destinados a trabajar en posición horizontal, denominados "recipientes horizontales".

-Apoyos para recipientes verticales:

a) Patas.

b) Faldón cilíndrico o cónico.

c) Ménsulas.

a) Patas (fig. 1.88).-Con este tipo de dispositivo de sujeción el recipiente se apoya en 3 o 4 patas soldadas a la carcasa. Estas patas son perfiles en L-U-I soldados por encima de la línea de soldadura, bien directamente a la carcasa o bien a una placa de refuerzo soldada sobre el recipiente; la primera solución se

utiliza para carcasas en acero al carbón y de pequeño peso, mientras que la segunda se utiliza para carcasas en acero aleado o recipientes de gran peso; en esta segunda solución el material es igual al de la carcasa y las patas son de acero al carbono. Cada pata está fijada al suelo por un perno de anclaje que resiste las cargas de tracción.

La sujeción por medio de patas se utiliza en recipientes de altura no superior a 5 m y diámetros no superiores a 2.4 m, siempre que los esfuerzos a transmitir no sean excesivos, o dicho de otro modo, siempre que el peso no sea muy grande, en cuyo caso se utilizará como apoyo el faldón cilíndrico.

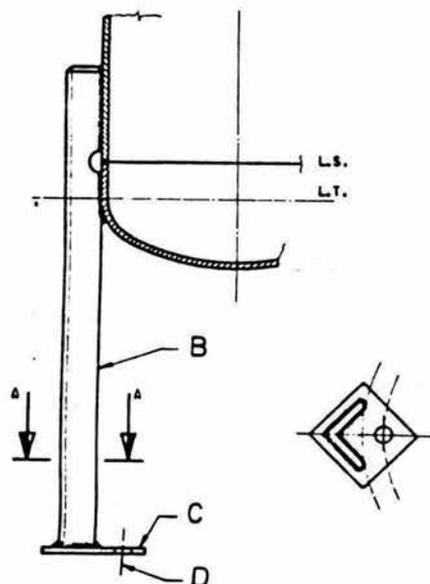


Figura 1.88. Elemento de apoyo de un recipiente. B) Pata de apoyo. C) Placa base. D) Taladro para perno de cimentación.

b) Faldón cilíndrico y cónico (fig. 1.89).—En los recipientes que no pueden ser soportados por patas, bien sea por su tamaño o por tener que transmitir esfuerzos grandes, se utilizan los faldones cilíndricos, consistentes en un cilindro soldado al fondo. Con este tipo de apoyo la carga se reparte uniformemente a lo largo del perímetro de la circunferencia de soldadura, evitando concentraciones de esfuerzos en la envolvente y disminuyendo la presión transmitida al suelo.

Los pernos de anclaje se sitúan a lo largo del perímetro de la circunferencia de apoyo y a una distancia entre 400 y 600 mm, según el tamaño y el número requerido. En todo caso, el número de pernos deberá ser múltiplo de 4 (4,8,12,16,20,24).

Si la presión transmitida sobre el suelo es muy grande o el número requerido de pernos no cabe en la circunferencia del faldón, se realizará un faldón cónico que aumenta el tamaño de ésta. El semiángulo del cono α no debe ser superior a 6° .

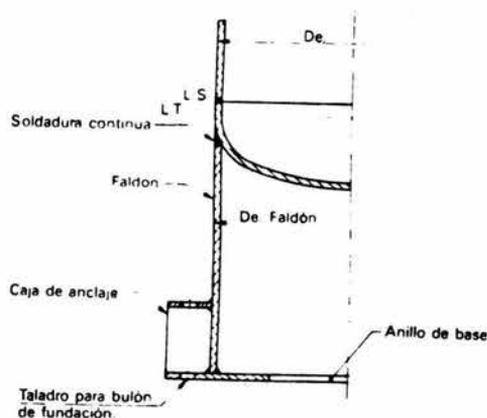


Figura 1.89. Faldón cilíndrico

Para evitar momentos debidos al peso del recipiente se debe realizar el faldón de forma que su diámetro medio coincida con el diámetro medio de la carcasa.

Este tipo de apoyo es el más utilizado para torres, reactores y recipientes de tamaño medio y grande.

Al diseñar el faldón se debe tener en cuenta que ha de incluirse un acceso a su interior (dimensiones mínimas de 600 mm. de diámetro) y unas ventilaciones para evitar la acumulación de gases en su parte interna.

c) Ménsulas (fig. 1.90).-Es el tipo de apoyo utilizado en los recipientes verticales que deben soportarse en estructuras portantes, cuando las dimensiones y cargas no son muy grandes. El número de ménsulas utilizadas son 2,4,8 y raramente mayor, pero si así fuera necesario, su número deberá ser múltiplo de 4. Al igual que las patas, pueden ser soldadas directamente a la carcasa o a una placa de refuerzo soldada al recipiente; las razones que conducen a la adopción de uno u otro sistema son las mismas a las expuestas en el caso de los apoyos del tipo de patas.

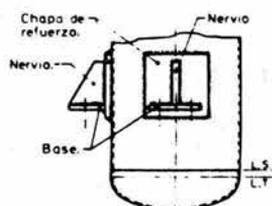


Figura 1.90 Ménsula

1.11.1.2. Apoyos para recipientes horizontales:

Se apoyan en el suelo o en la estructura portante por medio de

cunas (figura 1.91).

El número de cunas es normalmente 2, y sólo en el caso de recipientes muy largos se instalan un número superior. El motivo de utilizar generalmente dos cunas es evitar los problemas que se originan en el caso de asentamientos diferentes en el terreno bajo las respectivas cunas.

Con el objeto de no crear tensiones en el equipo, es necesario que este pueda dilatarse libremente según el eje principal, por lo cual una de las dos cunas tendrá libre el movimiento en la dirección del eje, mientras que la otra estará fija por los pernos de anclaje.

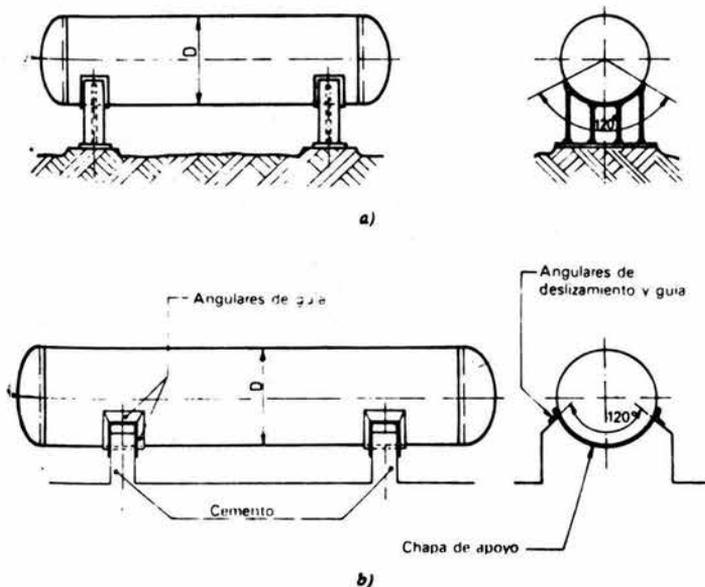


Figura 1.91. Cuna soporte: a) cunas metálicas; b) cunas de cemento.

1.11.1.3. Conexiones

Todo recipiente debe tener como mínimo una conexión de entrada del fluido y otra de salida, aunque siempre tienen muchas más. Seguidamente se indican los servicios más comunes que precisan conexiones en el recipiente:

-De entrada y salida de fluidos.

-Para instrumentos, como manómetros, termómetros, indicadores o reguladores de nivel.

-Para válvula de seguridad.

-Para servicios tales como drenaje, venteo, de limpieza, paso de hombre, paso de mano, etc.

Salvo en casos excepcionales, las conexiones se realizan embridadas, ya que permiten su montaje y desmontaje sin tener que realizar ningún corte ni soldadura. Solamente en casos de fluidos extremadamente tóxicos, o altamente explosivos en contacto con el aire, se realizan las conexiones soldadas.

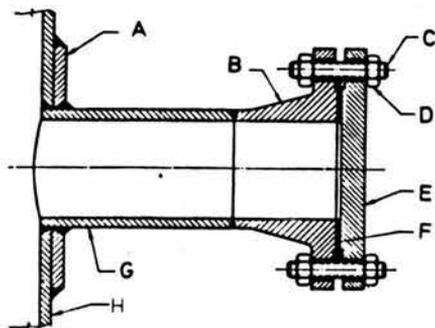


Figura 1.92 Conexión. A) Chapa de refuerzo. B) Brida. C) Perno. D) Tuerca. E) Brida ciega. F) Junta. G) Tubuladora. H) Carcasa del recipiente.

Las diversas partes que conforman la conexión embridada se muestran en la figura 1.92, y son las siguientes:

- Tubuladura.
- Placas de refuerzo.
- Brida.
- Pernos y tuercas.
- Juntas o guarniciones.
- Tapas o bridas ciegas para las conexiones de servicios.

a) La tubuladura es el tronco cilíndrico que se suelda al recipiente y a la brida, y está construida normalmente de tubería; sólo en caso de conexiones de grandes tamaños (diámetro nominal mayor o igual a 24") o no disponer de trozos de tubos para tamaños medios (DN entre 12" y 20") se construyen de chapa soldada. Cuando las presiones son muy grandes, a veces se realizan las tubuladuras forjadas y de un gran espesor; en este caso se dice que la tubuladura es autorreforzada y no precisa placa de refuerzo (fig. 1.93).

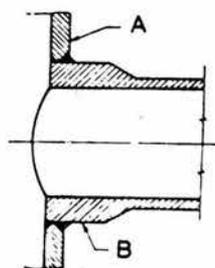


Figura 1.93. Conexión autorreforzada. A) Carcasa. B) Tubuladora.

Los diámetros y dimensiones de la tubería están normalizadas, por lo que se debe elegir un diámetro de conexión que esté incluido dentro de los normalizados. Dentro de las diferentes normalizaciones de la tubería la más utilizada y, por tanto, la

que es más conveniente por existir mayor facilidad en el acopio de materiales, es la normativa americana ANSI B 36.10 y ANSI B 36.19, que define la tubería por un diámetro nominal en pulgadas y un "Schedule" del que deriva el correspondiente espesor.

b) Placas de refuerzo.-Para realizar una conexión debe practicarse un agujero en el recipiente, lo que significa que se elimina una parte de pared resistente, y por lo tanto se precisa compensar esta eliminación con un aporte de material resistente en igual cantidad (sección) a la eliminada.

c) Bridas.- Existen diversas normas que clasifican y definen sus dimensiones, siendo las más utilizadas la norma alemana DIN, inglesa BS y americanas MSS SP44, API y ANSI (American National Standard Institute).

La más utilizada universalmente es la norma ANSI B 16.5, y por tanto en base a ésta se indican las clases de bridas y sus variables fundamentales.

Para definir una brida por la norma ANSI B 16.5 es necesario indicar, aparte del material, los siguientes datos:

- Diámetro nominal (DN).
- La serie.
- El tipo.
- Forma de la cara de asiento.

El diámetro nominal (DN) se expresa normalmente en pulgadas y en la normativa ANSI, el mayor es de 24", por lo que se debe recurrir a otra norma, como MSS-SP44 o BS, que prolongan el campo de utilización a mayores diámetros.

La serie en las bridas son el indicativo de las condiciones de

presión-temperatura máximas que soportan, y en la norma ANSI B16.5 son de 150, 300, 600, 900, 1,500 y 2,500 libras. La determinación de la serie se realiza caso por caso y en función del material, temperatura y presión, siendo las más ligeras y, por tanto, más económicas las de las series inferiores, pero a su vez las menos resistencias.

Los tipos de bridas incluidos en la norma ANSI B 16.5, y por tanto los habitualmente utilizados, son:

- Brida para soldar a tope (Welding neck (WN)).
- Brida para soldar sobrepuesta (Slip-on (SO)).
- Brida libre (Lap joint (LJ)).
- Brida para soldar a enchufe (Socketed Welding (SW)).
- Brida para soldar a tope largo (Long Welding neck (LWN)).

Todos estos tipos se representan esquemáticamente en la figura 1.94, y para mayor detalle de dimensiones, pesos, etc., se puede recurrir a las normas indicadas.

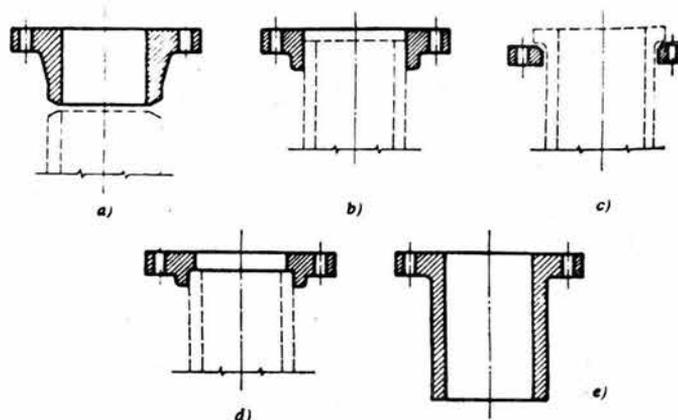


Figura 1.94 Tipos de bridas. a) Para soldar a tope. b) Para soldar sobrepuesta. c) Libre. d) Para Soldar a enchufe. e) Brida para soldar a tope largo.

Las caras de acoplamiento deben tener una forma tal que, en unión con la junta o guarnición, garanticen una perfecta estanqueidad y, por tanto para los diferentes tipos de junta se recomiendan diversas formas de la cara de acoplamiento. Las formas más utilizadas son:

- Cara con resalte (Raised face (RF)).
- Cara para anillo (Ring joint (RJ)).
- Cara plana (Flat face (FF)).

El perfil de estos tipos de cara vienen representados en la figura.1.95.

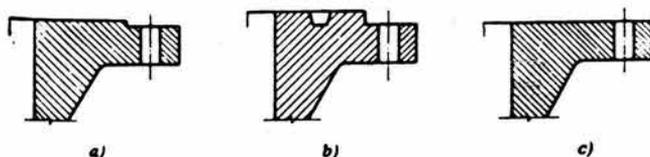


Figura 1.95 Tipos de caras de bridas. a) Cara con resalte (RF). b) Cara para anillo (RJ). c) Cara plana (FF).

d) Pernos y tuercas.-Los pernos o tirantes aprietan las bridas entre sí para que deformen a las juntas y así se garantice la estanqueidad. El tamaño y número de pernos viene definido por la brida y, por lo tanto, debe fijarse solamente el material para completar su definición.

De los diferentes tipos de roscas para pernos, se deben utilizar los fijados en ANSI B 1.1, que indica que para pernos y tuercas hasta 1" se usa la serie UNC, y para pernos de mayor diámetro la serie UN. La parte de la norma ANSI que define las dimensiones de las tuercas es ANSI B 18.2.2, que se pueden

utilizar con los pernos indicados.

e) Juntas o guarniciones.-Tienen la misión de garantizar la estanqueidad de la unión. Las formas de las juntas están en función de la forma de la cara de acoplamiento (RF, FF, RJ), al igual que del material utilizado. Para las bridas RJ siempre se utilizan juntas totalmente mecánicas. Para bridas FF normalmente las juntas son de amianto comprimido, amianto con metal (espirometálicas) o si la presión es muy baja puede realizarse incluso con goma. Para las bridas RF los tipos y materiales de juntas pueden ser prácticamente todos los indicados en el caso de RJ y FF, además de amianto encamisado con un metal o amianto doblemente encamisado con un metal.

Las normas de ANSI a aplicar son: ANSI B 16.21 para juntas no metálicas, ANSI B 16.20 para metálicas, y como no existe norma ANSI para las metaloplásticas, se utiliza las contempladas en API STD 601.

f) Bridas ciegas.-Normalmente todas las conexiones de servicio están tapadas con bridas ciegas. Este tipo de bridas también es contemplado por la norma ANSI B 16.5.

Las bridas ciegas se instalan, entre otras, en las conexiones de paso de hombre y paso de mano. Los tamaños de los primeros pueden ser de 18", 20" y 24"; actualmente, 18" solamente se utiliza en casos de recipientes de pequeño diámetro. El paso de mano tiene un tamaño normal de 6" y 8".

1.11.1.3. Partes internas

Se pueden encontrar en el interior de los recipientes:

a) Rompetorbellinos.- Son unas piezas de chapa en forma particular que, situadas a la salida del líquido, evitan que se formen torbellinos que producen una mala conducción por las tuberías (figura 1.96).

b) Distribuidores.- Su misión es hacer que el fluido de entrada se reparta por toda la sección del recipiente.

c) Catalizador.- Va en reactores y su misión es controlar una reacción química desplazándola en algún sentido, acelerándola o retardándola.

d) Rellenos.- Sirven para aumentar la superficie de contacto entre dos fluidos que circulan en sentido contrario y que normalmente son un líquido y un gas. Son muy utilizados en las torres de absorción y adsorción.

La forma de las piezas, sus dimensiones y su material son muy importantes para conseguir el servicio requerido.

Las formas más comunes son:

-Troncos cilíndricos (raschig rings).

-Sillas de montar (Saddles).

-Otras formas como espiral, pall-rings, etc.

Los tamaños habituales son de 1/2" a 3", y las variables más importantes a tener en cuenta son:

-Volumen libre en %.

-Superficie ofrecida por unidad de volumen, m^2/m^3 de relleno.

-Peso por unidad de volumen de relleno, Kg/m^3 .

-Caída de presión.

-Resistencia a la compresión.

e) Rejillas.- Son las piezas que soportan al catalizador,

relleno, etc.

f) Separadores de gotas.- Sirven para separar de un gas las pequeñas gotas de líquido que arrastran en suspensión. Están constituidos por una red de hilos metálicos entrecruzados entre sí que forman de este modo una malla metálica.

g) Platos.

-Platos perforados: Son los más simples y consisten en chapas con agujeros regularmente repartidos.

-Platos de campana: A los agujeros se les sueldan unos pequeños trozos de tubos ascendentes y sobre ellos se colocan unas campanas que reparten el vapor uniformemente.

-Platos con válvula: En los agujeros se sitúan unas "cazuelitas" que pueden moverse libremente en su asiento; éstos son los más utilizados actualmente.

h) Existen otros posibles elementos internos, como serpentines de calentamiento, intercambiadores tipo de balloneta, agitadores, testigos de corrosión, etc.

Accesorios externos

a) Soportes para instalación del aislamiento.- Cuando la temperatura del fluido interior es superior a 60°C, o bien inferior a 0°C, se debe instalar un aislante para impedir la pérdida de calor o evitar el calentamiento del interior, así como protección personal.

b) Anclajes para aplicación de protección contra incendios.

c) Soportes de escalera y plataformas.

d) Soportes para tuberías.

e) Pescantes.- Si el recipiente contiene elementos pesados en su

interior, como platos, rellenos, etc; es necesario instalar un pescante en la parte superior del equipo para facilitar la instalación y la retira de dichos elementos.

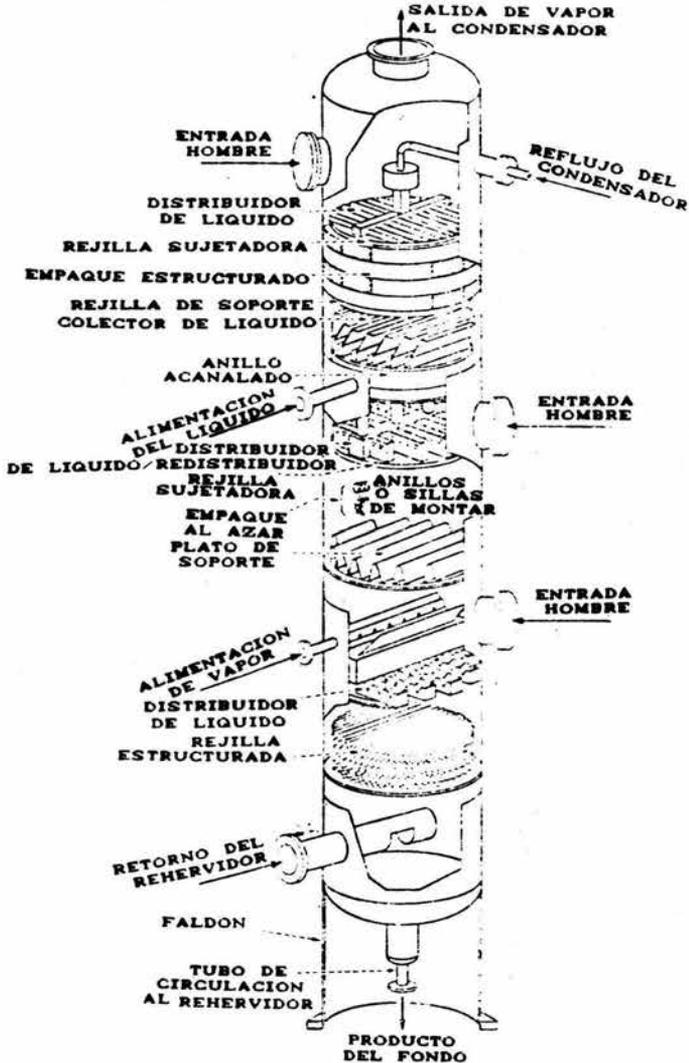


Figura 1.06. Columna empacada que contiene una gran variedad de interiores.

Igualmente, para facilitar la apertura de los pasos del hombre, se instala un pescante que sostiene la brida ciega en la posición abierta de la conexión, facilitando las operaciones de mantenimiento.

1.11.2. Tanques de Almacenamiento

Los tanques de almacenamiento, que trabajan a presión atmosférica o a una muy baja presión, pueden ser de los siguientes tipos generales:

-Techo flotante.

-Techo fijo.

-Techo abierto (sólo válido para almacenamiento de líquidos a presión atmosférica).

El empleo de un tipo u otro se decide después de un estudio que debe tener en cuenta las siguientes ventajas de cada tipo.

a) Las ventajas de los tanques con techo flotante son:

-Menores pérdidas por evaporación causadas con la variación de la temperatura.

-Durante el llenado no deben ser evacuados los vapores por no existir espacio entre el líquido y el techo donde se hayan formado.

-Reduce el riesgo de incendio por no existir aire en contacto con el líquido.

-La falta de espacio entre el líquido y el techo impide la formación de mezclas explosivas.

b) Las ventajas del techo fijo son:

-Menor costo que los de techo flotante.

- No deben soportar la carga de agua de lluvia.
- No existe la posibilidad de inundación por agua de lluvia.
- Las tolerancias de fabricación pueden ser mayores.
- Más adecuado para pequeñas dimensiones.

c) Como ventajas de los tanques de techo abierto sólo se puede indicar su muy inferior costo, pero lógicamente no se pueden almacenar productos volátiles ni aquellos que se vean afectados por el agua de lluvia.

De acuerdo con las características de cada tipo de tanque, los líquidos que se almacenan en cada uno de los referidos tipos son:

- Techo abierto: Agua para usos industriales.
- Techo fijo: Las fracciones pesadas del petróleo (asfaltos, fueloil, gasóleo, keroseno), aceites lubricantes, ácido sulfúrico, fosfórico y, en general, todos los productos que no sean volátiles y cuyas posibilidades fugas de evaporación no supongan problemas.
- Techos flotantes: Fracciones medias-ligeras del petróleo (gasolina, naftas, etc.), petróleo y, en general, todos los productos volátiles.

Entre las normas que estudian los tanques atmosféricos son:

- Norma API Std 650 (American Petroleum Institute).
- Norma B. S. 2654 (British Standard). (8)

1.12. BIBLIOGRAFIA

- (1) Rase, Howard F., Diseño de tuberías para Plantas de Proceso, Editorial Blume, Madrid, España (1973).
- (2) Baquero Franco, J. y Llorente Martínez, V., Equipos para la

- Industria Química y Alimentaria, Editorial alhambra, España (1985).
- (3) Perry, John H., and Chilton, Cecil H., "Manual del Ingeniero Químico", Segunda Edición en Español., McGraw-Hill Co., México (1982).
- (4) Baquero Franco, J. y Llorente Martínez, V., op. cit.
- (5) Kern, D.Q., Procesos de Transferencia de Calor, Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V., México, D.F. (1986).
- (6) Mehra Davinder K., Selecting Evaporators, Chem. Eng., Vol.93. No.3. February 3, p.56. (1986).
- (7) Kern, D.Q., op. cit.
- (8) Baquero Franco, J. y Llorente Martínez, V., op. cit.

II

PRINCIPIOS DE CORROSION



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

2.1 DEFINICION DE CORROSION:

El término de corrosión puede definirse de muchas formas:

(1) Destrucción o deterioro de un material debido a la reacción de este con el ambiente que lo rodea; (2) destrucción de un material por medio de otro con mayor inercia mecánica y (3) una operación metalúrgica extractiva inversa.¹ Como las definiciones (1) y (2) permiten considerar tanto a los materiales metálicos como a los no metálicos, se tendrá preferencia a lo largo de este trabajo por ellas.

Otro autor nos dice que la corrosión puede definirse como la reacción de un material metálico con el ambiente que lo rodea, y que los productos de esta reacción pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. Tanto la naturaleza física y química de estos productos son importantes ya que tienen influencia sobre la velocidad de reacción.²

Debido a que la corrosión involucra cambios químicos, es obvio que para comprender las reacciones de corrosión tendremos que familiarizarnos con principios químicos. En particular, ya que los procesos de corrosión son principalmente de tipo electroquímico, se debe tener conocimiento de esta área. Además, como necesitaremos conocer la estructura y la composición de un metal para determinar su resistencia a la corrosión, tendremos que familiarizarnos con fundamentos de metalurgia física.

Para ayudarnos en la comprensión y el conocimiento de la corrosión podemos auxiliarnos de dos materias que se encargan de

¹ Fontana and Greene, "Corrosion Engineering", 5th Ed. McGraw-Hill, Pag. 2 (1984).

² Scully, J. C., "Fundamentals of Corrosion", Pergamon Press, Pag ix (1960).

estudiarla, estas dos materias son la ciencia de corrosión y la ingeniería de corrosión. La primera de ellas está relacionada con el estudio de los mecanismos que se llevan a cabo durante el proceso de corrosión, y nos ayuda a comprender mejor las causas que la originan y los medios para prevenir o minimizar los daños que ocasiona. Mientras que la segunda aplica los conocimientos científicos acumulados para disminuir los daños ocasionados por la corrosión con medios prácticos y económicos. (1)

2.2. ASPECTOS ELECTROQUÍMICOS:

2.2.1. Características de la Corrosión.

Los procesos de corrosión no son sencillos, pues en el curso de los mismos tienen lugar dos reacciones simultáneas, la oxidación del metal y la reducción del oxidante, ambas sobre una misma superficie. Cuando la corrosión se efectúa en ambiente seco los productos de reacción se forman directamente, como muestra la figura 2.1.a, originando una capa protectora sobre el metal, si no se trata de productos volátiles o solubles en el medio. Pero en medio acuoso las reacciones se producen separadamente, tal como indica la figura 2.1.b, formando productos que no siempre constituyen una protección para el metal.

El mecanismo del proceso es de tipo electroquímico y está gobernado por la cinética de la oxidación del metal y de la reducción del oxidante, cuyas reacciones no es necesario que tengan lugar en el mismo punto de la superficie del metal. Ello supone el desplazamiento de los electrones antes de combinarse con el oxidante, de modo que los puntos donde se producen las

reacciones elementales de oxidación y reducción pueden variar de posición sobre la superficie del metal, y es posible que estos cambios de lugar controlen la cinética del proceso.

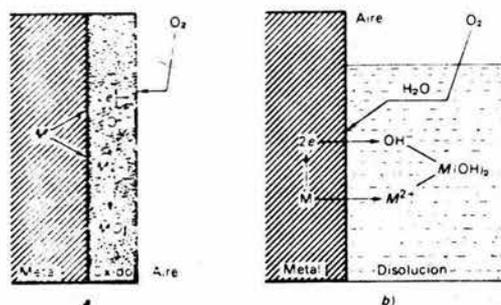


Figura 2.1. Modelo simplificado de corrosión: a) química y b) electroquímica de los metales.

La separación de los procesos de oxidación y de reducción, al producirse en zonas perfectamente diferenciadas, permite tratar el proceso total en función de cada reacción. Luego, el potencial se puede escribir

$$(2.1) \quad E = E_c - E_A$$

donde los subíndices A y C indican los procesos globales anódico y catódico, respectivamente. Teniendo en cuenta la relación entre el potencial y la variación de energía libre del proceso total, resulta que si

$$(2.2) \quad E_c > E_A, \quad E > 0 \quad \text{y} \quad \Delta G < 0$$

y el proceso es espontáneo, mientras que cuando

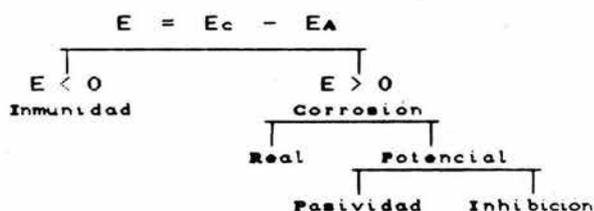
$$(2.3) \quad E_c < E_A, \quad E < 0 \quad \text{y} \quad \Delta G > 0$$

de modo que el proceso no es espontáneo. Estas condiciones

termodinámicas representan los criterios que permiten determinar, respectivamente, la corrosión o la inmunidad del sistema.

Sin embargo, estos criterios no indican la velocidad a que transcurre la corrosión. A temperatura ambiente, en general el proceso de oxidación de los metales tiene lugar a velocidad baja, pero en determinados casos la velocidad de corrosión puede ser elevada. Por otra parte, a veces el metal queda recubierto por una película protectora que conduce a su pasividad (ver Secc. 2.2.), disminuyendo apreciablemente la velocidad de corrosión, a pesar de que las condiciones termodinámicas del proceso son favorables para su desarrollo. La corrosión puede también ser atenuada por otros factores que, como se comenta en la Secc. 5.3., originan la inhibición de la reacción. Tanto la pasivación como la inhibición llevan a estados de corrosión potencial, pues el proceso es termodinámicamente posible, pero se desarrolla a una velocidad lo suficientemente lenta como para poder ser ignorado. El esquema siguiente resume las diversas posibilidades.

(2)



2.2.2. Potencial de Oxidación.

La tendencia de un elemento, ya sea en forma iónica, atómica o molecular, a actuar como un agente reductor u oxidante, puede

medirse en forma de potencial eléctrico. Cuando mayor sea el voltaje requerido para separar un electrón de un elemento, mayor será la fuerza oxidante de dicho elemento. Por el contrario, su fuerza reductora vendrá determinada por la mayor facilidad de los electrones para separarse del mismo y en su menor tendencia para adquirirlos. Estas propiedades de los elementos varían de un compuesto a otro.

Energía para las reacciones redox.³ La energía para las reacciones redox procede de los átomos que adquieren electrones. Cuando un átomo capta electrones, se desprende energía. Cuando éstos se separan de los átomos, se utiliza energía. Si en una reacción se desprende más energía de la que se absorbe, tendrá lugar un intercambio de electrones (reacción).

Potenciales de electrodo simple. La tendencia a ganar o a perder electrones se mide en forma de potencial de oxidación. Para ello se utiliza un electrodo simple para lo que se va a medir, y otro electrodo de referencia. Este último suele ser el de hidrógeno (A, en la fig. 2.2). Consiste en una lámina de platino sobre la que se ha depositado una capa electrolítica de negro de platino, sumergida en una solución 1 M en iones hidrógeno. El otro electrodo es una placa metálica brillante, inerte, generalmente de platino (B, en la fig. 2.2.), que se

³ Las reacciones que transcurren con pérdida o ganancia de electrones se llaman de oxidación-reducción o reacciones redox. Brumblay, Ray U., Análisis Cualitativo, 5ª Impresión, CECSA, México, p. 79, 1989.

sumerge en la solución que contiene los iones o moléculas en estudio. Ambas soluciones se conectan mediante un puente salino, por lo general un tubo lleno de asbesto saturado de una solución de KCl. El puente salino conecta eléctricamente las dos medias celdas sin intervenir de manera apreciable en su potencial.

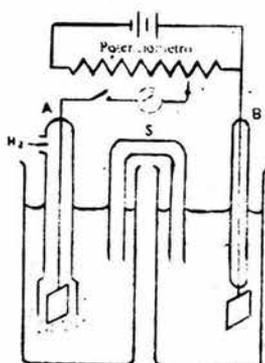


Fig. 2.2. Dispositivo para medir los potenciales de electrodo, con la celda de hidrógeno conectada a la celda problema, mediante un puente salino, S.

Con frecuencia, el electrodo de hidrógeno se sustituye por uno de calomel, como referencia, que resulta mucho más cómodo (A, en la fig. 2.3.). Este electrodo tiene un potencial de + 0,242 voltios, el cual puede ser deducido de todos los potenciales medidos, para obtener el potencial con relación al electrodo de hidrógeno. (3)

2.2.3. Ecuación de Nernst.

El potencial de oxidación, E, para cualquier combinación de

concentración de iones en un sistema de reacción, puede calcularse si se conocen el potencial del electrodo normal, E° , y las respectivas concentraciones de las formas oxidada y reducida. Experimentalmente, la variación de potencial con la concentración puede determinarse midiendo la fuerza electromotriz de una celda

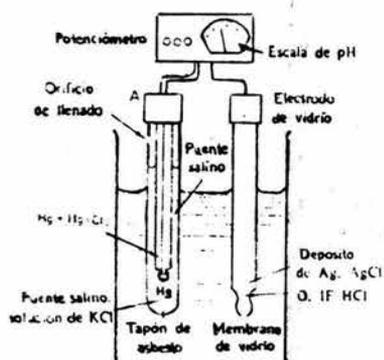


Figura 2.9. Potenciómetro, electrodo de vidrio y electrodo de calomel, en un circuito para la medición de pH.

que contenga al electrodo deseado (como se dijo anteriormente), conectado mediante un puente salino a un electrodo de referencia de potencial conocido. En teoría, el potencial del electrodo a diversas concentraciones de la especie redox puede calcularse empleando la ecuación de Nernst. (4)

Formas de la Ecuación. La forma original de la ecuación de Nernst es la siguiente:

$$(2.4) \quad E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln Q$$

en donde:

- E es el potencial que se quiere encontrar, en voltios.

E° es el potencial normal del electrodo.

R es la constante de los gases, 8.314 julio por grado-mol.

T es la temperatura absoluta, 273 + temperatura en grados centígrados.

n es el número de electrones que toman parte en la reacción.

F es el Faraday, 96,500 coulombios.

Q es la constante de equilibrio de la reacción.

En condiciones ordinarias, a 25°C, con constantes combinadas y empleando el logaritmo base 10, la ecuación anterior se reduce a:

$$(2.5) \quad E = E^\circ + \frac{0,059}{n} \log Q$$

Para medir reacciones, tales como $A_{ox} + n e^- = A_{red}$, la Q se convierte en una relación y la ecuación general para tales casos es:

$$(2.6) \quad E = E^\circ + \frac{0,059}{n} \log \frac{[A_{ox}]}{[A_{red}]}$$

en donde:

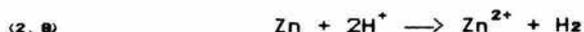
[A_{ox}] es la concentración molar (actividad) de la forma oxidada y [A_{red}] es la concentración molar (actividad) de la forma reducida. (5) y (6)

2.2.4. Reacciones Electroquímicas.

La naturaleza electroquímica de la corrosión puede ilustrarse por el ataque del zinc provocado por el ácido clorhídrico diluido, al entrar en contacto estas dos sustancias ocurre una reacción vigorosa, desprendiéndose gas hidrógeno y disolviéndose el zinc que forma una solución de cloruro de zinc. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



En esta reacción podemos darnos cuenta que el ion de cloro no se involucra en la reacción, por lo que podemos escribir lo anterior en forma simplificada.



Entonces, el zinc reacciona con los iones hidrógeno de la solución del ácido para formar iones de zinc y gas hidrógeno. Examinando la ecuación (2.8), se puede observar que durante la reacción, el zinc se oxida a iones de zinc y los iones de hidrógeno se reducen a hidrógeno. Por lo que la ecuación (2.8) puede ser dividida en dos reacciones, la oxidación de zinc y la reducción de los iones hidrógeno.



Una reacción de oxidación o reacción anódica se indica por un incremento en la valencia o una producción de electrones. Una disminución en las cargas de valencia o el consumo de electrones significa una reducción o reacción catódica.

El concepto anterior se ilustra en la figura 2.4, aquí el átomo de zinc ha sido transformado en un ion de zinc y dos electrones. Estos electrones que provienen del metal son consumidos

inmediatamente durante la reducción de los iones hidrógeno. La

⁴ Recientemente, la teoría de corrosión ha sido basada en el concepto de ánodo local y áreas catódicas sobre la superficie del metal. Aunque la descripción del fenómeno de corrosión se basa en los principios modernos de la cinética de electrodos (teoría mezcla-potencial) que son generales ya que se aplican a cualquier sistema corrosivo y no dependen de la suposición relativa a la distribución de reacciones anódicas y catódicas. Debe enfatizarse que estos dos métodos de tratar la corrosión no son conflictivos, es decir no son excluyentes uno de otro, y que solo representan dos conceptos diferentes. En este texto, usaremos la descripción de la cinética del electrodo por su gran simplicidad y por su aplicación general.

figura 2.4 muestra estos dos procesos separados especialmente para mayor claridad. Pero aunque esten o no separados u ocurran en el mismo punto de la superficie no se debe afectar el principio de conservación de cargas. En algunas reacciones de oxidación, la

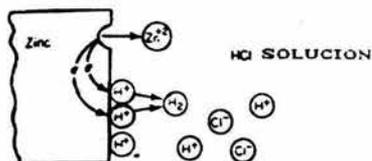
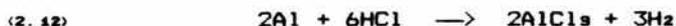
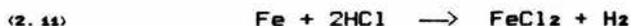


Fig. 2.4. Reacciones electroquímicas que ocurren durante la corrosión del zinc producida por el ácido clorhídrico libre de aire.

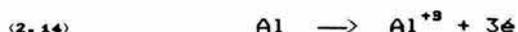
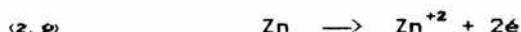
reacción ocurre uniformemente sobre la superficie, mientras que en otros casos esta se localiza y ocurre en áreas específicas.

La corrosión del zinc producida por el ácido clorhídrico es un proceso electroquímico, ya que cualquier reacción que pueda ser dividida en dos (o más) reacciones parciales de oxidación y reducción es un término electroquímico. La división de las reacciones de corrosión u otras reacciones electroquímicas en reacciones parciales las hace de comprensión más simple.

Otros metales como el hierro y el aluminio, al igual que el zinc, son rápidamente corroídos por el ácido clorhídrico. Las reacciones que representan estos fenómenos son las siguientes:



Aunque a primera vista estas parecen muy diferentes entre sí, al compararlas con los procesos de oxidación y reducción que se indican en las ecuaciones (2.7), (2.11) y (2.12) se observa que son muy similares.



Por lo que el problema de corrosión ocasionado por el ácido clorhídrico se simplifica en muchos casos a la reacción catódica en la que la evolución del gas hidrógeno se da de acuerdo a la reacción (2.10). Esto se aplica también a la corrosión producida por otros ácidos, como el ácido sulfúrico, el ácido fosfórico, el ácido fluorhídrico y los ácidos orgánicos solubles en agua, como el ácido fórmico y el ácido acético. En cada caso, sólo el ion hidrógeno se activa, los otros iones como el sulfato, fosfato y acetato no participan en la reacción electroquímica.

Dando un punto de vista estable a los procesos parciales de oxidación y de reducción, toda la corrosión puede clasificarse en unas pocas reacciones generalizadas. La reacción anódica en muchas reacciones de corrosión es la oxidación de un metal a su ion.

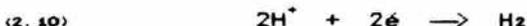
Esto puede escribirse en su forma general como:



En donde se observa que el número de electrones producidos es igual al número de valencia del ion.

Hay muchas reacciones catódicas diferentes que se encuentran frecuentemente en la corrosión metálica. Las reacciones catódicas más comunes son:

Evolución de hidrógeno



Reducción de Oxígeno (soluciones ácidas)



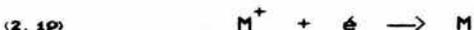
Reducción de Oxígeno (soluciones neutras o básicas)



Reducción del ion metálico



Deposición del metal



La evolución del hidrógeno es una reacción comúnmente catódica ya que frecuentemente se encuentra en los ácidos o en los medios ácidos. La reducción de oxígeno es muy común, ya que cualquier solución acuosa en contacto con aire es capaz de producir esta reducción. La reducción del ion metálico y la deposición de metal son reacciones menos comunes, se encuentran muy frecuentemente en los pasos de los procesos químicos.

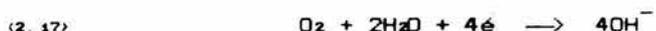
Todas las reacciones anteriores son muy similares -en todas ellas se consumen electrones.

Las reacciones parciales anteriormente expuestas pueden usarse para interpretar virtualmente todos los problemas de corrosión. Considere lo que sucede cuando el hierro se sumerge en agua o en el agua de mar y se expone a la atmósfera (ejemplos de esto son las defensas de automóviles o los pilotes de hierro de los muelles) ocurre la corrosión. La reacción anódica es:



Debido a que el medio corrosivo se encuentra expuesto a la

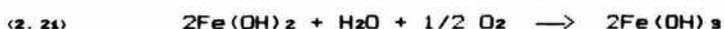
atmósfera, se disuelve oxígeno adentro de este. El agua y el agua de mar son casi neutras por lo que la reacción catódica es :



Recordando que los iones de sodio y cloro no participan en la reacción, la reacción total puede obtenerse sumando las ec. (2.13) y (2.17).

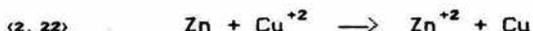


El hidróxido ferrroso precipita dentro de la solución. Sin embargo este compuesto es inestable en soluciones oxigenadas, ya que se oxida a la sal férrica:

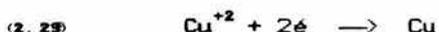
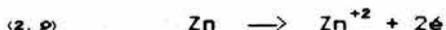


El producto final es la familiar herrumbre.

El ejemplo clásico de una reacción de sustitución es la interacción de zinc con la solución de sulfato de cobre, que ilustra la deposición de metal:



o vista como reacciones parciales



El zinc inicial se recubre con cobre y eventualmente los productos son cobre esponjoso y solución de sulfato de zinc.

Durante la corrosión, puede ocurrir más de una reacción de oxidación y más de una reacción de reducción. Cuando una aleación es corroída, sus componentes metálicos van a la solución en forma de sus respectivos iones. Muy importante es el hecho de que puede ocurrir más de una reacción durante el fenómeno de corrosión. Si consideramos la corrosión de zinc provocada por ácido clorhídrico

aereado. Las dos reacciones catódicas posibles son: la evolución

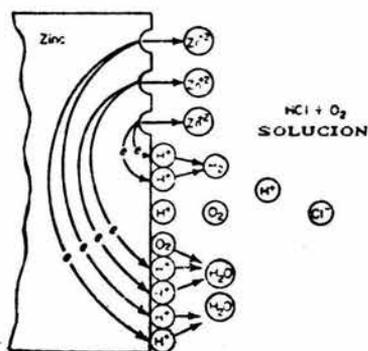


Figura 2.5. Reacciones electroquímicas que ocurren durante la corrosión del zinc provocada por el ácido clorhídrico aereado.

del hidrógeno y la reducción del oxígeno. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 2.5. Sobre la superficie del zinc hay dos reacciones que consumen electrones. Debido a que las velocidades de oxidación y de reducción deben ser iguales, al aumentar la velocidad total de reducción aumenta la velocidad de formación de la solución de zinc. Por lo tanto, las soluciones ácidas que contienen oxígeno disuelto pueden ser más corrosivas que los ácidos que no contienen aire. La simple reducción de oxígeno provee un nuevo medio de "deposición de electrones". El mismo efecto se observa si cualquier oxidante se encuentra presente en la solución ácida.

La reducción del oxígeno se elimina evitando el contacto de la solución acuosa con el aire o bien removiendo el aire que se

encuentre disuelto. Por lo que el hierro no se corroerá en agua libre de aire o en agua de mar con esta misma característica, ya que no hay posibilidad de que se lleve a cabo a la reacción catódica.

2.2.5. Polarización.

La velocidad de una reacción electroquímica esta limitada por diversos factores físicos y químicos, por lo que se dice que una reacción electroquímica es polarizada o retardada por estos factores ambientales. La polarización puede ser convenientemente dividida en dos tipos diferentes, la polarización por activación y la polarización por concentración.

La polarización por activación se refiere a un proceso electroquímico que está controlado por la secuencia de la reacción en la interface metal electrolito. Esto se puede ilustrar fácilmente considerando la evolución de la reacción sobre el zinc durante el fenómeno de corrosión provocado por la solución de ácido. La figura 2.6 muestra esquemáticamente algunos de los posibles pasos en la reducción de hidrógeno sobre la superficie del zinc. Estos pasos pueden aplicarse también a la reducción de cualquier especie sobre la superficie de un metal. Las especies deben ser primeramente absorbidas o atacar la superficie antes que la reacción pueda proseguir de acuerdo al paso 1. Después de esto, la transferencia del electrón debe ocurrir (paso 2), dando como resultado la reducción de las especies. Como se muestra en el paso 3, los dos átomos de hidrógeno se combinan para formar una molécula de hidrógeno. Esta

molécula de hidrógeno se combina para formar una burbuja de gas hidrógeno (paso 4), que se desprende. La velocidad de reducción de los iones de hidrógeno se controla al controlar la velocidad con que se llevan a cabo estos pasos.

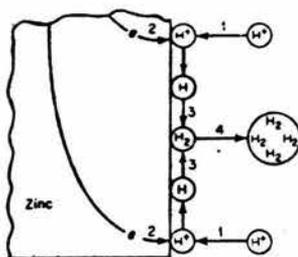


Figura 2.6. Reacción de reducción del hidrógeno bajo el control de activación (simplificada).

Podemos decir que este es un esquema altamente simplificado de la reducción del hidrógeno, comparado con la mayoría de los mecanismos que se han propuesto, la mayoría de los cuales son mucho más complejos que el que se muestra en la figura 2.6.

La polarización por concentración se refiere a reacciones electroquímicas que son controladas por la difusión en el electrolito. Esto se ilustra en la figura 2.7 para el caso de la evolución del hidrógeno. Aquí el número de iones hidrógeno presentes en la solución es muy pequeño y la velocidad de reducción está controlada por la difusión de los iones hidrógeno a la superficie del metal. Note que en este caso la velocidad de reducción está controlada por los procesos que ocurren en el volumen de solución más bien que en la superficie del metal. La polarización por activación es comúnmente un factor controlante

durante la corrosión producida por medios que contienen una concentración alta de especies activas (por ejemplo, ácidos concentrados). La polarización por concentración predomina

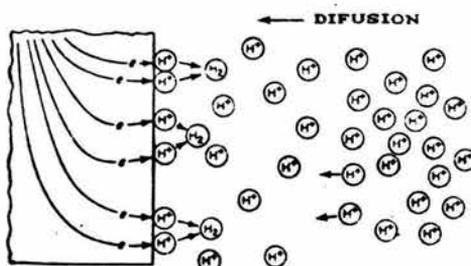


Figura 2.7. Polarización por concentración durante la reducción de hidrógeno.

generalmente cuando la concentración de las especies reducibles es pequeña (por ejemplo, ácidos diluidos, soluciones de sales aereadas) en la mayoría de los casos la polarización por concentración durante la disolución de un metal es comúnmente pequeña y puede ser despreciable, esto es importante sólo durante la reacción de reducción.

La importancia de distinguir entre la polarización por activación y la polarización por concentración no debe ser sobre enfatizada. Dependiendo de que tipo de polarización este controlando la reacción de reducción, las variables ambientales producen diferentes efectos. Por ejemplo, cualquier cambio en el sistema que aumente la velocidad de difusión, disminuirá los efectos de la polarización por concentración y por lo tanto

aumentará la velocidad de reacción.

Si se incrementa la velocidad o la agitación del medio corrosivo se aumentará la velocidad sólo si el proceso catódico esta controlado por la polarización por concentración. Si tanto las reacciones anódica y catódica están controladas por la polarización por activación, la agitación no tendrá influencia sobre la velocidad de corrosión. (7)

2.2.6. Diagramas Potencial-pH.

La reacción de oxidación anódica de un metal está caracterizada por un potencial, que depende del potencial estándar de la reacción de concentración de los iones en la disolución. Estos iones del metal pueden reaccionar con especies presentes en la disolución para formar compuestos insolubles, como hidróxidos, óxidos, sulfuros, etc., u otros compuestos, como iones complejos, por lo cual el potencial de la reacción anódica depende también del producto de solubilidad y otros parámetros característicos de los compuestos formados. Cuando en estas reacciones intervienen directa o indirectamente los iones del agua, el potencial además es función del pH de la disolución.

Como el potencial del proceso está relacionado con la variación de energía libre de la reacción, es posible hallar las condiciones termodinámicas de equilibrio del sistema en función del potencial y expresarlas en términos de pH. Las ecuaciones que especifican las condiciones de equilibrio se representan gráficamente en un diagrama potencial-pH. Estos diagramas, llamados también diagramas de Pourbaix, indican los campos de estabilidad de los metales y de sus compuestos oxigenados en

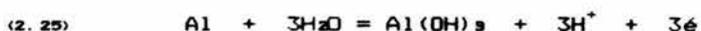
función del potencial y del pH, con lo que queda de manifiesto si son teóricamente posibles determinadas reacciones en medio acuoso. Sin embargo, hay que utilizar con precaución los diagramas, pues en su confección no se tienen en cuenta las condiciones cinéticas de las reacciones.

A continuación se expone de forma simplificada el procedimiento para construir el diagrama de Pourbaix del aluminio. El aluminio se puede presentar como aluminio metálico, ion aluminio en disolución y óxido de aluminio hidratado, de modo que se deben considerar sus equilibrios de hidrólisis, y como el aluminio tiene carácter anfótero, también hay que pensar en la solubilización del óxido en medio básico.

La tabla 2.1 da las energías libres estándar de formación de las especies antes indicadas, a la temperatura de 25°C, a partir de las cuales pueden calcularse las expresiones de los equilibrios a considerar. El aluminio metálico se puede disolver anódicamente según los tres procesos siguientes, para los que se calculan las ecuaciones del potencial,



$$(2.24) \quad E = 1,663 + 0,0197 \log c \text{ Al}^{3+}$$



$$(2.26) \quad E = -1,550 - 0,059\text{pH}$$



$$(2.28) \quad E = 1,262 - 0,0788\text{pH} + 0,0197 \log c \text{ AlO}_2^-$$

Además, el agua puede intervenir en los equilibrios indicados a continuación, para los que se calculan las solubilidades.



$$(2.30) \quad \log c \text{ Al}^{3+} = 5,70 - 3\text{pH}$$



$$(2.92) \quad \log c \text{AlO}_2^- = -14,60 + \text{pH}$$

El potencial del proceso es independiente del pH, por lo que en el diagrama de la figura 2.8 viene representado por una línea

TABLA 2.1. ENTALPIAS LIBRES DE FORMACION DE LAS ESPECIES QUE INTERVIENEN EN LA DISOLUCION ANODICA DEL ALUMINIO.

ESPECIE	$-\Delta G_f^\circ / \text{KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Al (metal)	0
Al^{3+} (en disolución)	481.16
AlO_2^- (en disolución)	839.77
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($\text{Al}(\text{OH})_3$)	2920.45
H_2O	237.19
H^+ (en disolución)	0
OH^- (en disolución)	157.30

horizontal paralela al eje de pH. Este proceso tiene lugar mientras los iones Al^{3+} no pueden precipitar como hidróxido, es decir, hasta que el pH toma el valor correspondiente a la formación del hidróxido, que de acuerdo con la ecuación (2.29), se produce a partir del pH 1,9 para concentración de ion aluminio igual a la unidad. Como la relación es independiente del potencial, la separación entre la zona del ion Al^{3+} y la zona del Al_2O_3 es una línea vertical paralela al eje del potencial. A pH superior, el aluminio metálico se oxida directamente a hidróxido, según la reacción (2.25), que en el diagrama viene representada por una línea de pendiente 0,059. Esta línea debe encontrarse con las anteriores en el punto de pH 1,9. A pH suficientemente alto,

el hidróxido se disuelve en forma de AlO_2^- , de acuerdo con la reacción (2.31), a partir del pH 14,6 para concentración de AlO_2^- igual a la unidad. A valores de pH superiores a 14,6, el aluminio

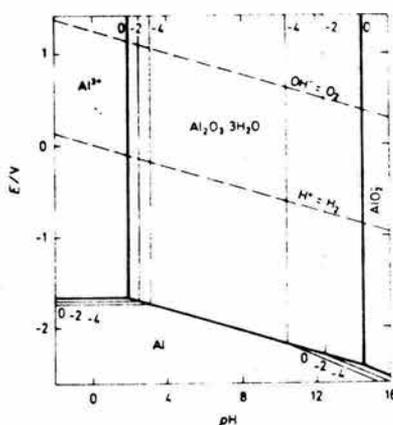


Figura 2.8. Diagrama de equilibrio potencial-pH del sistema aluminio-agua a la temperatura de 25°C.

metálico se oxida directamente a AlO_2^- , y como se indica en la ecuación (2.28), a esta reacción le corresponde una línea de pendiente 0,0788. A pH 14,6, el potencial de equilibrio de formación AlO_2^- coincide con el de formación del $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ y es igual a -2.4 V aproximadamente.

A partir de estos datos queda pues fijado el diagrama de Pourbaix de la figura 2.8., para el sistema del aluminio-agua a la temperatura de 25°C. Sobre el diagrama quedan delimitadas las zonas de estabilidad termodinámica de cada una de las especies consideradas. En la zona inferior y a los potenciales más negativos es estable el aluminio metálico, el cual a pH bajos y a

medida que el potencial va siendo menos negativo se oxida a Al^{3+} , con lo que aparece una zona de estabilidad para este ion. Al aumentar el pH se forma $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, que es termodinámicamente

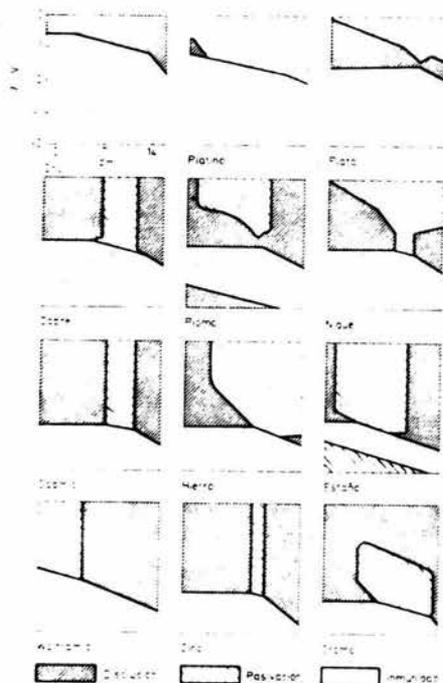


Figura 2.9. Diagramas potencial-pH de diversos metales a la temperatura de 25°C.

estable en una amplia zona central del diagrama. A pH altos se disuelve $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, formando AlO_2^- , cuya zona de estabilidad aparece a pH elevados a la derecha del diagrama. Las líneas de trazos representan los potenciales de equilibrio del hidrógeno y del oxígeno en función del pH.

Sobre el diagrama aparecen definidas la zona de inmunidad, donde el metal es termodinámicamente estable, la zona de

disolución activa, donde el metal se oxida a especies solubles, y la zona de pasivación, donde se forma una película de productos insolubles sobre el metal. La figura 2.9. recoge los diagramas simplificados de varios metales, ordenados según su estabilidad termodinámica, con indicación de las zonas de inmunidad, disolución y pasivación correspondientes.

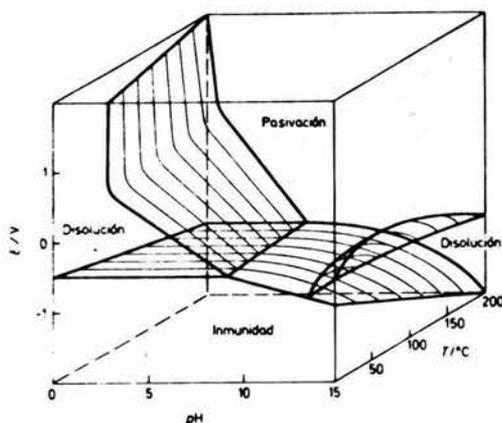


Figura 2.10. Diagrama potencial-pH-temperatura para el hierro.

Como se ha indicado antes, los datos empleados para la confección de un diagrama corresponden a una temperatura determinada⁵. La figura 2.10 representa el efecto de la temperatura sobre el comportamiento anódico del hierro mediante un diagrama tridimensional. Este diagrama es puramente indicativo, dado que tanto el pH como la composición de la disolución son

Al variar la temperatura cambia la magnitud de los parámetros y la forma del diagrama puede resultar sensiblemente alterada.
 Costa, J. M., Fundamentos de Electrodica: Cinética Electroquímica y sus aplicaciones, Alhambra, España, p. 325, (1981).

función también de la temperatura. (8)

2.2.7. Pasividad.

El fenómeno de pasividad metálica es difícil de definir debido a su naturaleza compleja y a las condiciones específicas bajo las que ocurre⁶. Esencialmente, la pasividad se refiere a la pérdida de reactividad química experimentada por ciertos metales y aleaciones bajo condiciones ambientales particulares. Es decir, que ciertos metales y aleaciones se vuelven inertes y actúan como si fueran metales nobles como el platino y el oro. Afortunadamente para la ingeniería, los metales más susceptibles a este tipo de comportamiento son los materiales estructurales y de ingeniería más comunes, incluido el hierro, el níquel, el silicón, el cromo, el titanio y las aleaciones de estos metales. También bajo condiciones limitadas otros metales como el zinc, el cadmio, el estaño, el uranio y el torio pueden exhibir efectos pasivantes.

La pasividad, aunque difícil de definir, puede ser descrita cuantitativamente tomando en cuenta el comportamiento característico de los metales que muestran este efecto inusual. Considerando primero el comportamiento que puede ser llamado

normal en un metal, es decir, un metal que no muestra efectos de

⁶ Uhlig, Herbert H. en su "Corrosion Handbook", ed. John Wiley and Sons, N. U. (1986) nos dice que; "la pasividad es una propiedad de los metales que se puede definir de dos formas. Una de ellas se base en el comportamiento electroquímico del metal y la otra en su comportamiento ante la corrosión. Estas definiciones pueden ser resumidas como sigue:

Definición 1. Un metal activo dentro de la serie EMF, o una aleación compuesta de dichos metales, se considera que su comportamiento electroquímico disminuye apreciablemente o es similar al de un metal noble.

Definición 2. Un metal o aleación esta pasivada si resiste apreciablemente la corrosión en un ambiente en el que termodinámicamente existe una gran disminución de la energía libre, asociada con su paso del estado metálico a los productos apropiados de corrosión.

pasividad, podemos ilustrar este comportamiento en la figura 2.11. Asumiendo que tenemos un metal sumergido en una solución de ácido libre de aire que contiene un oxidante fuerte y designándolo como el punto A podemos tener su velocidad de corrosión

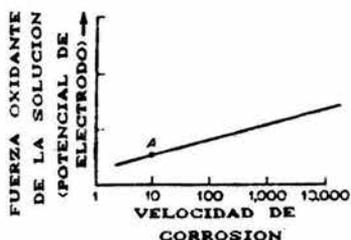


Figura 2.11. Velocidad de corrosión de un metal como función de la fuerza oxidante de la solución (potencial de electrodo).

correspondiente. Si se incrementa el contenido del oxidante fuerte en la solución, adicionando iones ferrícos o iones de oxígeno, la velocidad de corrosión del metal se incrementará rápidamente. El incremento en la velocidad es exponencial y se convierte en una línea recta cuando se grafica en una escala semilogarítmica como se muestra en la figura 2.11. La fuerza oxidante de la solución está controlada tanto por la fuerza oxidante del agente específico como por la concentración del mismo.

La figura 2.12 ilustra el comportamiento típico de un metal que no muestra efectos de pasividad. El comportamiento de este metal puede ser convenientemente dividido en tres regiones, activa, pasiva y transpasiva. En la región activa, el comportamiento de este material es idéntico al de un metal normal. Un ligero incremento en la fuerza de oxidación de la solución ocasiona un rápido incremento en la velocidad de corrosión que corresponde al inicio de la región pasiva. Un nuevo aumento en la concentración

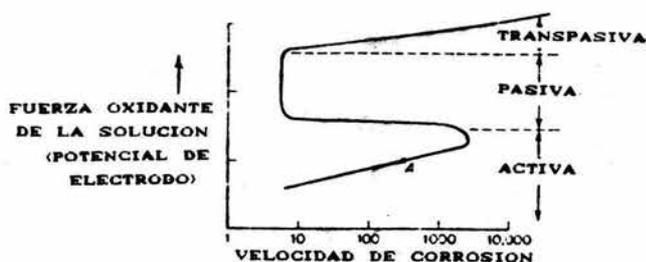


Figura 2.12. Corrosion característica de un metal activo pasivo como función de la fuerza oxidante de la solución (potencial de electrodo).

del agente oxidante produce sólo un ligero cambio en la velocidad de corrosión del material. Finalmente con una concentración muy alta de oxidante, o con la presencia de oxidantes muy fuertes, la velocidad de corrosión vuelve a aumentar con el aumento de la fuerza oxidante. Esta región se califica como transpasiva.

Es importante hacer notar que durante la transición de la región activa a la región pasiva, se observa una reducción de 10^3 a 10^6 en la velocidad de corrosión.

2.3 EFECTOS AMBIENTALES:

Frecuentemente en las industrias de proceso, se desea cambiar las variables del proceso, pero antes de hacer estos cambios debemos preguntarnos, que efectos tendrán estos sobre la velocidad de corrosión.

2.3.1. Efectos del Oxígeno y de los Agentes Oxidantes.

Los efectos de los agentes oxidantes sobre la velocidad de

corrosión se pueden representar por la gráfica de la figura 2.13. Note que la forma de esta gráfica es similar a la de la figura 2.12 y al igual que esta se divide en tres secciones diferentes. El comportamiento correspondiente a la sección 1 es característico de los metales normales y también de los metales activo-pasivos cuando existen sólo en su estado activo. Para los metales que muestran transición de la región activa a la región pasiva, la pasivación sólo tiene lugar si se adiciona la cantidad suficiente de agente oxidante o un agente fuertemente oxidante a el medio. El aumento en la velocidad de corrosión con el aumento en la concentración del agente oxidante de la sección 1 es característico del Monel y del cobre en las soluciones de ácidos que contienen oxígeno. Los dos materiales no se pasivan. Aunque el hierro puede pasivarse con la presencia de agua, por que en ella la solubilidad del oxígeno esta limitada y en la mayoría de los casos es suficiente para producir un estado pasivado como se muestra en la figura 2.12.

En los metales activo-pasivos, en las aleaciones como el acero inoxidable 18Cr-8Ni y el titanio, es característico observar un incremento en la velocidad de corrosión seguida de una disminución rápida, que da lugar posteriormente a una velocidad de corrosión que es esencialmente independiente de la concentración del agente oxidante.

Si un metal activo-pasivo está inicialmente pasivado en un medio corrosivo, la adición de agentes oxidantes tiene un efecto despreciable sobre la velocidad de corrosión. Esto ocurre frecuentemente cuando un metal activo-pasivado es sumergido en un medio oxidante como el ácido nítrico o el cloruro férrico. Por

otra parte, el comportamiento representado por las secciones 2 y 3 resultan cuando un metal, inicialmente en estado pasivado, es



Figura 2.13. Efectos de los agentes oxidantes y la aeración sobre la velocidad de corrosión.

expuesto a un agente oxidante muy fuerte y sufre una transición a la región transpasiva. Este tipo de comportamiento se observa frecuentemente con el acero inoxidable cuando se adicionan al medio corrosivo, en el que se encuentra sumergido, agentes muy oxidantes como los cromatos. En las mezclas calientes de nitratos que contienen ácido sulfúrico y ácido nítrico concentrados, se observa una transición completa de la región activa a la región pasiva y de esta última a la región transpasiva, al incrementarse la relación de ácido nítrico y ácido sulfúrico.

Se observa rápidamente, que el efecto de la adición de agentes oxidantes o la presencia de oxígeno sobre la velocidad de

corrosión, depende tanto del medio como de los metales involucrados. De la adición de agentes oxidantes al medio podemos decir que se observan tres comportamientos con respecto a la velocidad de corrosión; (1) la velocidad de corrosión aumenta con la adición de estos agentes, (2) estos agentes pueden no tener ningún efecto sobre ella y (3) se puede observar un comportamiento complejo. Pero, en muchos casos, conociendo las características básicas de un metal o aleación y del ambiente al cual está expuesto, es posible predecir el efecto que tendrá la adición de agentes oxidantes.

2.3.2. Efectos de la Velocidad.

Los efectos de la velocidad del medio sobre la velocidad de corrosión, al igual que los efectos producidos por la adición de agentes oxidantes, son complejos y dependen de las características del metal y del ambiente al cual está expuesto. La figura 2.14. muestra el comportamiento típico del metal cuando la velocidad de agitación o la velocidad de la solución se incrementa. Para los procesos de corrosión que están controlados por la polarización por activación, la agitación y la velocidad de la solución no tienen ningún efecto sobre la velocidad de corrosión como se ilustra en la curva B. Si el proceso de corrosión está bajo el control de una difusión catódica, la agitación incrementa la velocidad de corrosión como se muestra en la curva A, sección 1. Este efecto ocurre generalmente cuando el agente oxidante se encuentra presente en cantidades muy pequeñas, como en el caso de oxígeno disuelto en ácidos o agua.

Si el proceso está bajo el control de la difusión y el metal es

rápido pasivado, entonces el comportamiento corresponde a la curva A, secciones 1 y 2. Esto es, cuando se incrementa la agitación, el metal sufre una transición de activo a pasivo. Los materiales fáciles de pasivar, como el acero inoxidable y el titanio, frecuentemente son más resistentes a la corrosión cuando la velocidad del medio corrosivo es alta.

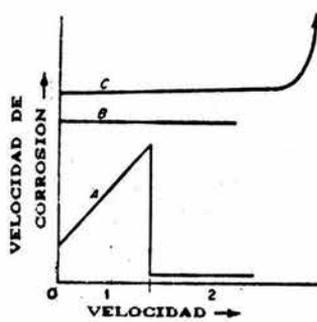
Algunos metales deben su resistencia a la corrosión en ciertos medios, a la formación de gruesas películas protectoras sobre su superficie. Estas películas difieren de las películas comunes de pasivación en que se pueden ver rápidamente y en que son menos retentivas.

Tanto el plomo como el acero se encuentran protegidos del ataque del ácido sulfúrico por películas de sulfatos insolubles, pero cuando estos materiales son expuestos a velocidades de corrosión extremadamente altas, se pueden producir daños mecánicos o la remoción de la película protectora, que ocasionan un ataque acelerado como se muestra en la curva C. Este fenómeno se llama corrosión por erosión y será discutido más adelante. Note que en el caso de la curva C, que hasta que ocurren los daños mecánicos, los efectos provocados por la agitación o la velocidad de la solución son despreciables.

2.3.3. Efectos de la Temperatura.

La temperatura incrementa la velocidad de corrosión de casi todas las reacciones químicas, como se puede observar en la figura 2.15, en la que se ilustran los dos efectos más comunes que tiene la temperatura sobre la velocidad de corrosión de los metales. La curva A representa el caso en el que al aumentar la

temperatura, la velocidad de corrosión del metal aumenta muy rápidamente o de forma exponencial. Mientras que la curva B, describe un comportamiento que se observa frecuentemente, y en el que se observa que a temperaturas bajas no se presenta ningún efecto sobre la velocidad de corrosión, mientras que a temperaturas elevadas ésta aumenta rápidamente. En el caso del



EJEMPLOS

Curva A:

1: Fe en $H_2O + O_2$
Cu en $H_2O + O_2$

1-2: 18Cr-8Ni en $H_2SO_4 + Fe^{+3}$
Ti en HCl + Cu^{+2}

Curva B: Fe en HCl diluido
18Cr-8Ni en H_2SO_4

Curva C: Pb en H_2SO_4 diluido
Fe en H_2SO_4 concentrado

Figura 2.14. Efectos de la velocidad de la solución sobre la velocidad de corrosión.

acero inoxidable 18-8 en presencia de ácido nítrico se presenta este efecto de forma rápida. El aumento de temperatura del ácido nítrico incrementa en demasía su fuerza oxidante, pero a temperaturas bajas o moderadas, el acero inoxidable que se encuentra en un estado pasivado muy cercano a la región transpasiva, se puede exponer al ácido nítrico. Con este ejemplo

podemos darnos cuenta que un incremento en la fuerza oxidante ocasiona un aumento rápido de la velocidad de corrosión de estos materiales. Un comportamiento similar se observa en el Monel y el níquel, la figura 2.15 nos lo ilustra. Aunque es posible, en muchos casos, que las curvas como la B representen un comportamiento erróneo. Si la velocidad de corrosión a bajas temperaturas es muy lenta y aumenta exponencialmente con el aumento de temperatura, entonces podemos graficar estos datos para obtener la curva B. Es decir, que la velocidad de corrosión aumenta rápidamente con la temperatura, pero este aumento no es evidente en las gráficas comunes de velocidad de corrosión vs temperatura debido a una mala selección de escala.

2.3.4. Efectos de la Concentración del Agente Corrosivo.

La figura 2.16 muestra esquemáticamente los efectos de la concentración del agente corrosivo sobre la velocidad de corrosión. Note que la curva A tiene dos secciones, denominadas con los números 1 y 2. Muchos materiales que se encuentran pasivados no se ven afectados cuando cambia la concentración del agente corrosivo, como se muestra en la curva A, sección 1. Mientras que otros muestran un comportamiento similar, excepto cuando se tienen concentraciones muy altas del agente corrosivo, que ocasiona que la velocidad de corrosión aumente rápidamente como se muestra en la curva A en sus secciones 1 y 2. El plomo es un material que muestra este tipo de efectos, debido al hecho de que el sulfato de plomo forma una película protectora cuando se encuentra en contacto con concentraciones bajas de ácido sulfúrico y se vuelve soluble cuando está en contacto con ácido sulfúrico

concentrado. Los ácidos que son solubles en agua a todas sus concentraciones tienen un comportamiento muy similar al descrito por la curva B de la figura 2.16, en la que inicialmente al

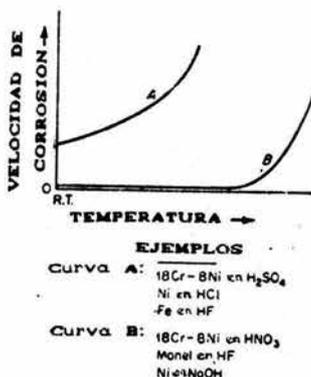


Figura 2.15. Efectos de la temperatura sobre la velocidad de corrosión.

aumentar la concentración del agente corrosivo, aumenta la velocidad de corrosión. Sin embargo, si la concentración del ácido se vuelve a incrementar, la velocidad de corrosión alcanza un máximo para después disminuir. Este fenómeno se debe indudablemente a el hecho de que las concentraciones muy elevadas de ácido ionizados reducen la velocidad de corrosión. Debido a esto, muchos de los ácidos comunes como el ácido sulfúrico, el ácido acético y el ácido fluorhídrico, entre otros, son virtualmente inertes en su estado puro o al 100% de concentración y a temperaturas moderadas.

2.3.5. Efectos de los Pares Galvánicos.

En muchas aplicaciones prácticas el contacto entre materiales diferentes es inevitable. En muchos procesos que constan de

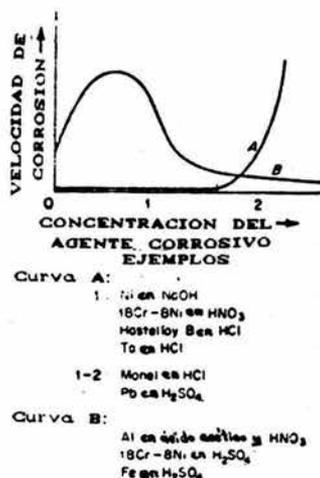


Figura 2.16. Efectos de la concentración del agente corrosivo sobre la velocidad de corrosión.

arreglos de tuberías complejos, se encuentran frecuentemente en contacto directo metales y aleaciones diferentes rodeados por el mismo medio corrosivo. El efecto de los pares galvánicos será considerado en detalle más adelante, por lo que aquí sólo se menciona brevemente. Consideremos una pieza de zinc sumergida en una solución de ácido clorhídrico y en contacto con un metal noble como el platino (fig. 17). Ya que el platino que es inerte en este medio, tiende a aumentar la superficie en la que puede ocurrir evolución del hidrógeno. Por otra parte, la evolución del hidrógeno ocurre mucho más rápidamente sobre la superficie del platino que sobre la del zinc. Estos dos factores incrementan la

velocidad de corrosión del zinc. Note que el efecto del par galvánico en este caso es casi idéntico al que se produce cuando se adiciona un agente oxidante a una solución corrosiva. En ambos

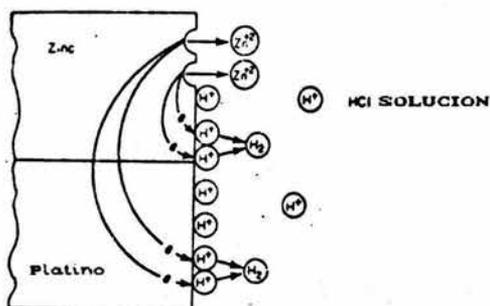


Figura 2.17. Reacciones electroquímicas que ocurren en un par galvánico de zinc y platino.

casos, la velocidad con que se consumen los electrones aumenta y por lo tanto la velocidad de disolución del metal también. Es importante reconocer que los pares galvánicos no siempre aumentan la velocidad de corrosión de un metal dado, sino que en algunos casos disminuye la velocidad de corrosión. Este caso será discutido más adelante.

2.4. ASPECTOS METALURGICOS:

2.4.1. Propiedades Metálicas.

Los metales y sus aleaciones son sólidos cristalinos, es decir, que sus átomos forman un arreglo regular que se repite a lo largo de su estructura. Los tres arreglos cristalinos más

comunes se ilustran en la figura 2.18. El hierro y el acero tienen una estructura cúbica centrada en el cuerpo, la de los aceros inoxidable es cúbica centrada en la cara y la del magnesio es hexagonal cerrada. Las propiedades metálicas difieren de las de otros sólidos cristalinos como los materiales cerámicos y las sales químicas. Los metales son dúctiles (pueden deformarse sin llegar a fracturarse) y buenos conductores de la electricidad y el calor. Estas propiedades son resultado del tipo de enlaces que tienen los metales -cada átomo está unido a muchos otros átomos que lo rodean. Por lo que sus estructuras cristalinas son simples y cerradas como se muestra en la figura 2.18. La ductilidad es probablemente la propiedad más importante de los metales, esta les permite ser fabricados en una cantidad ilimitada de formas, por otra parte, cuando se encuentran soportando grandes cargas, conservan su plasticidad antes de fracturarse. Esta propiedad es invaluable en las aplicaciones de ingeniería.

Cuando un metal se solidifica durante su fundición, los átomos que se encuentran distribuidos al azar en el estado líquido, se arreglan para dar una estructura cristalina ordenada. Sin embargo este ordenamiento comienza comúnmente en puntos diferentes del líquido formando bloques cristalinos o granos en los que existen fallas de acoplamiento. Cuando el metal se ha solidificado y enfriado, tendrá numerosas regiones desacopladas entre cada grano o bloque. Estas regiones se llaman límites de granos. La figura 2.19 muestra este fenómeno utilizando dos dimensiones para representar los límites de grano. Debido a que la configuración

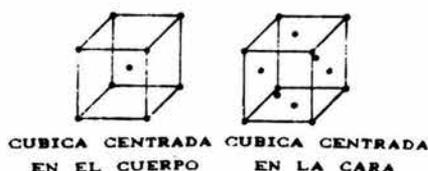


Figura 2. 18. Estructuras cristalinas metálicas.

más estable del metal es una estructura cristalina, los límites de grano son áreas con alta energía y químicamente más activas, por lo que comúnmente son atacadas un poco más rápido que las caras del grano cuando se exponen a un agente corrosivo. El grabado metalográfico depende en muchos casos de la diferencia de reactividad química desarrollada por el contraste entre granos.

Las aleaciones son mezclas de dos o más metales o elementos. Existen dos tipos de aleaciones -homogéneas y heterogéneas. Las aleaciones homogéneas son soluciones sólidas, es decir, que los componentes son completamente solubles entre si, por lo que se forma una sola fase. El acero inoxidable 18-8 es un ejemplo de aleación homogénea o solución sólida. El hierro, el níquel, el cromo y el carbón se disuelven completamente por lo que la aleación tiene una composición uniforme. Las aleaciones heterogéneas son mezclas de dos o más fases separadas. Los

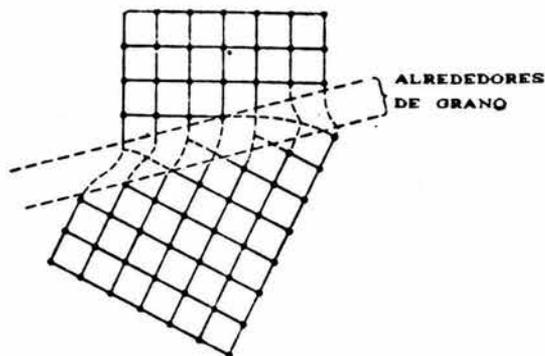


Figura 2. 19. Alrededores de grano en un metal policristalino (representado en dos dimensiones).

componentes de tales aleaciones no son completamente solubles y existen como fases separadas. La composición y la estructura de estas aleaciones no son uniformes. Cada tipo de aleación tiene ventajas y desventajas. Las aleaciones que son soluciones sólidas, son generalmente más dúctiles y tienen una resistencia mecánica menor que las aleaciones heterogéneas. La selección adecuada de cada una de ellas, depende de las propiedades mecánicas que se deseen. Las aleaciones homogéneas son comúnmente más resistentes a la corrosión que las aleaciones con dos (o más) fases, ya que en ellas no se presentan los pares galvánicos.

Las aleaciones son muy similares a las soluciones acuosas. Algunas sustancias pueden disolverse en ellas mientras que otras son insolubles. La solubilidad aumenta rápidamente cuando aumenta la temperatura. Por ejemplo, el carburo de hierro es completamente soluble en el hierro a temperatura elevada, por lo que el acero se convierte en una solución sólida cuando se calienta a temperaturas

elevadas. En ellas también puede presentarse la precipitación de una fase, cuando la solución sólida se encuentra sobresaturada, como en las soluciones líquidas. Como se dijo anteriormente, las áreas que comprenden los límites de grano, son áreas con un contenido alto de energía y es por esto que muy frecuentemente la precipitación comienza en la interfase del grano.

Otras diferencias del metal pueden ser de naturaleza química, metalúrgica o mecánica. Ejemplo de ellas son las impurezas tales como óxidos u otros agentes, orientación de granos, diferencias en la formación de la microestructura, precipitación de fases, cargas localizadas, rayas y muescas. Cabe aclarar que los metales puros son más resistentes a la corrosión que los materiales comerciales. Por ejemplo, el zinc muy puro y pulido no es corroído por el ácido clorhídrico puro, mientras que por el contrario el zinc comercial reacciona rápidamente. Pero, los metales puros son más caros y débiles.

2.4.2. Corrosión por Tiña.

La importancia de la estructura metalúrgica se ilustra con el fenómeno de la corrosión por tiña. Durante la formación en caliente o la operación de vaciado del acero, este se encuentra sujeto a muchos gradientes de temperatura. Estos gradientes térmicos ocasionan variaciones en la estructura metalúrgica del acero, que hacen que en las secciones expuestas a temperaturas intermedias, el carburo de hierro se una para formar esferas. Durante la exposición, estas secciones estrechas son corroídas preferencialmente, dándole una apariencia particular a las áreas

atacadas que ha sido designada con el término de "tifa". Este tipo de ataque se puede eliminar si se recoce la pieza de acero y después se forja, para obtener así una estructura uniforme.

2.5. TIPOS DE CORROSION:

2.5.1. Clasificación de los Tipos de Corrosión.

La corrosión ha sido clasificada en diferentes formas. Unos métodos la dividen en corrosión de baja temperatura y en corrosión de alta temperatura. Otros la separan en combinación directa (u oxidación) y en corrosión electroquímica. Y otros más en corrosión húmeda y corrosión seca⁷. Preferimos esta última clasificación por considerarla más apropiada.

La corrosión húmeda ocurre cuando un líquido se encuentra presente, por lo regular involucra soluciones o electrolitos. La corrosión seca ocurre en ausencia de fase líquida o por arriba del punto de rocío del ambiente y está asociada, por lo regular, con las altas temperaturas.

La presencia de pequeñas cantidades de humedad pueden cambiar completamente el cuadro de corrosión. Por ejemplo, el cloro seco prácticamente no corroe al acero común, pero el cloro húmedo o el cloro disuelto en agua, es extremadamente corrosivo y ataca a la mayoría de los metales y aleaciones comunes. El caso contrario se aplica a el titanio -el cloro gaseoso seco es más corrosivo para este metal, que el cloro húmedo.

⁷ Fontana and Greene, "Corrosion Engineering". Op. Cit. Pag 6.

2.5.2. Expresiones para la Velocidad de Corrosión.

La velocidad de corrosión ha sido expresada en una gran variedad de formas, como se lista en la tabla 2.2. De estas expresiones podemos decir que la pérdida de peso expresada en gramos o miligramos y el por ciento de cambio de peso de los materiales después de ser expuestos al ambiente corrosivo son formas pobres para expresar la resistencia a la corrosión, ya que es obvio que ambas expresiones pueden ser influenciadas por el tiempo de exposición.

El siguiente grupo de expresiones son meras variaciones de la expresión generalizada de la pérdida de peso por unidad de área por unidad de tiempo. La expresión de miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd) se usa comúnmente en las literaturas de corrosión Inglesa y Americana. A diferencia de las dos primeras expresiones, esta incluye el efecto del área y del tiempo de exposición sobre la velocidad de corrosión. Sin embargo, todas ellas tienen serias desventajas -ya que no expresan la resistencia a la corrosión en términos de penetración. Desde un punto de vista ingenieril, la velocidad de penetración o el espesor de una pieza estructural, puede usarse directamente para predecir la vida de un componente dado. Las siguientes cuatro expresiones, que incluyen la penetración en pulgadas por año, la penetración en pulgadas por mes y la penetración en milésimas de pulgada por año (mils por año o mpy), expresan la resistencia a la corrosión directamente en términos de penetración. Desde un punto de vista más estable, se prefiere el uso de milésimas de pulgada por año, ya que la velocidad de corrosión de

**TABLA 2.2. COMPARACION DE LAS EXPRESIONES PARA
LA VELOCIDAD DE CORROSION UTILIZADAS
EN APLICACIONES DE INGENIERIA.**

EXPRESION	COMENTARIOS
Perdida de Peso, gr o mg Perdida de Peso en %	Pobre -la forma de la muestra y el tiempo de exposición tienen influencia sobre los resultados.
Miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd). Gramos por decímetro cuadrado por día. Gramos por centímetro cuadrado -- por hora. Gramos por metro cuadrado por hr. Gramos por pulgada cuadrada por - hora. Moles por centímetro cuadrado por hora.	Buena -pero estas expresiones no dan la velocidad de penetración.
Pulgadas por año. Pulgadas por mes. Milímetros por año.	Mejor que las anteriores -- estas expresiones si dan velocidades de penetración.
Milésimas de pulgada por año (mpy).	La mejor de todas -expresa la velocidad de penetración sin decimales o grandes números.

prácticamente todos los materiales usuales varía aproximadamente entre 1 y 200 mpy. Por lo que usando esta expresión es posible presentar los datos de corrosión con números pequeños y evitando el uso de decimales. Es obvio que la expresión de pulgadas por año y la de pulgadas por mes involucran decimales y numerosos ceros que ocasionan frecuentemente errores cuando se transcriben datos.

Por la razón anterior, la expresión mils por año es más deseable para expresar las velocidades de corrosión y será

utilizada a través de este escrito. Esta expresión se calcula rápidamente a partir de el peso perdido por el metal durante la prueba de corrosión y con la fórmula siguiente: (9)

$$(2.4) \quad \text{mpy} = \frac{534 \cdot W}{DAT}$$

en donde W = peso perdido, mg.

D = densidad del material, g/cm³.

A = Área del material, in².

T = tiempo de exposición, hr.

2.5.3. Corrosión Generalizada.

La corrosión es un fenómeno complejo que puede tomar una o varias formas. Por lo común, se limita a la superficie del metal y esto se conoce como corrosión general; pero hay veces en que tiene lugar a lo largo de los límites de granos u otras líneas débiles, por diferencias en la resistencia a los ataques o una acción electrofítica local.

La corrosión general, es el tipo de ataque más deseable, ya que que permite preveer con cierto grado de seguridad la vida probable del equipo. Desafortunadamente, la mayor parte de la corrosión que ocurre en la práctica de ingeniería es del tipo de corrosión localizada. (10)

2.5.4. Corrosión Localizada.

La corrosión localizada puede definirse como un ataque selectivo a pequeñas áreas especiales o zonas de la superficie de un metal, provocado por el contacto con el ambiente que le rodea. Esto ocurre comúnmente bajo condiciones donde gran parte de la superficie original, no es atacada o es atacada en menor grado que

los sitios localizados.

Existen diversas formas de corrosión localizada dentro de las cuales se encuentra la corrosión por picadura, la corrosión intergranular, la fractura de corrosión por esfuerzo, la corrosión galvánica, la corrosión por hendidura, la corrosión por fatiga entre otras que a continuación iremos describiendo.

Para un mejor conocimiento, las diversas formas de corrosión (figura 2.20), pueden dividirse en tres grupos:

1. Corrosión que se puede reconocer a simple vista.
2. Corrosión que es más fácil clasificar con ayuda específica (por ejemplo, colorantes, partículas magnéticas o microscopio de poca resolución).
3. Corrosión que sólo puede ser identificada con microscopio óptico o con microscopio electrónico.

2.5.4.1. Corrosión por picadura.

Las picaduras son una forma de corrosión que se desarrolla en zonas muy localizadas de una superficie metálica. Esto da como resultado el desarrollo de cavidades y socavamientos, que pueden ir desde las cavidades profundas y de diámetro pequeño a las depresiones relativamente poco profundas^B.

Las picaduras se desarrollan debido a la acción de celdas locales las cuales producen cavidades en la superficie del metal.

^B Si el ataque se limita a áreas del metal relativamente pequeñas, que actúan como ánodo, se dice que las picaduras resultantes son profundas. Mientras que, si el área atacada es relativamente grande y poco profunda, se dice que las picaduras son superficiales. Uhlig, H. H. "Corrosion and Corrosion Control" p. 13 3th ed. John Wiley and Sons, N. Y. (1965).

Estas cavidades pueden contener productos de corrosión, los cuales ocasionan grietas sobre sus bordes, produciéndose de esta forma lo

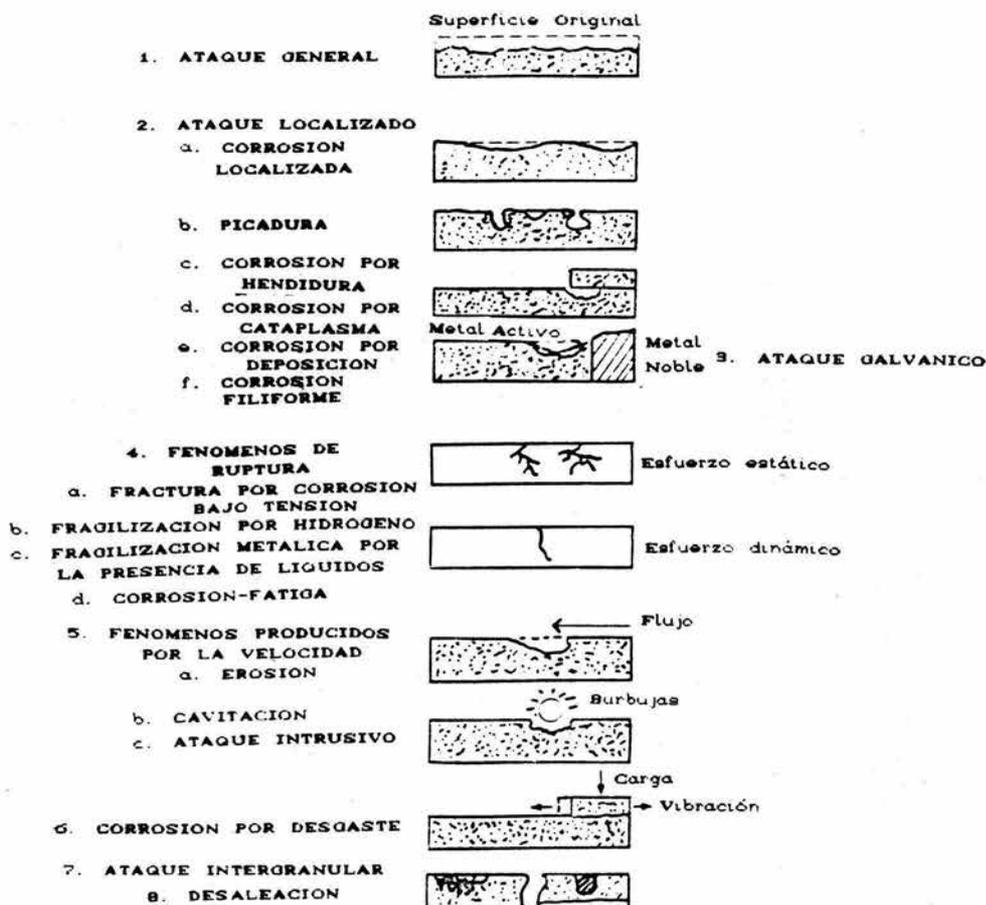


Figura 2. 20. Esquema de la Corrosión

que se conoce como nódulos o tubérculos. La forma de los hoyos

varía ampliamente, estos son comúnmente de forma aproximadamente ovalada, cónica o semiesférica. Sus paredes son irregulares cuando se observa con un microscopio. La forma de las cavidades distingue a la picadura de otros tipos de corrosión localizada (figura 2.21).



Figura 2.21. Ataque bajo depósitos en un tubo condensador.

La picadura ocurre cuando la película protectora del metal no es completamente resistente a la corrosión. Solo una pequeña parte del metal es corroída, pero reparar las picaduras de los equipos caros puede tener un costo elevado. Se ha dicho que la picadura de un metal, ha causado las mayores pérdidas, que ningún otro tipo de corrosión ha ocasionado.

Las picaduras ocurren comúnmente sobre la superficie de un metal sumergido en una solución o que este rodeado de un ambiente húmedo (como el suelo). También puede ocurrir en superficies expuestas a atmósferas que contengan gotitas de agua o humedad condensada, lo que ocasiona que se forme una película sobre la superficie del metal.

Otro lugar en donde se puede presentar picadura es sobre las

superficies metálicas que han sido cubiertas con una película adherente muy delgada, esta se puede formar durante la fabricación o se puede formar por la reacción del metal con el ambiente que lo rodea. Los metales que se ven más frecuentemente atacados por este tipo de corrosión, son el magnesio⁹, el aluminio¹⁰, el titanio¹¹, los aceros inoxidable¹², y el cobre, en medios en donde se desarrollan sus películas protectoras. También puede ocurrir en el hierro, acero, plomo y otros metales. La

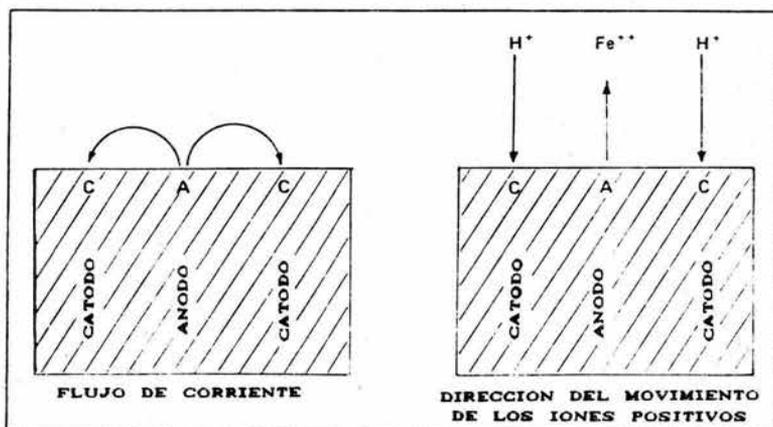


Figura 2.22. Esquema de una celda local que muestra la dirección del flujo de corriente (izquierda) y la migración de los iones (derecha).

- ⁹ Bothwell, M. R., *Pitting Corrosion (of Magnesium)*, The Corrosion of Light Metal, John Wiley and Sons, N. Y., p. 272 (1967).
- ¹⁰ Gordard, H. P., *Pitting Corrosion (of Aluminio)*, John Wiley and Sons, N. Y., p. 49 (1967).
- ¹¹ Kane, R. L., *Localized Corrosion (of Titanium)*, John Wiley and Sons, N. Y., p. 324 (1967).
- ¹² Uhlig, H. H., *Pitting in Stainless Steels and Other Passive Metals*, Corrosion Handbook, John Wiley and Sons, N. Y., p. 103 (1948).

picadura desarrolla manchas ligeras sobre la superficie de la película protectora que la dañan mecánicamente, en algunos lugares, bajo condiciones que no le permiten volver a renovarse.

La importancia práctica de las picaduras depende del espesor del metal y de la velocidad de penetración (que puede ser pequeña), por lo que disminuye con el tiempo. Las picaduras que se presentan sobre las secciones delgadas suelen ser de gran importancia, mientras que las que ocurren en las secciones gruesas pueden no tener ninguna. En general, la velocidad de penetración disminuye si el número de picaduras aumenta. Esto se debe a que las picaduras adyacentes tienen que compartir la misma área catódica, lo que controla la corriente corrosiva que puede fluir.

Cuando una corriente eléctrica deja la superficie del metal y fluye a el ambiente que lo rodea, puede ocasionar que se presente la picadura de dicho metal. La corriente eléctrica puede ser causada por el contacto de la superficie de metales distintos o por una corriente impresa externa.

Teóricamente, una celda local (figura 2.22)¹³ ocasiona la iniciación de la picadura puede ser causada por la presencia de un lugar del medio anormalmente anódico, sobre una superficie que actúa como cátodo o por la presencia de un lugar del medio anormalmente catódico sobre una superficie normal en la que la picadura habrá desaparecido debido a la corrosión. En el segundo

¹³ Por definición, el cátodo (C) es el lugar en el que ocurre la reacción de reducción, o en donde se consumen los electrones. El ánodo es el lugar en el que ocurre la oxidación. Ed. NACE. "Corrosion Basic: An Introduction", p. 23-24, Houston, Texas (1984).

caso, un examen posterior nos revelará la presencia del cátodo local, ya que esta área se encontrará en buen estado. En la mayoría de los casos, se cree que la picadura es causada por la presencia de un área que tiene un cátodo local sobre una superficie normal.

La picadura pasa a través de cuatro estados separados: (1) Iniciación, (2) propagación, (3) terminación y (4) reiniciación. Las causas de la iniciación ya han sido discutidas anteriormente (acción de la celda local). En el estado de propagación, la velocidad aumenta tanto por los cambios en el ambiente anódico como por los del ambiente catódico. (estos se hacen más ácidos o alcalinos, respectivamente). Una picadura termina debido al aumento de la resistencia interna de la celda local (este aumento se debe a que la picadura se llena de los productos de corrosión o el cátodo se cubre de una película protectora, entre otras causas). Si la superficie picada se seca, la picadura puede, por esta razón terminar. Esto puede deberse a el restablecimiento de las condiciones originales o a la diferencia de aereación entre la solución de la cavidad principal y la solución que se encuentra en algunas hendiduras profundas del metal.

Debido a que la picadura sigue un comportamiento electroquímico, esta puede ser detenida con una protección catódica o puede prevenirse con el uso de inhibidores, que alteren las reacciones de electrodo que tienen lugar en la celda local y remuevan su fuerza conductora.

La penetración por picadura también puede prevenirse recubriendo la superficie del metal con una capa de otra aleación

o con recubrimientos protectivos. En algunos casos, la agitación del medio que rodea al metal puede prevenir la picadura, ya que al homogeneizar el medio se evita que en este haya diferencias que pueden originar la picadura.

2.5.4.2. Corrosión por Hendidura o Fisura.

Este tipo de corrosión se produce en una grieta formada por el contacto con otra pieza del mismo u otro metal o con un material no metálico. Cuando ocurre esto, la intensidad del ataque suele ser mayor que en las zonas circundantes de la misma superficie.

Este tipo de corrosión se puede deber a una deficiencia de oxígeno en la hendidura, cambios de acidez en esta última, acumulación de iones o agotamiento de un inhibidor¹⁴.

Si consideramos que la iniciación de la corrosión por hendidura, se debe a mecanismos que produce la diferencia de aereación, podemos decir entonces que el oxígeno del líquido que se encuentra en el fondo de la grieta se consume al reaccionar con el metal mientras que el contenido de oxígeno en el líquido que se encuentra a la entrada de la grieta es mayor, ya que este está expuesto al aire. Esto origina una celda local en la que el ánodo o el área que es atacada, es la superficie que se encuentra en contacto con el líquido en el que el contenido de oxígeno disminuye. Los cambios subsecuentes de pH en los lugares anódico y catódico, favorecen la acción de la celda local, como en el caso de la corrosión por picadura.

La corrosión por hendidura ocurre más comúnmente sobre los

¹⁴ Perry-Chilton, "Manual del Ingeniero Químico" Vol. II, p. 23-9, 2da. Ed. Mexico, D. F. (1982).

metales con películas protectoras como el aluminio, el magnesio, los aceros inoxidable y el titanio.

Este tipo de corrosión puede ser prevenido durante el estado de diseño por la anulación de hendiduras, o durante la construcción mediante el relleno de las mismas con un compuesto unidor durable que evite la humedad y se conserve elástico.

2.5.4.3. Corrosión por Cataplasma.

La corrosión por cataplasma es un caso especial de corrosión localizada debida a diferencia de aereación, que comúnmente toma la forma de picadura cuando un material absorbente como papel, madera, asbesto, tela, etcétera, se encuentra en contacto con una superficie metálica que se humedece periódicamente. Mientras las áreas unidas se encuentran completamente húmedas, no hay señales de deterioro, pero durante el período de secado se desarrollan áreas húmedas y áreas secas adyacentes que favorecen la diferencia de aereación que ocasiona la picadura, como en el caso de la corrosión por hendidura.

La corrosión por cataplasma se previene al evitar el contacto del material absorbente con la superficie metálica, al pintar la superficie que estará en contacto con dichos materiales o diseñando de tal forma que se evite que estos materiales se humedezcan durante su servicio.

2.5.4.4. Corrosión por Deposición.

La corrosión por deposición es una forma de la corrosión por picadura que puede ocurrir en un ambiente líquido cuando un metal

más catódico se recubre con una solución de otro metal superficial. En general, esto ocurre con metales más anódicos como el magnesio, el zinc y el aluminio. Los "activadores" catódicos comunes son el mercurio y los iones de cobre en solución.

Por ejemplo, al pasar agua blanda sobre una tubería de cobre, es probable que se acumulen algunos iones de cobre. Si el agua es puesta después en un recipiente galvanizado o de aluminio, las partículas metálicas de cobre recubrirán al otro metal, depositándose sobre su superficie y estimulando la formación de picaduras por la acción de una celda local.

La corrosión por deposición puede evitarse previniendo la recolección de iones catódicos que puedan introducirse al equipo, o recolectándolos al hacer pasar el producto contaminado por una torre empacada con un metal más anódico, sobre el cual puedan depositarse los iones.

2.5.4.5. Corrosión Filiforme.

La corrosión filiforme es una forma especial de la corrosión que se origina por la celda de concentración de oxígeno, debajo de los revestimientos orgánicos o metálicos aplicados sobre el acero, el aluminio, el zinc o el magnesio. El ataque da como resultado una red de hilos al azar de productos de corrosión que se desarrollan debajo del material recubridor con un acanalado poco profundo de la superficie del metal (figura 2.23). Como el ataque se desarrolla en películas semipermeables expuestas a ambientes altamente húmedos (>60% RH) como recubrimientos de

latas, muebles de oficina, cámaras, estructuras de aviones, interiores y exteriores de autos y muchos otros productos comunes.



Figura 2. 29. Comparación de los filamentos que se desarrollan sobre varias estructuras metálicas.

En la corrosión filiforme la cabeza del filamento que avanza (de 0.1mm. de ancho) se convierte en ánodo, con un pH bajo y escasez de oxígeno, mientras que el área catódica se encuentra inmediatamente atrás de la cabeza, en donde el oxígeno se introduce a través de la película semipermeable. La corrosión se desarrolla con el cátodo que va detrás de la cabeza anódica. La

presencia de agua y oxígeno, en el área catódica, convierten a los productos anódicos en el usual óxido del metal. El ataque intergranular sobre un metal sensitivo, también puede ocurrir por este procedimiento. (11)

2.5.4.6. Corrosión Galvánica.

La corrosión galvánica tiene una velocidad por encima de lo normal, que se asocia con el flujo de corriente a un metal menos activo (cátodo) en contacto con un metal más activo (ánodo) en el mismo ambiente.

Comúnmente existe una diferencia de potencial entre dos metales distintos, cuando se sumergen en una solución corrosiva o conductora. Si estos metales se ponen en contacto (o se conectan de otra forma), esta diferencia de potencial produce un flujo de electrones entre ellos. La corrosión del metal menos resistente aumenta y el ataque al material más resistente disminuye, en comparación con el comportamiento de estos metales cuando no se encuentran en contacto. El metal menos resistente tiene un comportamiento anódico, mientras que el más resistente se comporta catódicamente. Por lo regular el cátodo o el metal catódico se corroe muy poco o no se corroe en este tipo de pares galvánicos. Debido a las corrientes eléctricas y a los metales diferentes que involucra, esta forma de corrosión es llamada corrosión galvánica, o corrosión de dos metales. Esta es una corrosión electroquímica, pero debemos restringirnos al término galvánico de los efectos que se producen por la diferencia de los metales, para mayor claridad.

La fuerza conductora de la corriente y la corrosión es el

potencial desarrollado entre los dos metales.

El potencial entre metales expuestos a soluciones contienen aproximadamente un gramo atómico de sus respectivos iones (actividad unitaria), esta medición se hace a temperatura constante. La tabla 2.3. nos muestra en forma tabulada una serie de fuerzas electromotrices (serie FEM). Por simplicidad, todos los potenciales se refieren con respecto al electrodo de hidrógeno (H_2/H^+), que se a definido arbitrariamente como cero. El potencial de los metales se determina tomando las diferencias absolutas entre sus potenciales estándares de fuerza electromotriz (FEM). No es posible establecer un potencial reversible para las aleaciones que contienen 2 o más compuestos reactivos, por lo que en la tabla 2.3. sólo se listan los metales puros.

En los problemas actuales de corrosión, los pares galvánicos de metales en equilibrio con sus iones raramente ocurren. Como hemos dicho, la mayoría de los efectos de la corrosión resultan de la conexión eléctrica de los dos metales corroíbles. También, debido a que los materiales de ingeniería son aleaciones, los pares galvánicos incluyen por lo regular una (o dos) aleaciones metálicas. Bajo estas condiciones, las series galvánicas listadas en la tabla 2.4. tiene un mayor rango de seguridad en la predicción de las relaciones intermetálicas, que las series de fuerza electromotriz (FEM). La tabla 2.4. se basa en la medida de potenciales y pruebas de corrosión galvánica realizadas por la Compañía Internacional de Níquel de Harbor Island, N.C.

TABLA 2.9. SERIES DE FEM DE METALES

	Equilibrio Metal-ion metálico (act.vidad unitaria)	Potencial de Electrodo como electrodo normal de hidrógeno a 25°C, - volts.
↑ Noble o catódico	Au-Au ⁺²	+1.498
	Pt-Pt ⁺²	+1.2
	Pd-Pd ⁺²	+0.987
	Ag-Ag ⁺	+0.799
	Hg-Hg ₂ ⁺	+0.788
	Cu-Cu ⁺²	+0.337
	H ₂ -H ⁺	+0.000
↓ Activo o anódico	Pb-Pb ⁺²	-0.126
	Sn-Sn ⁺²	-0.136
	Ni-Ni ⁺²	-0.250
	Co-Co ⁺²	-0.277
	Cd-Cd ⁺²	-0.403
	Fe-Fe ⁺²	-0.440
	Cr-Cr ⁺²	-0.744
	Zn-Zn ⁺²	-0.763
	Al-Al ⁺³	-1.662
	Mg-Mg ⁺²	-2.363
	Na-Na ⁺	-2.714
	K-K ⁺	-2.925

Los metales de mayor (en sentido algebraico) potencial de electrodo simple, reducirán a los que tengan potenciales de electrodo simples menores. Los metales que tienen potenciales monoeléctricos algebraicamente grandes se denominan metales activos; los que tienen un potencial pequeño son pasivos. las palabras activo y pasivo son términos relativos. Los metales activos reaccionan con facilidad con los elementos no metálicos, tales como el oxígeno, el azufre y los halógenos. Los metales menos activos incluyen a los nobles, que son tan inertes que, por lo común, no reaccionan con las sustancias metálicas.

Si se conectan eléctricamente pedazos de diferentes metales

**TABLA 2.4. SERIES GALVANICAS DE ALGUNOS METALES Y ALEACIONES
COMERCIALES EN AGUA DE MAR.**

↑ Noble o catódico	Platino
	Oro
	Grafito
	Titanio
	Plata
	Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)
	Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)
	18-8 Mo Acero Inoxidable (pasivado)
	18-8 Acero Inoxidable (pasivado)
	Acero Inoxidable con Cromo 11-30% Cr (pasivado)
↓ Activo o anódico	Iconel (pasivado) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)
	Níquel (pasivado)
	Soldadura de Plata
	Monel (70 Ni, 30 Cu)
	Cuproniquel (80-90 Cu, 40-10 Ni)
	Bronce (Cu-Sn)
	Cobre
	Latón (Cu-Zn)
	Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)
	Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)
	Iconel (activo)
	Níquel (activo)
	Estaño
	Plomo
	Soldadura de Plomo-Estaño
	18-8 Mo Acero Inoxidable (activo)
	18-8 Acero Inoxidable (activo)
	Ni-Resist (Hierro fund. con alto contenido de Ni)
	Acero Inoxidable con Cromo, 13% Cr (activo)
	Hierro Fundido
	Acero o Hierro
	Aluminio 2024 (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)
	Cadmio
	Aluminio comercialmente puro (1400)
	Zinc
	Magnesio y aleaciones de magnesio

limpios y se colocan en un electrolito, el más activo de ellos tenderá a entrar en solución, mientras que el menos activo tiende a ser protegido contra la disolución. Así pues, la serie de fuerza electromotriz indica las tendencias relativas a entrar en solución de los diversos metales. De estos últimos, los que tienen un

potencial menor que el del hidrógeno, no pueden desplazar a éste de los ácidos; es decir que no serán atacados por los ácidos. Los metales que tienen potenciales electródicos grandes desplazarán a los iones de los metales que tengan potenciales electródicos menores de las soluciones.

Las predicciones del comportamiento metálico, basadas en la serie de la fuerza electromotriz, presuponen que los metales que reaccionan tienen superficies limpias y brillantes. Si la superficie de un metal no está limpia o si se cubre con productos de la reacción, las predicciones no son confiables. (12)

Mecanismo de la Corrosión Galvánica. Cuando se conectan dos metales distintos y se sumergen en una solución electrolítica, se forma una celda galvánica. En la figura 2.24 se muestra una celda galvánica típica. Como mencionamos anteriormente, el metal que tenga el potencial mayor tiende a sufrir un ataque y se convierte en ánodo. Cuando este último se disuelve, se deposita en el cátodo una cantidad electroquímicamente equivalente de hidrógeno o del elemento metálico de menor potencial de electrodo, se deposita en el cátodo. En esa forma, el ánodo se disuelve y el cátodo queda protegido. Cuando se disuelve el ánodo, para formar iones, se liberan electrones, que fluyen por cualquier conexión eléctrica presente, y llegan al cátodo. Allí, neutralizan las cargas positivas de los iones que salen de la solución. Inicialmente, esa celda producirá cierto voltaje, dependiendo de los metales que se seleccionen como electrodos, el tipo y la concentración del electrolito y la temperatura de la celda. El

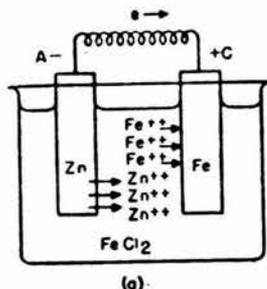


Figura 2.24. En una celda galvanica, se sumergen en un electrolito dos electrodos de diferentes metales. El metal más activo se convierte en el ánodo A, que esta cargado negativamente, y que tiende a ser atacado. El metal menos activo se convierte en el cátodo C, que esta cargado positivamente y tiende a ser protegido. Los electrones fluyen por el conducto conectivo, del ánodo al cátodo.

voltaje disminuirá muy pronto y la rapidez del ataque se hará menor, debido a la polarización, que se produce a causa del vaciado de iones del electrolito en la región del cátodo, y por la excesiva concentración de iones en la zona del ánodo. Si la celda es de tal índole que se descargue hidrógeno en el cátodo y se libere oxígeno en el ánodo, el voltaje de la celda se reducirá todavía más, puesto que los electrodos quedarán recubiertos por burbujas gaseosas. El efecto neto es una disminución de la actividad de la celda, en comparación con la que tenía inicialmente, cuando las dos superficies electródicas limpias se sumergieron en el electrolito.

La rapidez del ataque galvánico depende del área del cátodo en relación a la del ánodo y varía en forma directamente proporcional

a la razón del área del cátodo a la del ánodo. Así pues, un área anódica relativamente pequeña será atacada con mucha mayor rapidez que una grande. (13)

Prevención. Para combatir o minimizar la corrosión galvánica existe cierto número de procedimientos que pueden ser utilizados. Algunas veces un método es suficiente, pero en algunos otros casos es necesario combinar más de uno para obtener buenos resultados. Entre estos métodos se encuentran los siguientes:

1. Seleccionar los metales que se van a poner en contacto, dentro de los que se encuentren más cercanos en la serie galvánica.

2. Evitar el efecto desfavorable de una área de ánodo pequeña y una área de cátodo grande. Algunas partes pequeñas tales como conexiones trabajan bien algunas veces por que poseen menos materiales resistentes.

3. Aislar materiales que sean diferentes en todas las partes que sea posible. Es importante aislar completamente, si es posible.

4. Aplicar recubrimientos con precaución.

5. Evitar en lo que sea posible la interacción con ambientes agresivos, o hacer que esta sea menor.

6. Evitar uniones roscadas de materiales que se encuentren en posiciones muy separadas en la serie galvánica.

7. Diseñar de tal forma que se pueden remplazar las partes anódicas o de que estas tengan un espesor que les permita tener una vida más larga.

8. Instalar un tercer material que sea anódico con respecto a los dos materiales galvánicos en contacto. (14)

2.5.4.7. Corrosión Intergranular.

Este tipo de corrosión se da fundamentalmente en los aceros austeníticos. Si a un acero inoxidable austenítico se le mantiene durante cierto tiempo a temperaturas comprendidas entre 450 y 900°C provoca una precipitación de carburos en los límites de los granos que empobrecen de cromo las zonas contiguas a los mismos.

Si en estas condiciones se le sitúa en medios corrosivos, puede experimentar un ataque intergranular que recibe el nombre de corrosión intergranular (figura 2.25).

Pueden ser causa de la precipitación: tratamientos térmicos mal realizados, calentamientos o enfriamientos defectuosos durante la transformación del acero, los calentamientos sufridos en las zonas cercanas al cordón de soldadura, etc.

Es muy peligroso que un acero quede sensibilizado a la corrosión intergranular, ya que en ocasiones, después de dicho ataque parece que está sano, pero un examen detallado pone de manifiesto que posee muy poca resistencia.

En general, en un acero se manifiesta la corrosión intergranular por su pérdida de brillo y sonoridad, transformándose en quebradizo.

Para proteger a los aceros contra corrosión se pueden adoptar las siguientes medidas:

1. Que el contenido en carbono sea igual o inferior a 0.03%.

De esta manera se elimina la posibilidad de formación de

carburos de cromo.

2. Adicionando al acero estabilizantes ávidos de carbono, tales como el titanio y niobio, para que se formen carburos de dichos elementos y no de cromo. Se puede considerar que un acero está totalmente estabilizado cuando el contenido de titanio es superior a 5 veces el contenido de carbono o bien si el contenido de niobio es 8 veces superior al de carbono.

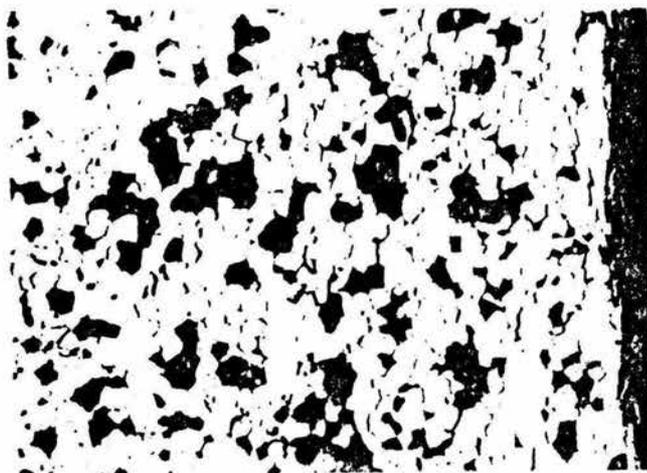


Figura 2.25. Corrosión intergranular en un acero X6CrNi19-10 (UNE F-9504). Precipitando previamente, los carburos a 650 °C durante 200 horas y seguidamente sometido, durante 44 horas, a una solución de sulfato de cobre y ácido sulfúrico.

3. Variando la composición del acero de tal manera que la suma de elementos alfégenos, tales como el cromo y molibdeno, exceda la posición de equilibrio y forme una estructura bifásica austeno-ferrítica. La presencia de ferrita en la matriz austenítica evita la corrosión intergranular, así

como la corrosión bajo tensión.

En el caso de que no se haya adoptado ninguna de las tres medidas y el acero hubiese quedado sensibilizado a la corrosión intergranular como consecuencia de la precipitación de carburos de cromo, será necesario someterle a un temple austenítico (hipertemple) con el objeto de disolver de dichos carburos. (15)

2.5.4.8. Corrosión Transgranular.

La corrosión transgranular es una forma localizada de ataque que se presenta debajo de la superficie metálica en forma de trayectorias estrechas que son corroídas al azar a través de la estructura del grano del metal, sin afectar sus límites (figura 2.26). De tal forma que se desarrollan grietas a través de los granos sin ningún efecto aparente sobre la dirección de la grieta

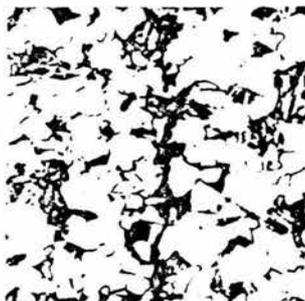


Figura 2.26. Un ejemplo de corrosión transgranular. La línea vertical oscura es la trayectoria del dano ocasionado por la corrosión.

por la presencia del límite del grano. Este agrietamiento se inicia sobre las superficies y prosigue hacia adentro del grano, presumiblemente por la acción de una celda local.

Sorprendentemente, la corrosión transgranular no siempre se trata como un concepto a parte en los libros de texto, y por lo tanto existen diferentes opiniones sobre el mecanismo y la razón del curso que toman las trayectorias corrosivas. Esto puede ocurrir en la corrosión por esfuerzo de las aleaciones de cobre en cierto medio (por ejemplo, amoníaco) y rara vez ocurre en las aleaciones de aluminio.

La corrosión por fatiga ocurre más comúnmente por el agrietamiento transgranular. Sin embargo, en ambos casos, en la corrosión por esfuerzo y la corrosión por fatiga, la penetración puede llevarse a cabo algunas veces de forma intergranular. En otras ocasiones, tanto esta como el ataque transgranular pueden ocurrir conjuntamente. El tipo de penetración, transgranular o intergranular, varía con la aleación y con el ambiente corrosivo.

El ataque transgranular se evita utilizando aleaciones no susceptibles a este tipo de corrosión. (16)

2.5.4.9. Fractura por Corrosión bajo Tensión.

Este fenómeno se refiere al agrietamiento causado por la presencia simultánea de un esfuerzo tensionante y de un medio corrosivo específico. Muchos investigadores han clasificado a las fallas por agrietamiento que ocurren en medios corrosivos como fractura por corrosión bajo tensión, incluyendo en ella a las debidas a la fragilización por hidrógeno. Sin embargo, estos dos tipos de fallas por agrietamiento se deben a diferentes variables ambientales.

La fractura por corrosión bajo tensión ha sido encontrada en

practicamente todos los tipos de aleaciones y es de gran importancia económica.

La fractura por corrosión bajo tensión aparece progresivamente pasando por varios estados. El primero de ellos consiste en la aparición del período de incubación durante el cual el proceso electroquímico de corrosión produce las condiciones necesarias para la propagación del agrietamiento. Este es seguido por la aparición de microgrietas y el crecimiento de las mismas.

El mecanismo de crecimiento de las grietas aun es un poco desconocido, pero en algunos casos la fragilización por hidrógeno o la precipitación de una fase fragilizada de los límites de granos se han visto involucradas. Tanto el período de incubación como el lento crecimiento inicial de las grietas han obstaculizado el estudio del fenómeno. Algunos especímenes han estado en condiciones de esfuerzo en ambientes corrosivos hasta que el agrietamiento aparece. Esto puede ocurrir en cualquier parte en unos pocos minutos o en algunos años.

Existen dos clases de fractura por corrosión bajo tensión, una de ellas es "la estación de agrietamiento" del latón y la otra "la fragilización caústica" del acero. La estación de agrietamiento se refiere a la fractura por corrosión bajo tensión del latón en el caso de los cartuchos. Durante los períodos más intensos de lluvia, especialmente en lugares tropicales, se observaba el agrietamiento de los cartuchos de latón llegando en algunos casos a acanalarse la bala, más tarde se descubrió que durante la estación de agrietamiento se producía amoníaco por la descomposición de materia orgánica y que esta sustancia influía

ampliamente sobre el fenómeno.

Desafortunadamente el ion cloruro es el acelerador más universal de la fractura por corrosión bajo tensión en la atmósfera. Este ion afecta a los aceros con alta resistencia al esfuerzo, a los aceros inoxidable y a las aleaciones de aluminio y magnesio. El amoníaco y los nitratos tienen un efecto adverso sobre las aleaciones de cobre. Los latones bajo tensión ven ampliamente acelerado su agrietamiento por los compuestos nitrogenados.

Las variables importantes que afectan en la fractura por corrosión bajo tensión son la temperatura, la composición de la solución, la composición del metal, el esfuerzo aplicado y la estructura metálica.

La fractura por corrosión bajo tensión da la apariencia de una fractura mecánica mientras que es el resultado de un proceso local de corrosión. En ella actúan tanto la corrosión transgranular como la corrosión intergranular. El agrietamiento debido a la corrosión intergranular actúa a lo largo de los límites de grano mientras que el provocado por la corrosión transgranular lo hace sin una preferencia aparente por ellos. La figura 2.27 muestra un ejemplo de agrietamiento transgranular y la figura 2.28 uno de agrietamiento intergranular. (17)

Métodos de Prevención. Como mencionamos anteriormente el mecanismo de la fractura por corrosión bajo tensión no se conoce perfectamente, por lo que los métodos de prevención para este tipo de ataque son generales y de naturaleza empírica.

a) Disminuir el esfuerzo aplicado al valor mínimo posible.



Figura 2.27. Sección transversal de una fractura por corrosión bajo tensión en un acero inoxidable (500X).

b) Eliminar las especies ambientales críticas, utilizando por ejemplo la desgasificación, la desmineralización y la destilación.

c) Un recurso posible es el cambio de aleación cuando no es posible cambiar ni el ambiente ni el esfuerzo.

d) Aplicar protección catódica a la estructura con una fuerza externa de suministro o con ánodos consumibles. La protección catódica sólo se debe utilizar para proteger instalaciones en donde es posible conocer que la fractura se debe a este fenómeno y no a la fragilización por hidrógeno, ya que esta última se ve acelerada por la corriente impresa utilizada este entipo de protección.

e) Adicionar inhibidores al sistema si es posible. Estos pueden ser fosfatos y otros inhibidores orgánicos o inorgánicos, cuidando solamente de aplicar la cantidad adecuada de inhibidor, sin que se provoque con ello corrosión localizada o picadura. (18)



Figura 2.28. Fractura intergranular por corrosión bajo tensión de latón (E. N. Pugh.).

2.5.4.10. Corrosión Bajo Tensión.

Cuando en los aceros quedan tensiones residuales o se crean éstas por efecto de esfuerzos exteriores (tales como esfuerzos de tracción, deformaciones en frío, soldadura, etc.) y se les somete a determinadas soluciones, especialmente las cloradas, pueden producirse pequeñas fisuras si las zonas expuestas están a tracción, dando origen a la corrosión bajo tensión (figura 2.29).

Los aceros austeníticos son los que presentan mayor tendencia a la formación de esta corrosión, mientras que los austeno-ferríticos apenas la acusan.

Para eliminar las tensiones residuales, uno de los medios más eficaces es el de someter a los aceros a un "tratamiento de eliminación de tensiones". Para los aceros austeníticos será suficiente conseguir una temperatura superior a los 880°C, siempre que vayan a estar expuestos en los medios clorados normales.

Las grietas producidas por la corrosión bajo tensión son



Figura 2.29. Corrosión bajo tensión en un acero X6CrNiMo17-12 (UNE F-9594).

generalmente transgranulares pero se dan casos en que son intergranulares.

En los aceros martensíticos aparece este tipo de corrosión cuando están en contacto con el aluminio. El aluminio hace de ánodo, dando lugar a que los iones de hidrógeno se descarguen sobre la superficie del acero, entrando hidrógeno en la red cristalina provocando tensiones. Si en estas condiciones sometemos al acero a medios clorados se provocará su corrosión. (19)

2.5.4.11. Corrosión-Fatiga.

La fatiga es el fallo de un metal por agrietamiento cuando se encuentra sujeto a un esfuerzo cíclico. El caso común involucra una fluctuación rápida de esfuerzos que bien pueden encontrarse debajo del límite de tensión. Cuando el esfuerzo aumenta, el número de ciclos requeridos para ocasionar la fractura disminuye. Por lo regular existe un nivel de esfuerzo por debajo del cual no ocurrirá la fractura, regularmente con un número infinito de

ciclos, que recibe el nombre de límite de resistencia.

Se ha tomado como práctica general, el dar el límite de resistencia como el esfuerzo por debajo del cual, no ocurrirá ningún fallo en un millón de ciclos. Una curva de fatiga, comúnmente conocida como curva S-N, se obtiene al graficar el número de ciclos requeridos para ocasionar la falla del metal contra el máximo esfuerzo cíclico aplicado. En la figura 2.30. se muestra una curva S-N típica.

Cuando un metal se encuentra sujeto a un esfuerzo cíclico en un ambiente corrosivo, el número de ciclos requeridos para ocasionar el fallo a un esfuerzo dado, se reducirá. Esta aceleración de la fatiga debida a la corrosión recibe el nombre de corrosión-fatiga. La curva de corrosión-fatiga S-N puede ser trazada, como se muestra en la figura 2.30 (línea oscura). Esta es menor que la curva normal de fatiga obtenida para el mismo metal en aire. En ambos casos, la frecuencia del esfuerzo debe

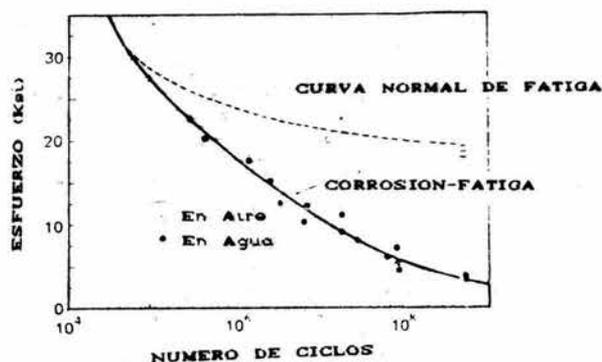


Figura 2.30. Curvas de Fatiga y Corrosion-Fatiga para una aleación de aluminio.

ser reportado debido a que es un factor influyente en el límite

de resistencia.

La curva oscura S-N se obtiene como resultado tanto de la corrosión como de la fatiga. Esta línea indica que la vida del metal bajo estas condiciones será menor que la esperada en la curva establecida en aire (quizá sólo de 30 a 50%). La curva S-N con corrosión tiende a conservar la caída, regularmente a esfuerzos bajos.

Una marcada pendiente dentro del límite de resistencia puede ocurrir regularmente en un ambiente corrosivo medio, especialmente en el caso de una aleación con película protectora. Por ejemplo, el agua desionizada (agua pura), la cual producirá ordinariamente solo el crecimiento de la película protectora de una aleación de aluminio inmersa en ella, lo que reducirá apreciablemente el límite de resistencia de la misma aleación sujeta a un esfuerzo cíclico. Esto se debe a que los esfuerzos reversibles ocasionan un agrietamiento repetido sobre la superficie de la película protectora lo que permite el acceso del agua a las partes desprotegidas del metal, ocasionandose de esta forma la corrosión. (20)

El mecanismo general de la corrosión por fatiga involucra la formación de picaduras en la superficie metálica debido al ataque corrosivo producido por el medio de contacto, las cuales actúan como entalladuras mecánicas o puntos de concentración de esfuerzo en el material¹⁵.

Las picaduras que provoca el rocío de una solución salina sobre especímenes de acero utilizados como testigos de corrosión,

¹⁵ Aguilar, V. L., El Proceso de Corrosión Fatiga de los Materiales Metálicos., TECNOLAB., p. 22. (Febrero 1985).

tienden a adoptar una forma ligeramente hemisférica al principio, para posteriormente aparecer como depresiones puntuales que se distribuyen irregularmente sobre toda la superficie.

La aplicación del esfuerzo cíclico acelera la aparición de las picaduras y provoca su extensión transversal favoreciendo la formación de fisuras de corrosión-fatiga, normalmente de tipo transcristalino, aunque se puede presentar el agrietamiento intercristalino en algunos metales susceptibles al ataque corrosivo en los límites de grano. La figura 2.31 muestra la micrografía a 250 ampliificaciones, de la sección de un tubo de caldera en el que se aprecia claramente los agrietamientos por corrosión-fatiga que tuvieron como origen la formación de picaduras de corrosión hemisférica.

Las grietas superficiales que se observan en la mayoría de los componentes que han fallado en servicio, o en probetas de materiales que han estado sujetas al proceso de corrosión durante

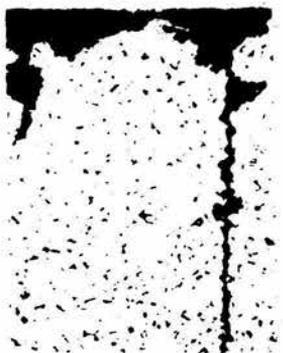


Figura 2.31. Microfotografía (250 X) de la sección de un tubo de caldera en la que se aprecian claramente dos agrietamientos, por corrosión fatiga.

un tiempo considerable, son más anchas en el extremo superficial que las grietas normales de fatiga; pero se adelgazan notablemente bajo la superficie, dando la apariencia característica de una grieta de fatiga generada al aire. Esto implica que el crecimiento de las macrogrietas no están sensible a la acción del medio corrosivo como la iniciación y el desarrollo de las microgrietas superficiales.

Debido a que el ataque corrosivo constituye un proceso función del tiempo, la resistencia a la corrosión-fatiga decrece a medida que la vida de fatiga, considerado como un parámetro independiente, aumenta.

La resistencia a la corrosión-fatiga de la mayoría de los materiales metálicos dependen principalmente de su capacidad para resistir el ataque corrosivo del ambiente, por lo que los materiales que presentan una buena resistencia al ataque de un medio particular, generalmente exhiben también una alta resistencia a la corrosión-fatiga ante el mismo medio.

Medidas de Protección. en términos generales, el origen de las fallas por corrosión-fatiga se puede relacionar con una mala selección de los materiales en el diseño original de un componente, deficiencias en el diseño mismo, errores de control de calidad en la fabricación, y consideraciones equivocadas respecto a la agresividad de un medio corrosivo.

El control de las fallas por corrosión-fatiga involucra cambios de diseño, selección de materiales y medio ambiente, a través de una o más de las acciones siguientes:

a) Reducción o eliminación del esfuerzo cíclico.

b) Aumento de la resistencia a la corrosión-fatiga del material.

c) Reducción o eliminación del ataque corrosivo.

Debido a que en el proceso de corrosión-fatiga interviene una gran cantidad de variables que introducen tanto la pieza metálica como el medio corrosivo, no es posible establecer soluciones efectivas de carácter general. A pesar de ello, y a manera de guía inicial para el control de un problema, se pueden establecer los siguientes puntos.

a) El esfuerzo de trabajo se puede reducir disminuyendo la amplitud del esfuerzo cíclico. Aunque esta medida implica algún cambio en el diseño de un componente, se presentan situaciones en las que es posible hacerlo, en algunos casos, las modificaciones pueden consistir en un aumento sustancial del área de la sección transversal o en la adaptación de una costilla de refuerzo en diversos puntos de un componente. Cuando la falla por corrosión-fatiga se debe a la presencia de esfuerzos introducidos durante el proceso de manufactura, se deben revisar las especificaciones de fabricación y los requerimientos de calidad.

b) La resistencia mecánica de un material metálico se puede incrementar mediante la adición de diversos aleantes o introduciendo algunos cambios en su sistema de tratamiento térmico. Debido a que el ataque corrosivo puede reducir la resistencia a la fatiga de un material hasta una pequeña fracción de su resistencia a la fatiga en aire, los elementos de aleación o los tratamientos térmicos que aumentan la resistencia solamente,

sin incrementar la resistencia a la corrosión del material, tienen muy poco valor.

c) Es posible mejorar la resistencia a la corrosión-fatiga de un componente interponiendo un sistema protector entre el material metálico y el medio corrosivo. Sin embargo, los recubrimientos que actúan simplemente como una barrera mecánica, presentan la desventaja de que dejan de ser efectivos tan pronto como la capa protectora exhibe discontinuidades. Debido a la posibilidad de que las fallas del recubrimiento se desarrollen durante el servicio, es preciso utilizar un recubrimiento de naturaleza anódica con respecto al metal base, de tal manera que el material reciba protección electroquímica cuando ya no exista aislamiento mecánico.

d) La introducción de un sistema de protección catódica ha demostrado una gran utilidad en el control de corrosión de elementos sujetos a fatiga en contacto con ambientes acuosos, excepto en las aleaciones de alta resistencia susceptibles a la fragilización por hidrógeno.

e) Los recubrimientos metálicos de zinc y cadmio proporcionan al acero una protección bastante satisfactoria. Los recubrimientos de cromo y níquel, debido a su naturaleza catódica y a su baja resistencia a la fatiga, tienden a existir discontinuidades tan pronto como se forman las grietas por fatiga en el sustrato, permitiendo el acceso del medio corrosivo hacia la superficie del metal base. Por el contrario, los recubrimientos de zinc y cadmio presentan un comportamiento anódico respecto al acero y una buena resistencia general ante una atmósfera salina,

por lo que es recomendable su utilización en sistemas de corrosión fatiga que operen en las condiciones descritas.

f) Los recubrimientos tipo pintura, especialmente los sistemas alquídicos, proporcionan también una buena protección del acero aún en condiciones severas de corrosividad.

g) El uso de inhibidores de corrosión, disueltos en el medio corrosivo o agregados en algún recubrimiento orgánico, ha arrojado buenos resultados en sistemas de corrosión-fatiga en agua y salmuera.

h) Los tratamientos termomecánicos que introducen esfuerzos residuales de compresión sobre la superficie metálica, tienden a prolongar la vida de fatiga del material al aire mediante la reducción de los esfuerzos de tensión en los puntos potenciales de iniciación de grietas. Sin embargo, debido a que la corrosión generalizada del material implica la destrucción de las capas superiores de la superficie metálica, el uso de esta técnica de control queda limitada por el tipo de corrosión que predomina en el sistema. (21)

2.5.4.12. Celdas de Concentración.

Si se sumergen dos pedazos del mismo metal, conectados eléctricamente, en dos concentraciones diferentes de oxígeno disuelto o de un electrolito, se produce una celda de concentración. Se producirá el mismo resultado si se exponen dos áreas de un mismo pedazo de metal a dos concentraciones distintas de oxígeno disuelto o un electrolito. El ataque se produce en la superficie, en la zona de baja concentración de oxígeno o

electrolito, y ese metal o superficie metálica se convierte en el ánodo. El metal que se encuentra en la zona de alta concentración se convierte en el cátodo de la celda, y los electrones fluyen al interior del metal, de la zona anódica a la catódica. Así pues, las celdas de concentración son de dos tipos: 1) celdas de concentración de iones metálicos y 2) celdas de concentración de oxígeno.

En una celda de concentración de iones metálicos, el voltaje producido está relacionado directamente con la diferencia en las concentraciones de las soluciones en las zonas del ánodo y el cátodo; esto se debe a que la tendencia a entrar en solución de sus iones, es inversamente proporcional a la concentración de iones. El voltaje, en la celda de concentración, es la diferencia en el potencial de solución de las dos semiceldas de que se compone. Así, en la figura 2.32, el cobre en la solución al cinco por ciento de CuCl_2 será anódico en relación al cobre de la solución al diez por ciento.

En la figura 2.33 que representa un corte seccional a través de una unión remachada sumergida, vemos un ejemplo de celda de concentración de iones metálicos. El espacio entre las placas superpuestas se hace progresivamente menor, a medida que nos acercamos al remache. La concentración de iones en el líquido, entre las placas, aumenta, a medida que disminuye la distancia al remache. La concentración de iones es más baja en los extremos de la junta (marcada como A en la figura 2.33.a), debido a que una solución nueva de baja concentración de iones reemplaza continuamente a la solución en la que han ido acumulando iones;

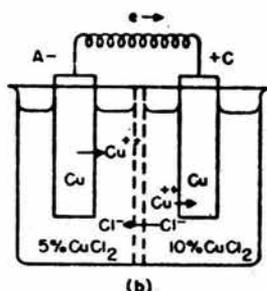


Figura 2.92. En una celda de concentración se sumergen dos electrodos del mismo metal en dos concentraciones diferentes del mismo electrolito, separadas por una placa porosa, que retrasa la mezcla de las soluciones. El ánodo marcado con la letra A, es atacado, saliendo de el Cu, que entra en solución. El cátodo, marcado como C, es protegido, y los iones de Cu^{+} se depositan en él, como cobre metálico. Los iones Cl^{-} pasan a través de la placa porosa, de derecha a izquierda, y los electrones fluyen por el conductor, como se indica. La región de baja concentración de iones, en el electrolito, es anódica, y la de alta concentración, catódica.

por lo tanto, A se vuelve anódica con respecto a C, y el ataque se produce como se indica.

En las celdas de concentración de oxígeno, las diferencias en la concentración de oxígeno disuelto, más que las diferencias de concentración de iones metálicos, hacen que la celda funcione. En estas celdas, la zona de baja concentración de oxígeno se hace anódica; mientras que la de alta concentración de oxígeno se vuelve catódica.

En la figura 2.33.b se muestra un ejemplo de celda de concentración de oxígeno. En esta ilustración, la existencia de

oxígeno en las profundidades de la hendidura es nula, y hay pocas

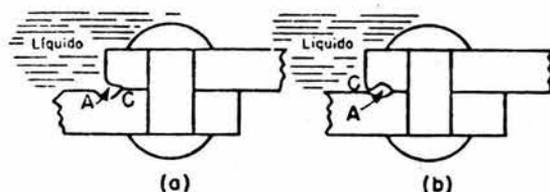


Figura 2.33. Corrosión de celda de concentración. (a) y (b) ilustran dos mecanismos, por medio de los cuales, la corrosión de celda de concentración puede producir un ataque cerca de una junta sumergida de remache. En la parte (a), A es anódica, con una baja concentración de iones en una solución móvil, que impide la concentración; C es catódica, con una alta concentración de iones en donde la zona estancada permite la acumulación. En la parte (b), A es anódica, con baja concentración de oxígeno, ya que el oxígeno no puede ser reemplazado por el líquido, a medida que se usa en la corrosión; C es catódica, con elevada concentración de oxígeno, debido a que el suministro de oxígeno está siendo reemplazado continuamente por la nueva solución móvil.

probabilidades de que puede ser reemplazado. En los extremos de la junta (marcados con C en la figura 2.33.b), un flujo de solución nueva con alta concentración de oxígeno reemplaza continuamente todo el oxígeno que tenga tendencia a consumirse en esa zona.

Así el área anódica A se encuentra en este caso muy al interior de la hendidura, y la zona catódica C, está a cierta distancia del remache. En comparación con la celda de concentración de iones metálicos, se invierte la posición de las zonas del ánodo y el cátodo.

La corrosión de celda de concentración de oxígeno puede

demostrarse, colgando verticalmente un pedazo de lámina delgada de acero en un vaso picudo de agua. La corrosión se producirá con mayor rapidez en torno al fondo de la lámina de acero que cerca de la superficie. Esto se debe a que el aire se disuelve en la superficie del agua y se difunde hacia abajo. Por consiguiente, en la parte superior de la lámina metálica, la concentración de oxígeno será mayor y esa zona se hace catódica. A mayores distancias bajo la superficie del agua, disminuye la concentración de oxígeno y el acero se vuelve anódico. (22)

2.5.4.13. Corrosión por Contacto.

Hay ciertos casos en que se produce una corrosión localizada en las zonas en contacto de un acero con productos sólidos, cuando estos están humedecidos con agua u otro medio corrosivo.

Este tipo de corrosión es muy frecuente en el almacenamiento de los aceros al cromo. Las empaquetaduras más peligrosas son las grafitadas.

Si los medios corrosivos que humedecen a los productos sólidos en contacto con el acero son soluciones cloradas o sulfatos, aumenta la velocidad e intensidad de la corrosión por contacto. Los aceros austeníticos resisten mejor este tipo de corrosión. (23)

2.5.4.14. Fenómenos Producidos por la Presencia de Hidrógeno.

En la naturaleza existen varias categorías de fenómenos producidos por la presencia de hidrógeno.

El pequeño átomo de hidrógeno (no la molécula) tiene un tamaño

tres veces menor que un cristal cúbico en un retículo metálico y puede difundirse fácilmente a través de la estructura. Cuando el retículo cristalino entra en contacto o se satura de hidrógeno atómico, disminuyen las propiedades mecánicas de muchos metales y aleaciones.

Por lo regular se observan cuatro fenómenos originados por el hidrógeno:

1. Pérdida de la ductilidad y la resistencia.
2. Daño por hidrógeno.
3. Fractura inducida por hidrógeno (HIC).
4. Efectos producidos por temperaturas elevadas.

2.5.4.15. Pérdida de la Ductilidad y la Resistencia.

Todos los metales pierden parte de su ductilidad y en forma menos apreciable, su resistencia mecánica, cuando son expuestos al hidrógeno. El cobre, el aluminio y los aceros inoxidable se afectan menos, por este proceso, que el hierro o las aleaciones comunes de níquel. Los cambios que se observan en este tipo de corrosión se deben probablemente a la acción del hidrógeno sobre el retículo, así como también de la fractura (retardada) de las aleaciones fragilizadas. En un caso posterior, el metal falla al estar bajo una carga estática prolongada cuando no tiene ductilidad. Entonces se dice, que la aleación falló debido a la fragilización por hidrógeno (HE) o que ha fallado por fractura inducida por hidrógeno (HIC).

Si se quita la aleación de la fuente de hidrógeno y se hornea el metal alrededor de 200°C (400°F) el hidrógeno absorbido se

extrae del metal y este recobra sus propiedades metálicas. La presencia de hidrógeno, ya sea dentro o sobre un metal, tiene efectos tanto sobre la superficie metálica como en el hinchamiento. La pérdida de las propiedades metálicas se asocian probablemente con mayor frecuencia, con los efectos que tiene sobre la superficie el hidrógeno que se encuentra en contacto con un retículo metálico.

2.5.4.16. Daño por Hidrógeno.

En los aceros relativamente blandos, se observa el daño por hidrógeno cuando se tienen condiciones medianamente corrosivas en presencia de contaminantes específicos (como sulfuros, seleniuros, arseniuros, compuestos de antimonio, cianuros, etc). Tales especies tóxicas, promueven la recombinación del hidrógeno atómico ("naciente") que da como resultado hidrógeno molecular gaseoso. Si el proceso corrosivo es muy fuerte, aun sin la presencia de dichas sustancias tóxicas, se puede generar suficiente hidrógeno atómico para ocasionar el daño.

Cuando el hidrógeno atómico entra a la estructura metálica, la inclusión no metálica cataliza la formación de hidrógeno molecular en el retículo metálico, generando una enorme presión interna que ocasiona la formación de cuarteaduras, fisuras y comúnmente daño de la superficie metálica. En algunos casos se ha llegado a observar en una pulgada o en un diámetro, daño a lo largo de una distancia de cuatro pies. La tendencia al daño puede ser combatida algunas veces, utilizando aceros que tengan el mismo tamaño de grano y que estén limpios, como se especifica para servicios a

temperaturas elevadas.

2.5.4.17. Fractura Inducida por Hidrógeno (HIC).

La fractura inducida por hidrógeno ocurre en aceros endurecidos o que soportan esfuerzos muy altos, y es similar en muchos aspectos a la fractura por corrosión bajo tensión (SCC). Sin embargo este tipo de corrosión no puede ser corregido con protección catódica, como el último, porque agrava el problema de fractura.

Un gran número de aceros endurecidos, de aceros inoxidable martensíticos, de aleaciones inoxidable endurecidas por precipitación, etc. son susceptibles a la fractura inducida por hidrógeno. Por lo regular las aleaciones de cobre y níquel y las aleaciones de níquel-cromo-molibdeno trabajadas en frío son susceptibles a este tipo de corrosión cuando se encuentran bajo tensiones muy altas y particularmente cuando forman pares galvánicos con materiales menos nobles.

2.5.4.18. Efectos Producidos por Temperaturas Elevadas.

A temperaturas elevadas y a presiones de hidrógeno parcialmente altas, la tendencia del hidrógeno molecular a dividirse en átomos es mayor y esto origina que la actividad y la movilidad de dichos átomos aumente. Por arriba de los 400°C (750°F), la inclusión del óxido cuproso en el cobre metálico puede reducirse, generando vapor dentro del retículo metálico y originando una fisura interna.

De menos importancia, desde el punto de vista de ingeniería, es

la metanación del acero. A temperaturas superiores a 220°C (430°F), el hidrógeno atómico reacciona con el carburo de hierro de los aceros, formando metano dentro de la estructura y originando una descarbonización localizada y fisura del metal.

(24)

2.5.4.19. Fragilización por Hidrógeno.

Walter y Chandler han separado a los metales de acuerdo a cuatro categorías del grado de fragilización que se observa en ellos cuando se tienen altas presiones de hidrógeno:

1. Fragilización Extrema. Los aceros y las aleaciones de níquel altamente resistente se encuentran en esta categoría en donde la fragilización se caracteriza por un gran decremento en el grado de resistencia mecánica, por la presencia de muescas y el decremento en la ductilidad. Los metales clasificados en esta categoría fallan regularmente con una ruptura catastrófica que se propaga dentro del espécimen, dejando un corte delgado en toda la periferia, excepto en donde se inicia la fractura.

2. Fragilización Severa. La mayoría de los metales analizados se encuentran en esta categoría. La fragilización se caracteriza por la reducción del grado de resistencia, presencia de muescas y disminución en la ductilidad. Los metales de este grupo por lo regular fallan con muchas fracturas superficiales, algunas de las cuales son muy profundas.

3. Fragilización Ligera. Esta categoría incluye al titanio comercialmente puro, al cobre, al berilio y a los aceros inoxidables austeníticos que tienen una estructura austenítica

inestable. La fragilización se caracteriza por una disminución pequeña del grado de resistencia mecánica y de ductilidad. Los metales de este grupo exhiben numerosas fracturas pequeñas, poco profundas y afiladas al estar bajo esfuerzos pequeños que se aumentan gradualmente.

4. Fragilización Despreciable. En los materiales de esta categoría se incluyen las aleaciones de aluminio, los aceros austeníticos estables y el cobre. Estos materiales fallan de la misma forma en hidrógeno o en aire, con reducción en la resistencia mecánica y en la ductilidad, debido a la fragilización por hidrógeno. No se observa fractura superficial.

Existen varias distinciones importantes entre los dos tipos de fragilización por hidrógeno. La fragilización interna por hidrógeno no se observa inmediatamente después de colocar el material, pero puede ocasionar un retraso en la falla si el material se conserva bajo un esfuerzo pequeño por un período de tiempo apreciable. La fragilización superficial por hidrógeno, por lo contrario, causa una fragilización inmediata cuando los esfuerzos exceden el límite de resistencia mecánica. Los materiales fallan durante o enseguida de que se les aplica la carga. En la fragilización superficial por hidrógeno, la falla comienza en la superficie, mientras que en la fragilización interna por hidrógeno dicha falla se presenta debajo de la superficie. El grado de fragilización depende del tiempo que se conserve la alta presión de hidrógeno (10,000 lb/in²). (25)

2.5.4.20. Corrosión-Erosión.

La corrosión erosión es una combinación de erosión mecánica con uno de los mecanismos básicos de la corrosión. Los metales que resisten a la corrosión, debido a la formación de capas pasivas, pierden su estabilidad si la erosión impide que se mantenga una película protectora. La erosión se debe al flujo turbulento de líquidos, sobre todo los que contienen sólidos en suspensión; buenos ejemplos son la suciedad y las sales que se precipitan cuando se tienen soluciones saturadas en caliente. La turbulencia, a su vez, se debe a las altas velocidades de flujo, los cambios en el diámetro de los tubos, los codos y los accesorios. El fenómeno denominado ahuecamiento está estrechamente asociado al flujo turbulento. Cuando existe un movimiento relativo de una gran velocidad entre el agua y una superficie, se forman burbujas de vapor; que se rompen en la superficie. La presión en las burbujas es muy baja y ellas mismas son inestables. Se produce un colapso repentino y se ejerce una acción de golpeo que tiende a eliminar metal, así como también las películas de protección. Si el ahuecamiento se combina con la corrosión, los dos mecanismos se completan el uno en el otro. En este caso, el ahuecamiento elimina las capas pasivas y se produce, a continuación, un proceso corrosivo. Esto hace que la superficie se vuelva irregular, lo cual fomenta más ahuecamientos, de tal modo que no puede formarse de nuevo una película pasiva estable. Los metales y las aleaciones que tienen una resistencia excelente a la corrosión en líquidos en reposo, a veces se destruyen por corrosión-erosión o ahuecamiento en cuestión de pocas semanas, en esos mismos líquidos, cuando se desplazan a altas velocidades.

2.5.4.21. Cavitación.

El daño por cavitación (algunas veces referido como corrosión por cavitación o cavitación-erosión) es una forma de corrosión localizada combinada con daño mecánico que se presenta cuando se tiene un movimiento rápido y turbulento de líquido y toma la forma de áreas o cavidades de picadura o rugosidades en la superficie metálica. Se considera que este tipo de daño es una forma especial de la corrosión por erosión que se origina por la formación y el rompimiento de burbujas de vapor, en un líquido, cerca de la superficie metálica. El daño por cavitación ocurre en turbinas hidráulicas, propulsores de barcos, impulsores de bombas y otras superficies en donde se encuentren líquidos a altas velocidades y cambios de presión.

La cavitación es la formación de cavidades en un superficie debida a la turbulencia o a la temperatura que causa la disminución de la presión del líquido por debajo de la presión de vapor del mismo. Si representamos este fenómeno con un cilindro lleno de agua provisto de un pistón que comprime el agua y si el pistón es retirado de la superficie del agua, la presión disminuye y el agua se vaporiza, formando burbujas. Ahora si, el pistón es empujado sobre el agua, la presión aumenta y las burbujas se condensan o se rompen. Repitiendo este proceso a alta velocidad, como en el caso de la operación de una bomba, se forman burbujas de vapor que se colapsan rápidamente sobre la superficie metálica provocando que se formen cavidades sobre ella. Esto sucede sobre la parte trasera de los propulsores de los barcos, las paletas de las turbinas en las bombas de agua, en las tuberías

con flujos de alta velocidad y sobre los deslizadores de los hidroaviones, dependiendo del diseño del equipo y el grado de turbulencia.

Las cavidades son actualmente "hoyos" en el líquido que contienen sólo vapor de agua. Esto existe por lo regular sólo en un período de tiempo muy corto debido a los cambios en la presión del líquido en las zonas locales se cierran las cavidades. [en períodos de tiempo tan cortos como un microsegundo (una millonésima de segundo)]. Como la superficie del líquido, durante el colapso de las burbujas, se libera una considerable cantidad de energía cinética. Se ha estimado que esta energía liberada es de cerca de 687,000 kPa (100,000 psi). Dependiendo de la velocidad del colapso, la energía liberada puede producir un estruendo, similar al que se produce con un martillo de agua, en las tuberías de agua cuando se cierra una válvula repentinamente. Estos estruendos de energía chocan sobre la superficie metálica y pueden llegar a romper la película superficial y provocar el inicio de la corrosión.

Se pueden formar muchas cavidades y colapsarse en una pequeña zona (quizá más de un millón) en menos de un segundo. Como resultado de esto ocurren rápidamente los daños producidos por la cavitación. (26)

El mecanismo se muestra esquemáticamente en la figura 2.34. Los pasos son los siguientes: (1) formación de una burbuja de aire sobre la película protectora. (2) La burbuja se colapsa y destruye la película. (3) La superficie metálica corroída es nuevamente expuesta y la película se regenera. (4) Se forma una nueva burbuja

de aire en el mismo lugar. (5) La burbuja se colapsa y destruye la

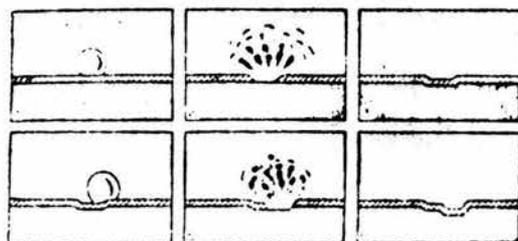


Figura 2. 94. Representación esquemática de los pasos que ocurren en la cavitación.

película. (6) El área expuesta se corroe y la película se regenera. La repetición de este proceso da como resultado hoyos profundos.

En algunos casos, la protección catódica ha tenido éxito en la reducción o la prevención de el daño por cavitación, pero como por lo regular este tipo de corrosión involucra tanto procesos físico como químicos, no puede prevenirse casi siempre por este método. En algunos otros casos, se han usado exitosamente los inhibidores para limitar este problema.

Es cierto que ocurre un trabajo de endurecimiento de la superficie y que los últimos trozos de metal son picados por la acción mecánica del agrietamiento y la fatiga. Los metales dúctiles resisten mejor el daño por cavitación, que los metales quebradizos. Mientras que por otra parte, los aceros inoxidables martensíticos con 11 a 13% de cromo son con frecuencia superiores a los bronce en servicios para agua.

La resistencia a la cavitación aumenta cuando se tienen

tamaños de granos pequeños. La naturaleza de los límites de grano juegan un factor importante en este tipo de corrosión. Los aceros inoxidables son algunas veces más resistentes al daño por cavitación. Esto se debe a su ductilidad, su dureza, su elevado valor de límite de resistencia a la corrosión-fatiga, su tamaño de grano pequeño y su habilidad para el trabajo de endurecimiento.

La cavitación puede ocurrir en tuberías cuando los líquidos se mueven a altas velocidades, especialmente en accesorios en donde las partes lisas de la tubería terminan. El efecto que ocurre por lo regular, es la picadura de la superficie interna del tubo.

La prevención del daño por cavitación, requiere del uso de aleaciones más resistentes y donde es posible, el diseño de sistemas que eviten la turbulencia y la cavitación. Los cambios en el diseño que tengan como fin aumentar las presiones o eliminar los cambios abruptos en la sección transversal (de los tubos). La forma de los propulsores y de los impulsores también pueden ser alteradas. (27)

2.4.5.22. Ataque Intrusivo.

El ataque intrusivo se relaciona con los daños por cavitación y se puede definir como "la erosión-corrosión localizada causada por turbulencia o la presencia de flujo intrusivo". Las burbujas de aire, al producirse una tras otra, tienden a acelerar esta acción, así como los sólidos suspendidos. Este tipo de corrosión se presenta en bombas, válvulas, orificios, tubos de intercambiadores de calor, codos y tes de sistemas de tuberías.

La corrosión por intrusión por lo regular se produce como un ataque localizado repetitivo con características direccionales.



Figura 2.25. Ataque por intrusión cerca de la entrada de un tubo de un condensador.

Las picaduras o ranuras tienden a socavar el lado exterior de la fuente de flujo, en la misma forma que un banco de arena en un río se convierte en una curva por el paso del agua (figura 2.35).

Cuando un líquido fluye sobre una superficie (como por ejemplo un tubo), existe una velocidad crítica por debajo de la cual no ocurre intrusión y arriba de ella aumenta rápidamente. El ataque intrusivo es de importancia debido al mal funcionamiento que presentan algunas aleaciones de cobre en agua de mar.

En la práctica, la intrusión y la cavitación pueden ocurrir al mismo tiempo, por lo que el daño resultante se debe a ambos tipos de corrosión. La intrusión puede dañar la película protectora de óxido y causar corrosión, o puede ocasionar desgaste mecánico en la parte exterior de la película superficial produciendo ranuras profundas.

La forma de solucionar el ataque por intrusión es usar aleaciones más resistentes. Cuando los latones con 70-30% comienzan a fallar en servicios para agua de mar (como los tubos de los condensadores), pueden ser cambiados por aleaciones 70-30

de cuproníqueles que contienen de 0.4 a 1.0% de fierro que son más resistentes. La aleación de Ti-6Al-4V tiene una alta resistencia al ataque por intrusión.

2.5.4.23. Corrosión por Desgaste.

La corrosión localizada que se produce rápidamente sobre superficies cercanas que se encuentran en contacto bajo carga y sujetas a un pequeño movimiento deslizante (por ejemplo, movimiento vibratorio o de desgaste) es llamada corrosión por desgaste figura 2.36.

Casi todas las aleaciones están sujetas a la corrosión por desgaste, y su incidencia es alta en maquinária vibratoria. Ocurre principalmente sobre partes de máquinas tales como cojinetes de bolas, de rodillos, flechas, engranes, etc., aunque a veces puede ocurrir también en hojas metálicas (por ejemplo aluminio) que al



Figura 2.36. Corrosión por desgaste.

momento de ser empacadas y transportadas son sacudidas.

La corrosión por desgaste toma la forma de una decoloración superficial localizada y de picaduras profundas. Estas ocurren en regiones en donde hay movimientos relativamente ligeros, como en uniones o superficies altamente cargadas. Las picaduras algunas veces promueven el aumento de esfuerzo por la iniciación de la corrosión por fatiga.

Existen dos teorías que han sido desarrolladas para explicar los mecanismos de la corrosión por desgaste. La primera de ellas, considera que la presión ocasiona la unión de pequeñas áreas superficiales haciendo que se suelden entre ellas. El movimiento después desgarrar un pequeño volumen del metal de una de las superficies. Subsecuentemente el movimiento las separa, y después un pequeño volumen del metal de otra superficie es removido produciéndose otra partícula fina de metal. En presencia de oxígeno y humedad, estas partículas metálicas se oxidan o corroen produciéndose el óxido del metal correspondiente.

El término desgaste también es utilizado para describir el resultado de la abrasión debida al movimiento relativo que remueve las películas superficiales protectoras, principalmente en la oxidación o corrosión de la superficie metálica fresca que da productos de corrosión que son separados de la superficie por una subsecuente abrasión adicional.

La corrosión por desgaste puede prevenirse eliminando cualquier movimiento deslizante entre las dos superficies. De tal forma, que es posible algunas veces eliminar el desgaste por incremento de carga sobre las superficies. Alternativamente, algunas autoridades

recomiendan disminuir la carga para minimizar el efecto del movimiento vibratorio. En otros casos, las superficies agrietadas pueden incrementar la fricción entre ellas y hacer que el movimiento sece. La corrosión por desgaste puede ser ampliamente retardada por lubricación de las superficies que se encuentran en contacto, con aceite o grasa con una relación de carga característica que separe la superficie del ambiente y en la que se presenta el soldado local bajo cargas y vibraciones encontradas.

En el caso de las hojas de metal empacadas, un empaque rígido o a presión, eliminará el movimiento relativo durante el transporte y de esta forma se elimina la corrosión por desgaste.

2.5.4.24. Corrosión por Choque.

Esta es similar a la corrosión por erosión, con excepción de que los sólidos no están involucrados y de que los efectos específicos son más localizados. Quizá la ocurrencia más común de esta forma de corrosión se tenga en los tubos de aleaciones no ferrosas para condensador, particularmente cerca de los extremos de entrada. Una reducción en velocidad o turbulencia evitará o disminuirá al mínimo esta dificultad. También puede ser superada mediante el uso de aleaciones que tengan mayor resistencia a este tipo de ataque. El empleo de casquillos de plástico o de ciertas aleaciones, insertados en los extremos de los tubos del condensador, se ha encontrado efectivo en donde el ataque estaba confinado a un área cerca del extremo de entrada. (28)

2.5.4.25. Oxidación.

Se presenta cuando, generalmente a temperaturas elevadas, se forman óxidos metálicos por reacción química directa y se producen pérdidas en forma de escamas. La pérdida del metal es mayor bajo fluctuaciones cíclicas en las temperaturas como resultado del aflojamiento de la escala y pérdida de su valor protector. La máxima resistencia a la oxidación es proporcionada por aleaciones que contienen un mínimo de, aproximadamente, 25% de cromo y 20%, o más, de níquel. En algunos, casos mediante tratamiento superficial y aleado con aluminio, se pueden obtener ciertas mejoras adicionales.

2.5.4.26. Sulfuración.

En este tipo de corrosión, a elevadas temperaturas, las atmósferas portadoras de azúfre causan un ataque intergranular. Este está limitado casi exclusivamente al níquel y aleaciones con alto contenido de níquel. El azúfre reacciona a lo largo de los límites de grano para formar un eutéctico de bajo punto de fusión, lo cual produce pérdida de ductilidad. La velocidad de ataque es algo mayor bajo condiciones reductoras que bajo condiciones oxidantes. El níquel no se considera apropiado para usarse en atmósferas portadoras de azúfre a temperaturas superiores a unos 600°F (315°C). La adición de cromo mejora grandemente la resistencia del níquel a los gases portadores de azúfre.

Para que ocurra este tipo de corrosión deben presentarse los siguientes factores: (29)

1. Presencia de hidrógeno.
2. Presencia de agua en estado líquido.
3. pH ácido.
4. Un esfuerzo tensionante.
5. Un material metalúrgicamente susceptible.

2.5.4.27. Desaleación.

Otro tipo de corrosión localizada que es completamente diferente a cualquiera de los que se han tratado hasta ahora, involucra la remoción selectiva de uno de los elementos de una aleación, tanto por ataque preferencial como por la disolución completa de la matriz seguida por la redeposición del constituyente catódico. Este fenómeno ha sido llamado separación o desaleación. El elemento que se remueve es siempre anódico con respecto a la matriz.

Aunque cambia el color del área afectada, no hay una evidencia visible de la pérdida del metal en forma de picadura, cambios dimensionales, grietas o ranuras. La forma de la superficie y su contorno permanecen intactos, incluyendo las finas irregularidades o las rugosidades que en ella se encuentren. Sin embargo el metal afectado se vuelve ligero, poroso y pierde sus propiedades mecánicas originales (se vuelve blando y presenta una resistencia a la tensión muy baja).

Los tipos de disolución selectiva han sido nombradas de acuerdo al tipo de aleación que sea afectada, con base en el elemento que se disuelva (excepto para el caso de la corrosión gráfica). La tabla 2.5. nos da algunos ejemplos, incluyendo la

dezincificación, que se refiere a la remoción selectiva del zinc que se encuentra en el latón.

2.5.4.28. Dezincificación.

El ejemplo más común de una disolución selectiva es la dezincificación del latón (nombre que se le da a las aleaciones de cobre y zinc que contienen de 10 a 40% de zinc). La dezincificación puede reconocerse por el cambio del color original a rojo, color distintivo que le da la apariencia del cobre. Este tipo de corrosión es más común en los latones que

TABLA 2.5. NOMENCLATURA DE LA DISOLUCION SELECTIVA RELACIONADA CON EL CONSTITUYENTE ALEANTE.

Nombre del Ataque Selectivo	Elemento Removido	Sistema de Aleación del que es Removido.
Desaluminización	aluminio	cobre-aluminio
Descobaltificación	cobalto	Stellita (Co-Cr-W-C)
Descuprificación	cobre	cobre-plata cobre-oro
Desmanganización	manganeso	cobre-manganeso
Desníquelificación	níquel	cobre-níquel
Desiliconificación	silicón	silicón-cobre
(Sin nombre aun)	plata	plata-oro
(Sin nombre)	estaño	plomo-estaño (soldaduras)
Corrosión Grafítica	hierro	hierro-carbón (hierro fundido gris)

contienen más del 20% de zinc (latones "amarillos"). Los latones que contienen menos del 15% de zinc (latones "rojos") son prácticamente inmunes a esta forma de ataque, pero pueden

dezincificarse bajo condiciones específicas.

La adición de estaño a la aleación y pequeñas cantidades de antimonio (0.02 a 0.05), arsénico o fósforo tienen efectos beneficios para ella. Los metales que contienen 1% de estaño, 29% de zinc y 70% de cobre, más As, Sb o P son mucho más resistentes a la dezincificación que los latones amarillos, pero menos que los latones rojos.

El ataque puede ocurrir en una área local y prosigue hacia adentro, más bien que en forma lateral, caso en el cual recibe el nombre de dezincificación tipo tapón figura 2.37. Las zonas

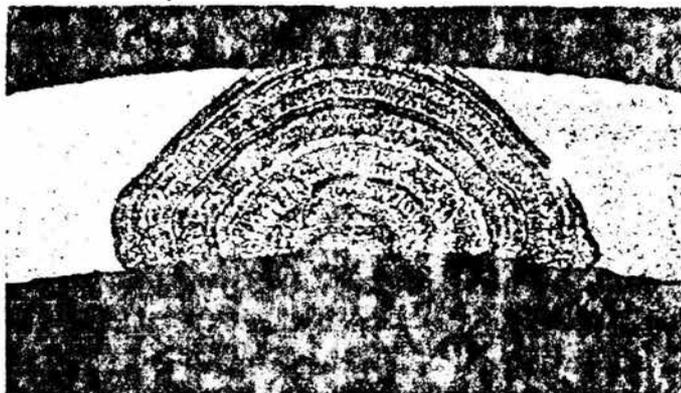


Figura 2. 37. Dezincificación tipo tapón del latón.

dezincificadas permanecen generalmente en el lugar y permiten sólo una ligera filtración, que es contrario a lo que se piensa regularmente, es decir que estas áreas afectadas puedan penetrar la pared de una tubería de agua cuando se le aplica presión. Sin embargo, si la sección sufre de un esfuerzo flexionante, los

taponos del cobre poroso pueden salirse. El lugar de los taponos pueden reconocerse por la presencia, encima de ellos, de depositos de productos de corrosión de color pardo-blanco zinc. La dezincificación tipo tapón tiende a ocurrir en las aleaciones con bajo contenido de zinc. Y también se ve favorecida por condiciones más agresivas como las temperaturas elevadas.

Si la lixiviación selectiva se lleva a cabo sobre toda la superficie, es llamada dezincificación uniforme o de película. Este tipo es más común en los latones con alto contenido de zinc.

Mecanismo. El mecanismo comúnmente aceptado consiste de tres pasos: (1) disolución del latón, (2) entrada de los iones de zinc a la solución y (3) regreso a las láminas de cobre. El zinc es muy reactivo, mientras que el cobre es más noble. Por lo que, el zinc puede corroerse más lentamente en agua pura por la reducción catódica del H_2O en iones hidroxilo y gas hidrógeno. Por esta razón la dezincificación puede llevarse a cabo en ausencia de oxígeno. El oxígeno entra en la reacción catódica y su presencia puede aumentar la velocidad de ataque.

Prevención. La dezincificación puede minimizarse por la reducción del ambiente agresivo (remoción de oxígeno) o por protección catódica, pero en la mayoría de los casos estos métodos no son económicos. Pero el mejor método de prevención es la selección adecuada de la aleación requerida para el servicio.

2.5.4.29. Corrosión Grafítica.

La corrosión grafitica o grafitización, como algunas veces ha sido llamada, es una forma de desaleación o separación causada por la disolución selectiva del hierro presente en los hierros fundidos, que se da comúnmente en los hierros fundidos grises.

Por lo regular se presenta en forma uniforme en el interior de la superficie, dejando una matriz porosa del elemento aleante, que es el carbón. Esto se debe a que el carbón es catódico con respecto al hierro, por lo que se forma una celda galvánica. En ella se disuelve el hierro dejando una masa porosa de grafito y herrumbre.

La grafitización ocurre en aguas saladas, aguas subterráneas ácidas, ácidos diluidos y suelos, especialmente en aquellos que contienen sulfatos y bacterias reductoras de sulfatos.

Exteriormente no se observa daño alguno, pero el metal se ve afectado por la pérdida de peso, que ocasiona este tipo de corrosión, quedando poroso y quebradizo. Dependiendo de la composición de la aleación, el residuo poroso puede conservar una apreciable resistencia a la tensión y una moderada resistencia a la erosión.

La presencia de sulfatos y bacterias reductoras de sulfatos, en los suelos, estimula esta forma de ataque. La adición de cierto porcentaje de níquel al hierro fundido disminuye en forma apreciable la susceptibilidad a la grafitización. (30)

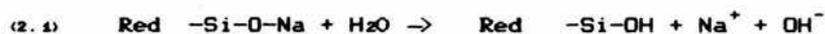
2.5.4.30. Deterioro de los Polímeros y Cerámicos.

Los materiales no metálicos son, en principio, resistentes al deterioro, en comparación con el más común, el hierro. En

particular, son inmunes a la corrosión electroquímica que ocasiona la oxidación del hierro. Sin embargo, en ciertas condiciones los metales experimentan deterioro de otras clases; el concreto u hormigón, por ejemplo, padece ataque químico por el agua del subsuelo y, sobre todo con mayor ímpetu por el agua de mar, si el agua alcanza las varillas de acero de refuerzo (que se ahogan en el concreto reforzado), la herrumbre del hierro puede acelerar el deterioro del concreto. La servicialidad de los productos plásticos se ve reducida a menudo por un hinchamiento y agrietado notables.

2.5.4.31. Deterioro del Vidrio (Reacción de los Componentes).

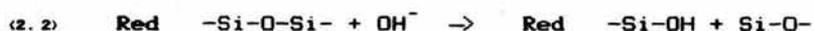
El vidrio es un ejemplo de material homogéneo monofásico, pero algunos de sus componentes son demasiado susceptibles al ataque químico. Los óxidos alcalinos Na_2O y K_2O presentes en los vidrios de bajo precio no están completamente incorporados en la red de los silicatos; por lo contrario, un ion álcali crea un "hueco" en la red formando un enlace sencillo con un ion oxígeno. Cuando hay agua en contacto con la superficie del vidrio, los átomos de álcalis adyacentes a dicha superficie experimentan esta reacción:



En muchas condiciones de servicio se separa el ion OH^- del sistema en reacción, como por ejemplo, por lluvia que cae en el cristal de una ventana, o por neutralización por una bebida ácida envasada en una botella. Toda reacción subsecuente requiere, entonces, la difusión lenta de los iones álcali desde localizaciones interiores hasta la superficie del vidrio y, en

consecuencia decrece gradualmente la intensidad del ataque a este material. Si se agrega CaO, MgO y Al₂O₃ a un vidrio, aumenta la resistencia de los iones álcali a la disolución; sin embargo, ésta puede ir acompañada de ataque químico a la red de silicatos, fenómeno más serio de deterioro.

Los iones OH⁻ por reacción de la ecuación 2.1. pueden permanecer en contacto con el vidrio por suciedad en la superficie o porque se haya formado una bolsa de humedad entre dos piezas de vidrio almacenadas en lugares mal ventilados. La unión de silicio y el oxígeno puede romperse, entonces por la reacción



Este tipo de reacción crea una superficie nebulosa en el vidrio, debajo de una capa de gel silíceo; una solución alcalina puede aportar también los iones OH⁻ necesarios para la reacción. El vidrio es estable en presencia de la mayor parte de los ácidos, pero la red de silicatos es atacada con fuerza por los ácidos fluorhídrico y fosfórico concentrado caliente.

Los materiales cerámicos en su mayoría, constan de más de una fase, y cada una tiene sus propiedades químicas inherentes. En vidrios con separación de fases, una fase puede ser susceptible al ataque químico. El concreto es un cerámico multifásico, cuyo deterioro ofrece sugestivo interés en vista de su exposición a la interperie en carreteras, al mar en instalaciones portuarias y a sustancias químicas en extensas instalaciones manufactureras o sanitarias. Tanto el ataque externo como las reacciones internas pueden ocasionar el deterioro del concreto; en ambos casos, su durabilidad depende de la composición química de los agregados

(arena, grava, etc.), y del cemento (Portland, con alto contenido de alúmina, etc.). Para resistir el ataque exterior, un concreto debe ser impermeable a las soluciones reactivas, propiedad que depende de la correcta formulación, del mezclado, la compactación y el curado del concreto.

Algunas sustancias químicas que atacan la superficie del concreto de buena calidad son los iones de sulfatos del suelo, del agua freática o del agua de mar. El sulfato reacciona, primero, con el aluminato tricálcico del concreto hecho con cemento Portland; una reacción subsecuente con la cal libre produce una masa voluminosa que agrieta al concreto y fomenta un ataque extra; por tanto, el hormigón o concreto elaborado con cemento que contenga menos del 6% de aluminato tricálcico tiene óptima resistencia a las soluciones de sulfatos.

A veces ocurren reacciones internas entre los agregados y el cemento, o entre el refuerzo de acero y hormigón. Ciertos agregados, como el pedernal o la roca volcánica, reaccionan con el Na_2O del cemento para formar un silicato de mucho cuerpo que agrieta al concreto. Si tienen que usarse agregados reactivos, el contenido alcalino del cemento debe ser menor que 0.6%. Las varillas de acero que refuerzan al concreto se protegen inicialmente de la corrosión por un medio alcalino (de pH aproximado a 12) siempre que el concreto circundante contenga cemento Portland u otro, alcalino. Sin embargo, en el transcurso del tiempo, la humedad puede penetrar la capa protectora de concreto, que casi siempre mide unos cuantos centímetros de espesor. El dióxido de carbono disuelto en la humedad reacciona

con la cal libre del concreto, y disminuye el pH. Cuando el acero se corroe, los óxidos producidos de gran volumen fracturan al concreto y aceleran los procesos de deterioro.

Los refractarios de cerámica, se emplean en hornos y otros dispositivos semejantes que trabajan a temperaturas de 1000 a 3000° C. Como la reactividad química aumenta al elevarse ésta, aun refractarios tan estables como los de base alúmina (Al_2O_3) o de magnesia (MgO), pueden sufrir reacciones nocivas con sus medios circundantes a temperaturas de trabajo elevadas. En los hornos para fabricación de acero, por ejemplo, las escorias ricas en SiO_2 (un componente ácido) atacan la superficie de los refractarios básicos de MgO , formando un compuesto que es líquido a la alta temperatura de trabajo. Los refractarios no formados por óxidos, como el carburo de tantalio (TaC) y el nitruro de titanio (TiN), conservan su resistencia mecánica aun a temperaturas excepcionalmente altas, pero conllevan la desventaja de reaccionar con el oxígeno arriba de unos 1000°C. Por tal motivo, los refractarios no formados por óxidos se emplean con frecuencia en atmósfera protectora.

2.5.4.32. Ruptura de las Cadenas de Polímeros.

Los materiales poliméricos se asemejan a los cerámicos en que son susceptibles tanto a la reacción química de sus componentes por separado, como a la desintegración de la estructura o armazón básica, en este caso, las moléculas de cadena larga. Por su compleja estructura química, poco se conoce acerca del deterioro en los polímeros comerciales, pero se sabe que es de primera

importancia la escisión de sus cadenas. El deterioro suele investigarse ordinariamente observando los cambios que ocurren en las propiedades mecánicas o dieléctricas durante la exposición a un medio específico.

Un punto de partida propio para el estudio de la escisión está en la degradación térmica producida por calentamiento. Las energías relativas de enlace $C-F > C-H > C-Cl$ explican cuantitativamente la estabilidad térmica de los polímeros de la tabla 2.6. Un tipo de degradación térmica, ilustrado por el comportamiento del polimetil-metilacrilato, comprende la producción del monómero. La reacción comienza al final de una cadena de polímeros y se repite hasta que se consume toda la cadena. El polietileno se comporta en forma bastante diferente; la escisión de una cadena ocurre en forma fortuita a toda la longitud del polímero. El resultado es la rápida reducción de la longitud media de la cadena y los cambios correspondientes en las propiedades del polímero.

Dos factores que actúan conjuntamente, el oxígeno y la radiación ultravioleta (de la luz solar, por ejemplo), logran que los polímeros se deterioren a la temperatura ambiente. La luz ultravioleta (u otra radiación de alta energía) puede romper los enlaces como lo hace la energía térmica. En ausencia de oxígeno (o de otros elementos reactivos), este tipo de reacción conduce a una degradación relativamente lenta del polímero, pero la presencia del oxígeno permite otra, acelerada.

La rapidez del deterioro por oxidación de los polímeros puede reducirse considerablemente si se incorporan antioxidantes (aminas

o fenoles, por ejemplo) al polímero. Algunos de éstos (el caucho

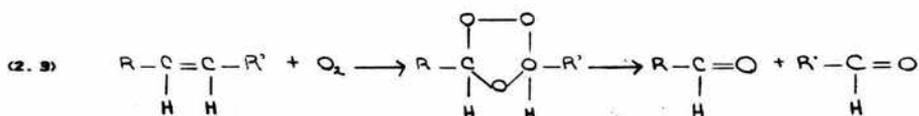
TABLA 2.6. DEGRADACION TERMICA DE POLIMEROS.

POLIMERO	UNIDAD MONOMERICA	PORCENTAJE DE MONOMERO EN PRODUCTOS VOLATILES	Th, °C [°F]	K950, %/MIN
Politetrafluoroetileno (teflón)	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ \text{C} - \text{C} \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}$	100	509 [948]	5.2×10^{-6}
Poli-etileno	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{C} - \text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Despreciable	414 [777]	0.004
Polimetilmetilacrilato (lucita)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{C} - \text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{COOCH}_3 \end{array}$	100	327 [617]	5.2
Cloruro de Poli-vinilo	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\ \quad \\ \text{C} - \text{C} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Despreciable	260 [500]	170

+ Temperatura a la cual un polímero pierde la mitad de su peso durante treinta minutos de calentamiento al vacío.

* Intensidad de volatilización a 950°C (662°F), % de pérdida de peso por minuto.

sintético o el natural, en particular) contienen carbonos de doble enlace regularmente espaciados muy susceptibles al ataque por ozono, O₃. La escisión de la cadena principal puede producirse por una reacción como esta:



R y R' representan porciones de la cadena de polímero. Aunque los productos de la escisión ocasionan reacciones adicionales, si no sufre esfuerzo alguno la muestra de polímero se forma sobre su superficie una película reaccionada que protege al resto de la probeta contra el deterioro. Sin embargo, la mayoría de los polímeros del tipo del caucho (elastómeros) están sujetos a constantes esfuerzos durante su uso, y en estas circunstancias, las reacciones deteriorantes ocasionan que se formen fisuras profundas y, finalmente la ruptura. Diversos aditivos a la composición química de los elastómeros logran disminuir con eficiencia la intensidad del ataque por el ozono; además los antiozonizantes, como las diaminas primarias, actúan en forma idéntica a los antioxidantes.

Un ejemplo notable de degradación de los polímeros es la intensa ablación del recubrimiento de polímero destinado a ser destruido, que se coloca en el cono de nariz de una nave espacial para su reingreso a la atmósfera terrestre. Cuando se somete a un material ablativo a altas temperaturas sufre descomposición; la absorción del calor de vaporización mientras se desprenden productos de descomposición gaseosos, disipa el calor de rozamiento y actúa como enfriador del material restante. Además, se forma una capa aisladora con residuos carbonizados sobre la superficie calentada.

Ciertos tratamientos adecuados de la superficie de cerámicos o de polímeros pueden mejorar sus propiedades en cuanto a resistencia al deterioro, sin que se afecte su comportamiento mecánico o físico de conjunto.

A la superficie de polímeros puede dársele una variedad de tratamientos químicos (por ejemplo, con oxígeno, ácidos, álcalis o halógenos) para mejorar muchas de sus propiedades. La oxidación de algunos polímeros mejora su capacidad retentiva de palabras o dibujos impresos; es decir, sus características de adhesividad experimentan una mejora. Un efecto típico de tratamiento del polietileno con flúor, es mejorar su resistencia al ataque químico.

2.5.4.33. Disolución e Hinchamiento.

Los materiales no metálicos sufren comúnmente degradación en un medio gaseoso o líquido por incorporación de un gas o líquido en el material, o por disolución del material en un disolvente. Los cerámicos, por ejemplo, pueden disolverse con lentitud a altas temperaturas por sales derretidas o metales fundidos. Algunas arcillas poseen la útil propiedad de absorber agua, hincharse y volverse más plásticas.

El comportamiento de los polímeros es muy significativo, porque con frecuencia ocurre en el servicio la exposición a disolventes dañinos. Los polímeros más susceptibles a disolución por líquidos orgánicos son los vítreos, sin eslabonamiento cruzado y no polares. En algunos casos ocurre la disolución completa (como la de poliestireno en benceno), pero más a menudo el líquido tiene

solubilidad limitada en el polímero (la acetona en el poliestireno) y ocasiona cambios de dimensiones y propiedades designados por hinchamiento. La temperatura de transición vítrea del polímero decrece al aumentar la cantidad del disolvente y, en consecuencia, un plástico, en el principio muy resistente, adquiere la consistencia del caucho a medida que avanza el hinchamiento.

La capacidad de un polímero para resistir al deterioro la determinan muchos factores como la temperatura, los esfuerzos aplicados, la irradiación y el medio químico circundante, siendo éstos los de mayor influencia. Además, una designación dada, como la de polietileno, comprende extensa gama de materiales cuyas propiedades varían en forma correlativa. Debe agregarse que con aditivos adecuados pueden cambiarse en forma notable las propiedades específicas de un polímero dado; por ejemplo, el negro de humo imparte al polietileno de alta densidad excelente resistencia contra la luz del Sol. En vista de estas complejidades, con frecuencia se obtienen datos cuantitativos acerca del deterioro de los materiales poliméricos mediante pruebas controladas en condiciones parecidas a las encontradas en servicio.

2.5.4.34. Daños por Radiaciones Nucleares.

Aunque la radiación de diversas clases (ultravioleta, rayos X, rayos cósmicos, etc.), pueden dañar algunos materiales y especialmente las células vivas, la radiación neutrónica producida por reacciones nucleares puede ocasionar daños más

severos.

Un neutrón es un componente del núcleo atómico que tiene carga cero y una masa aproximadamente igual a la de un átomo de hidrógeno. Los neutrones producidos por reacciones nucleares desarrollan, casi siempre, alta velocidad y pueden penetrar hasta 10 cm,¹⁶ en materiales estructurales típicos; en este proceso los neutrones pueden producir regiones de gran desorden y alta temperatura (llamados clavos de desplazamiento) durante las colisiones con átomos del material estructural, siempre que aquellos transfieran suficiente energía a los átomos estructurales para desplazarlos de sus posiciones reticulares normales. La producción de vacantes y de átomos intersticiales como resultado del gran número de desplazamiento recibe el nombre de daño por radiación, y ocasiona cambios en las propiedades del material estructural que pueden comprender una disminución (o aumento) de la resistencia mecánica, una reducción de la ductilidad, y un incremento significativo de las dimensiones (hinchamiento).

La probabilidad de daño por radiación aumenta con la energía del neutrón incidente y es mayor para los neutrones "rápidos" con energías superiores a 1 MeV (un millón de electrovolts) que para los neutrones "térmicos" con energías menores a 1 eV. (31)

2.5.4.35. Corrosión Biológica.

La corrosión biológica no es precisamente un tipo de corrosión; sino más bien el deterioro de un metal debida a los procesos de corrosión originados, directo o indirectamente, por

¹⁶ Guy, A. G., "Fundamentos de Ciencia de Materiales", Ed. McGraw-Hill, p. 427., Mexico (1980).

por la actividad de organismos vivos. Entre esto se encuentran formas microscópicas como las bacterias y formas macroscópicas como las algas y los percebes. Se ha observado, que tanto los organismos microscópicos como los macroscópicos, viven y se reproducen en medios que tienen valores de pH entre 0 y 11, a temperaturas comprendidas entre 30 y 180°F y bajo presiones superiores a las 15,000 lb/in². Es por ello que la actividad biológica puede tener influencia sobre la corrosión en una gran variedad de ambientes, como son los suelos, el agua natural, el agua de mar, los productos naturales del petróleo y en fluidos grasos de emulsiones reductoras.

Los organismos vivos son sostenidos por las reacciones químicas. Es decir, que ingieren un reactante o alimento y eliminan productos de desecho. Estos procesos pueden afectar el comportamiento de la corrosión por las siguientes formas:

1. Por influencia directa sobre las reacciones anódicas y catódicas.
2. Por influencia sobre las películas protectoras de la superficie.
3. Por la creación de condiciones corrosivas.
4. Por la producción de depósitos.

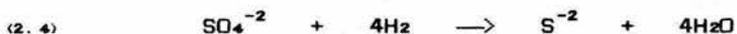
Estos efectos se pueden producir en forma aislada o en combinación, dependiendo del ambiente y del organismo involucrado.

MICROORGANISMOS. Por lo regular, los organismos se clasifican de acuerdo a la habilidad que tienen para crecer en medios en los que está presente o no el oxígeno. Los organismos que requieren

de oxígeno para llevar a cabo sus procesos metabólicos son llamados aeróbicos, ya que sólo se reproducen y crecen en medios que contienen oxígeno disuelto. Otros organismos, llamados anaeróbicos, crecen en forma más favorable en medios que contienen pocas cantidades o en los que no se encuentra disuelto el oxígeno.

Aunque la aceleración de la corrosión debida a los microorganismos es muy común, existen pocos detalles respecto a la identificación de estas especies y a los mecanismos involucrados. Por lo que en este trabajo sólo mencionaremos los microorganismos más importantes y que han sido estudiado de forma más completa.

BACTERIAS ANAEROBICAS. Probablemente la bacteria anaeróbica más importante, que tiene influencia sobre el comportamiento de la corrosión de las estructuras de acero de los edificios, sea la bacteria reductora de sulfatos (*D. desulfuricans*). Este tipo de bacteria reduce los sulfatos a sulfitos de acuerdo con la siguiente ecuación:



El hidrógeno que se muestra en la ecuación anterior, probablemente evolucione durante la reacción de corrosión o se derive de la celulosa, los azúcares u otros productos orgánicos que se encuentran presentes en el suelo.

Las bacterias reductoras de sulfatos predominan más en condiciones aneaeeróbicas, como las que se dan en la arcilla

húmeda, en los suelos pantanosos y en los pantanos. La presencia del ion sulfito tiene una marcada influencia sobre las reacciones catódicas y anódicas que ocurren sobre la superficie del hierro. Los sulfitos tienden a retardar las reacciones catódicas, particularmente la evolución del hidrógeno, y a acelerar la disolución anódica. Bajo la mayoría de las condiciones, la aceleración de la disolución es el efecto más pronunciado, que origina el aumento de la corrosión. Como se sugiere en la ecuación 2.4., el producto de corrosión que se obtiene en presencia de las bacterias reductoras de sulfatos es el sulfito de hierro, el cual precipita cuando los iones ferroso y sulfito se ponen en contacto.

BACTERIAS AEROBICAS. Las bacterias oxidantes del azufre, como la *thiobacillus thio-oxidans*, son capaces de oxidar el azufre elemental o los compuestos sulfurosos a ácido sulfúrico de acuerdo con la siguiente ecuación:



Estos organismos crecen mejor en ambientes con pH bajo y pueden producir ácido sulfúrico en concentraciones por arriba del 5% en peso. Es por ello, que las bacterias oxidantes del azufre son capaces de crear condiciones extremadamente corrosivas. Estos organismos requieren del azufre, ya sea en su forma elemental o combinado, para existir y es por esto que se encuentran frecuentemente en los campos de azufre, en los campos de aceites

y dentro o alrededor de las tuberías de depuración de las aguas residuales, las cuales contienen compuestos sulfurosos, producto de los desechos orgánicos. En el caso de las líneas de depuración, las bacterias oxidantes del azufre originan un ataque ácido extremadamente rápido, sobre las tuberías de cemento.

Las bacterias reductoras de sulfato y las oxidantes del azufre, pueden operar en forma cíclica cuando cambian las condiciones del suelo. Es decir que las bacterias reductoras de sulfato crecen rápidamente durante la época de lluvias cuando el suelo se encuentra húmedo y el aire es expulsado, mientras que las bacterias oxidantes del azufre crecen rápidamente durante la estación seca cuando el suelo permite la permeación del aire. En ciertas áreas, los efectos cíclicos causan daños extensivos en los tubos de acero. También es evidente que la presencia de los microorganismos pueden acentuar la diferencia de aereación de los suelos.

OTROS MICROORGANISMOS. Existen otros microorganismos que influyen directa o indirectamente sobre el comportamiento de la corrosión de los metales y que no han sido estudiados con gran detalle. Por ejemplo existen muchos tipos de bacterias que hacen uso de los hidrocarburos y pueden dañar los recubrimientos de las tuberías de asfalto. Las bacterias del hierro son un grupo de microorganismos que extraen el ion ferroso de la solución y lo precipitan como hidróxido ferroso o férrico en forma de hojas sobre los alrededores de sus paredes celulares. El crecimiento de las bacterias del hierro se desarrolla en forma de tubérculos

sobre la superficie del hierro y tiende a producir ataque por hendidura. Cierta tipo de bacterias son capaces de oxidar el amoníaco a ácido nítrico. El ácido nítrico diluido corroe al acero y a la mayoría de los metales. Sin embargo, en la mayoría de los suelos la cantidad de amoníaco no es lo suficientemente alta como para originar una acumulación apreciable de ácido nítrico. Aunque este tipo de bacterias pueden producir dióxido de carbono, el cual contribuye a la formación de ácido carbónico e incrementa la corrosividad del medio. (32)

En la tabla 2.7. se listan algunos de los microorganismos más importantes y sus características. (33)

Prevención de la Corrosión Microbiológica. Es importante diagnosticar correctamente la presencia de la corrosión microbiológica, antes de aplicar las medidas correctivas. El método más directo y seguro de identificación se realiza cultivando muestras de suelos, que son posteriormente examinadas, para ver si hay evidencias de la existencia de microorganismos. En el caso de las bacterias reductoras de sulfatos, la presencia de sulfito como producto de corrosión sobre las estructuras de acero es una fuerte indicación de la existencia de actividad biológica. Aunque la presencia del sulfito como producto de corrosión, no siempre es debida a este tipo de bacterias.

Existen algunas técnicas generales para prevenir la corrosión microbiológica. El recubrimiento, de estructuras de construcción con asfalto, esmalte, cinta plástica y concreto se utiliza frecuentemente para prevenir el contacto entre las estructuras de

TABLA 2.7 PROPIEDADES FISIOLÓGICAS DE LOS MICROORGANISMOS.

GRUPO Y TIPO	REQUERIMIENTO DE OXIGENO	COMPONENTES DEL SUELO Reductores u Oxidantes	PRODUCTOS	HABITAT	pH OPTIMO DE REACCION (Aproximado)	LIMITES DE TEMPERATURA (°C)
I. REDUCTORES DE SULFATOS (<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>).	Anaeróbicos	Sulfatos, tiosulfatos, sulfitos, azufre, hiposulfuros.	H ₂ S Sulfuro de Hidrógeno o Acido Sulhídrico.	Agua, pantanos, aguas residuales, suelos, concreto, aceites	Optimo : 6.0-7.5 Límite : 5.0-9.0	Optimo : 25-30° Máxima : 55-65°
II. OXIDANTES DEL AZUFRE (<i>Thiobacillus thioparus</i>)	Aeróbicos	Azufre, sulfuros, tiosulfatos.	Acido sulfúrico	Suelos compuestos, rocas de azufre y fosfatos, suelos que contienen compuestos de azufre no oxidados completamente.	Optimo : 2.0-4.0 Límite : 0.5-6.0	Optimo : 28-30° De 18.37° se observa un crecimiento lento.
III. OXIDANTES DE TIOSULFATOS (<i>Thiobacillus thioparus</i>)	Aeróbicos	Tiosulfatos, azufre	De tiosulfato a sulfato y azufre. De azufre a sulfato.	Ampliamente distribuido agua de mar, agua de ríos, pantanos, suelos, aguas residuales.	Optimo : Cercano a neutro. Límite : 7.0-9.0	Optimo : 30°
IV. BACTERIA DEL HIERRO (<i>Crenothrix</i> y <i>Leptothrix</i>)	Aeróbica	Carbonato ferroso, bicarbonato ferroso, bicarbonato de manganeso.	Hidróxido férrico.	Agua estancada o corriente que contiene sales de hierro y materia orgánica.		Optimo : 24° Límite : 5-40°

FUENTE : F.E. Kulman, Corrosion, 9:11 (1953).

acero y el ambiente. Aunque cabe aclarar que el concreto no tiene un buen desempeño cuando se encuentran presentes bacterias reductoras de sulfatos, ya que este material, es atacado rápidamente por el ácido sulfúrico que se produce. La protección catódica también ha sido utilizada para prevenir este tipo de corrosión y es efectiva, específicamente, cuando se usa con recubrimientos. En algunos casos es posible alterar el ambiente y reducir con ello los efectos que produce la corrosión microbiológica. Por ejemplo, el azufre y los compuestos que contienen azufre pueden ser removidos al aerearse el sistema depurador de aguas residuales. También se pueden adicionar inhibidores de la corrosión y germicidas (como cloro y productos clorados) en los sistemas con recirculación. En algunos casos, es posible evitar la humedad de los suelos pantanosos cuando se construyen redes de tuberías. El uso de materiales sustitutos como asbestos y plásticos en los lugares en donde se han utilizado tuberías de acero, es un medio efectivo para prevenir los efectos deteriorantes de la actividad microbiológica en cierto tipo de suelos.

MACROORGANISMOS.

HONGOS Y MOHO. Actualmente, los términos hongos y moho tienen el mismo significado, ya que ambos se refieren a un grupo de plantas que se caracterizan por su falta de clorofila. Estas especies asimilan materia orgánica y producen cantidades considerables de ácidos orgánicos entre los que se incluye el ácido oxálico, el ácido láctico, el ácido acético y el ácido cítrico. Los hongos

son capaces de crecer en una gran variedad de sustratos y son un problema particularmente molesto, especialmente en las áreas tropicales. El tipo más familiar de ataque, producido por esta clase de macroorganismos, es el enmohecimiento de los productos de piel y otras fábricas. En suma, los hongos pueden atacar al caucho y a las superficies metálicas recubiertas o desnudas. En muchos casos la presencia de los hongos no origina daños mecánicos severos, pero afecta la apariencia del producto, lo que es indeseable. Además de la producción de ácidos orgánicos, los hongos pueden también iniciar el ataque por hendiduras sobre las superficies metálicas.

El crecimiento de moho en las superficies metálicas recubiertas o no recubiertas, puede prevenirse o reducirse, si son limpiadas periódicamente. También se ha visto, que la reducción de la humedad relativa durante el almacenamiento y el empleo de agentes orgánicos tóxicos (por ejemplo, violeta de genciana), son efectivos para reducir el crecimiento de moho sobre las superficies metálicas. El crecimiento de moho sobre el caucho es particularmente molesto en los cables enterrados, ya que la perforación localizada del recubrimiento de caucho da como resultado la pérdida de electricidad. La sustitución del caucho natural por el caucho sintéticos, es un método efectivo para prevenir este problema.

ORGANISMOS ACUATICOS. Tanto el agua dulce como el agua salada contienen miles de tipos de vida animal y vegetal, que incluyen a los percebes, los mejillones, las algas y algunos otros. Estas

formas animales y vegetales, atacan las superficies sólidas durante su ciclo de crecimiento. Su acumulación origina la corrosión por hendiduras y la obstrucción de las estructuras, que es probablemente el efecto más importante. En el fondo de los barcos se acumulan percebes y otros organismos que afectan marcadamente las líneas de vapor e incrementan, por eso, los requerimientos de energía. Un barco severamente obstruido requiere, 30% más de energía, durante su operación. De la misma manera, la acumulación de macroorganismos en los intercambiadores de calor y otros mecanismos limitan en extremo, la transferencia de calor y el flujo de fluidos, provocando a algunas veces una obstrucción total.

La acumulación de macroorganismos acuáticos está en función de las condiciones del ambiente. Los problemas más severos ocurren en aguas relativamente poco profundas, ya que en las profundas no existen superficies a las cuales se puedan adherir los organismos. En general las temperaturas templadas favorecen la reproducción y la rápida multiplicación de los macroorganismos como los percebes y mejillones. En los mares del norte, la obstrucción ocurre sólo en los meses de verano, mientras que en los del sur o en las aguas tropicales, se presenta en forma continua. El movimiento relativo entre el objeto y el agua tiende a inhibir, generalmente, este ataque. Por lo que el movimiento rápido de los recipientes permite sólo la acumulación de pequeñas cantidades de organismos y la mayor parte de la obstrucción o ensuciamiento ocurre cuando los recipientes se encuentran en el muelle. Este mismo efecto se observa en los intercambiadores de calor que emplean agua de mar

como medio de enfriamiento. El flujo rápido tiende a suprimir la obstrucción de los intercambiadores de calor, mientras que la acumulación ocurre rápidamente a velocidades de flujo bajas o durante los periodos de paro. Las superficies duras y lisas ofrecen un punto excelente de adhesión, mientras que las superficies rugosas y escamosas tienden a inhibirla.

La obstrucción o el ensuciamiento se inhibe de forma efectiva, con el uso de pinturas antiobstruyentes. Estas pinturas contienen sustancias tóxicas, que por lo regular son compuestos de cobre. Su función es la liberación lenta de iones de cobre en el ambiente, los cuales envenenan el crecimiento de los percebes y otras criaturas. Una técnica similar se emplea en los sistemas cerrados en donde se agregan al ambiente, varias sustancias tóxicas y algicidas como cloro y compuestos clorados. Estos métodos son más o menos eficientes, dependiendo de su aplicación. Sin embargo, bajo condiciones que llevan al crecimiento de organismos acuáticos, casi siempre es necesaria la limpieza periódica para asegurar un flujo de fluidos adecuado y la ausencia de corrosión por hendidura. (34)

2.6 BIBLIOGRAFIA

- (1) Fontana, M.G., and N.D. Greene, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, Singapore, (1978).
- (2) Costa, J.M., Fundamentos de Electrónica: Cinética Electroquímica y sus Aplicaciones, Alhambra, España (1981).
- (3) Brumblay, Ray U., Análisis Cualitativo, 5a. Impresión, CECSA,

México (1983).

- (4) Fritz, James S. y G.H. Schenk, Química Analítica Cuantitativa, 3a. ed., Limusa, México (1986).
- (5) Brumblay, Ray U., op. cit.
- (6) Ayres, G.H., Análisis Químico Cuantitativo, 2a. ed., Harper and Row Publishers Inc., España (1970).
- (7) Fontana, M.G., op. cit.
- (8) Costa, J.M., op. cit.
- (9) Fontana, M.G., op. cit.
- (10) Perry, John H., y Chilton, Cecil H., "Manual del Ingeniero Químico", Segunda Edición en Español, McGraw-Hill Co., México (1982).
- (11) Ed. NACE, Corrosion Basics: An Introduccion, Houston, Texas (1984).
- (12) Fontana, M.G., op. cit.
- (13) Keyser, Carl A., Ciencia de Materiales para Ingeniería, Limusa, México, (1975)
- (14) Fontana, M.G., op. cit.
- (15) Inchaurreza, Adrián, Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor: Propiedades, Transformaciones y Normas, Limusa, México (1981).
- (16) Fontana, M.G., op. cit.
- (17) Ed NACE, op. cit.
- (18) Fontana, M.G., op. cit.
- (19) Inchaurreza, Adrián, op. cit.
- (20) Ed NACE, op. cit.
- (21) Loyola, Víctor, El Proceso de Corrosión Fatiga de los

Materiales Metálicos, TECNOLAB, p. 22, México (Feb. 1985).

- (22) Keyser, Carl A., op. cit.
- (23) Inchaurreza, Adrián, op. cit.
- (24) Ed NACE, op. cit.
- (25) McKetta, John J., Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Vol. 20, Marcel Dekker, Inc., New York, N. Y. (1979), pp. 387-405.
- (26) Ed NACE, op. cit.
- (27) Fontana, M.G., op. cit.
- (28) Ed NACE, op. cit.
- (29) Ed. Morrow, C.L., Enciclopedia de Mantenimiento Industrial, Tomo VII, 9a. Impresión, México (1985).
- (30) Ed NACE, op. cit.
- (31) Buy, A.G., Fundamentos de Ciencia de Materiales, 1a. ed. en Español, México (1980).
- (32) Fontana, M.G., op. cit.
- (33) Fontana, M.G. and W.R. Staehle, Advances in Corrosion Science and Technology, Vol. 2, Plenum Press, New York, (1972).
- (34) Fontana, M.G., op. cit.

III
MATERIALES DE CONSTRUCCION



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

3.1. METALES.

3.1.1. HIERROS FUNDIDOS:

Hierro fundido es un término genérico que se aplica a las aleaciones de alto contenido de carbón-hierro que además cuenta con silicón. Los más comunes son designados como hierros fundido gris, hierro fundido blanco, hierro fundido maleable y hierro fundido dúctil o nodular. Estos son los metales menos costosos de los metales que se utilizan en Ingeniería. El oscurecimiento o fractura grisasea se debe a las hojuelas de grafito que se encuentran libres en la microestructura. Los hierros fundidos grises se pueden fundir fácilmente en formas intrincadas debido a su excelente fluidez y puntos de fusión relativamente bajos. Ordinariamente los hierros grises contienen alrededor del 2-4% de carbón y de 1-3% de silicón. Este tipo de hierros se pueden alear para mejorar su resistencia a la corrosión y a la fractura.

El Código ASTM (American Society for Testing Materials) en su sección A48 clasifica a los hierros grises como sigue:

TABLA 3.1. PROPIEDADES MECANICAS TÍPICAS
DE LOS HIERROS GRIS

CLASE ASTM	RESISTENCIA A LA TENSION* lb/in ²	RESISTENCIA COMPRESION lb/in ²	LIMITE DE FATIGA lb/in ²	DUREZA FRAGILIDAD
20	22,000	89,000	10,000	156
25	26,000	97,000	11,500	174
30	31,000	109,000	14,000	201
35	36,500	124,000	16,000	212
40	42,500	140,000	18,500	235
50	52,500	164,000	21,500	262
60	62,500	187,500	24,500	302

Estos materiales son frágiles y exhiben prácticamente escasa ductilidad. No muestran un punto claramente definido de elasticidad, pero esta es de alrededor del 85% de la resistencia a la tensión. Los módulos de elasticidad para estas clases en varias tensiones que van desde 9.6 hasta 23.5 millones de lb/in², con la clase 20 exhiben el valor más bajo y con la clase 60 el más alto. (Teóricamente, los hierros grises no tienen un módulo de elasticidad debido a que la curva de estrés o fuerza vs deformación no es una línea recta). La resistencia al impacto es generalmente menor, pero es la mejor para materiales con alta relación de resistencia a la tensión y dureza. Estos hierros muestran una alta capacidad de amortiguamiento (amortiguamiento a la vibración. Su gravedad específica varía con el contenido de carbón y es del rango de 7 a 7.35. Su conductividad térmica es menor que la del hierro puro. (1)

3.1.1.1. Hierro Fundido Gris.

Su bajo costo y su fácil adquisición son las razones por las que el hierro fundido gris se considera primero cuando se selecciona un metal fundido para un cierto trabajo. Los hierros grises combinan su fácil fundibilidad en formas intrincadas con su bajo costo de fusión y moldeo.

Existen varios hierros fundidos grises cuyas características metalúrgicas son similares pero cuyas propiedades han sido enormemente modificadas y mejoradas.

El análisis nominal para dos clases de hierro fundido gris se muestra en la tabla 3.2. Cuando el metal fundido reúne

aproximadamente esta composición se pone en moldes y se subenfria, la estructura resultante será una matriz perealítica que contiene

TABLA 3.2. ANALISIS QUIMICO NOMINAL PARA
ALGUNOS HIERROS FUNDIDOS.

	CARBON TOTAL	SILICON	MANGANESO	MAGNESIO	NIQUEL
Hierro gris -Clase 30	3.40	2.20	0.75	----	----
Hierro gris -Clase 50	3.00	2.20	0.90	----	----
Hierro fund. blanco	3.50	1.20	0.80	----	----
Hierro Maleable (92510)	2.50	1.15	0.55max	----	----
Hierro Ductil (60-45-10)	3.70	2.40	0.40	0.05	0.50
Hierro Ductil (80-60-03)	3.70	2.40	0.40	0.05	0.50

Balance: Hierro mas 0.20% de fosforo y 0.10% de azufre.

hojuelas de grafito dispersa. Controlando la cantidad, tamaño y la distribución del grafito, pueden producirse hierros grises con diferentes resistencias. El hierro gris ha sido definido algunas veces como hierro más grafito.

La Sociedad Americana para Prueba de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) reconoce siete clases de hierros fundidos grises -Clases 20,25,30,35,40,50 y 60. Debido a que el análisis químico se subordina a las propiedades mecánicas, los hierros grises se especifican de acuerdo a su resistencia a la tensión. Por lo que, la clase 20 se refiere a un hierro gris con una resistencia a la tensión mínima de 20,000 psi, en las clases altas, se pueden encontrar valores arriba de 60,000 psi.

El hierro gris es un metal no dúctil; tiene una pobre resistencia al impacto y a la tensión, pero es menos sensitivo que

el acero. Aunque los hierros grises no se consideran normalmente cuando se desea un material resistente a la corrosión, han sido extensamente usadas en aplicaciones atmosféricas. La superficie del hierro se oxida rápidamente, pero la capa de óxido se adhiere y disminuye la velocidad de ataque. Las atmósferas industriales contaminadas son más agresivas que las rurales para este tipo de aleaciones. Dentro de las sustancias que permiten su uso se encuentra el agua natural o neutra, el agua de mar, el ácido nítrico concentrado, el ácido fosfórico concentrado, el ácido sulfúrico concentrado, la mayoría de las soluciones alcalinas y cáusticas, y los suelos neutros.

Generalmente las soluciones de ácidos y de sales ácidas son muy agresivas, por lo que el hierro fundido gris no debe usarse con la mayoría de las soluciones diluídas.

Los hierros grises encuentran muchas aplicaciones a temperaturas elevadas. Algunos han sido usados en servicios sin presión y con cargas pequeñas a temperaturas arriba de 1200°F. La ASTM reconoce hierros grises para recipientes a presión a temperaturas arriba de 650°F. El metal muestra una ligera pérdida en su resistencia a la tensión a 600°F y una caída apreciable a 900°F. Si se mantiene el equipo a alta temperatura por un período considerable de tiempo, estará sujeto a un posible fallo ya sea debido a un incremento de volumen o por desincrustación (desoxidación). Este incremento de volumen del hierro gris es causado por dos factores; expansión, la cual es temporal y el crecimiento, que es permanente. El crecimiento -resultado de cambios químicos y físicos en la estructura del metal- causa

serias pérdidas de resistencia e incrementa la fragilidad. Esto ocurre rara vez a bajo de los 600-700°F a menos que se encuentren ciertos agentes corrosivos.

Las aplicaciones del hierro gris a altas temperaturas incluye hornos y partes de hornos, retortas y motores.

El hierro gris es también ampliamente usado por su resistencia al desgaste. Las aplicaciones típicas en este aspecto incluye hojas de cilindros, pistones, engranes, levas y partes de correderas en herramientas de máquinas.

La soldadura por gas, es el método que se prefiere para soldar a los hierros fundidos grises; la soldadura con oxi-acetileno produce una soldadura que es similar en color, composición y estructura al hierro fundido gris. Antes de comenzar al soldar, las partes que serán unidas deben de precalentarse a 600°F. Después de soldadas, las partes deben enfriarse lentamente a temperatura ambiente. Si se hace un buen trabajo, la soldura obtenida será igual de fuerte que el metal y muy manejable.

Los equipos de hierro fundido gris pueden soldarse de forma rápida y eficiente en el mismo lugar en el que van a prestar el servicio, en estos casos, se puede eliminar el precalentamiento, aunque es preferible llevarlo a cabo.

Para la mayoría de los trabajos de soldado de los hierros fundidos grises, se recomienda utilizar electrodos de níquel común, ya que producen una soldadura fuerte y con una maquinabilidad adecuada; mientras que la soldadura que se obtiene con electrodos de acero dulce es fuerte pero muy difícil de maquinar.

3.1.1.2. Hierros Fundidos Blancos.

Los hierros fundidos blancos tienen prácticamente todos el carbón en forma de carburo de hierro. Estos hierros son extremadamente duros y frágiles. El contenido de silicón es bajo porque este elemento promueve la grafitización. La formación de grafito está relacionada con el rango de enfriamiento. El hierro fundido blanco se produce controlando la composición y la velocidad de solidificación del hierro fundido.

El hierro fundido blanco tiene pocos usos y generalmente se emplea como una superficie dura para la parte exterior de los hierros fundidos grises. Al incrementarse el contenido de carbón se incrementa la dureza del metal, arriba del 3% de carbón, la dureza es mayor a 500 Bhn. Esta aleación presenta un valor muy alto de resistencia a la compresión, pero una menor resistencia al impacto. Las propiedades importantes de este metal se dan en la tabla 3.3. Todos los hierros blancos presentan dificultad para ser trabajados debido a su alta dureza y fragilidad.

Los hierros blancos, aunque ven limitado su uso debido a su fragilidad y a su manejabilidad, se emplean donde se tiene como primer requisito resistencia a la abrasión y al desgaste. Se usan en la fabricación de alambre, bolas de molino, tuercas e impulsores de bombas. Los hierros enfriados se usan para tuercas, cilindros, cadenas para neumáticos de carros y otras aplicaciones similares de desgaste.

3.1.1.3 Hierros Maleables.

Estos se producen por tratamiento con calor a altas

temperaturas de los hierros blancos de una composición apropiada. Las formas del grafito como rosetones o racimos en lugar de

TABLA 3.3. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS
PROMEDIO DE ALGUNOS HIERROS FUNDIDOS

PROPIEDAD	UNIDAD	HIERRO GRIS		HIERRO BLANCO		HIERRO	MALEABLE
		Clase 30	Clase 50	Sin alear	Templa- do	Estan- dar No 32510	Pereali- ticio No 45010
FISICAS:							
Densidad	lb/in ³	0.261	0.266	0.277	0.277	0.263	0.263
Conducti- vidad term. a 212 °F	Btu/ft ² / hr/(°F/ft)	29.0	29.0	26.7	26.7	29.5	29.5
Coef. prom. de Expan- sion term. (32-212°F)	in/in/ °F x 10 ⁻⁶	6.6	6.8	5.2	5.2	6.6	6.6
MECANICAS:							
Temp. máx. en serv. continuo	°F	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Módulo de Elastici- dad en -- Tension	psi x 10 ⁶	14.7	20.8	--	--	25.0	27.0
Fundido; Límite de Tension	psi x 10 ³	92	59	35	30	(1) 50	(2) 65
Elastici- dad	psi x 10 ³	29	48	--	--	32	45
Elonga.	%	baja	baja	baja	baja	10	10
Red. área	%	baja	baja	baja	baja	20	--
Dureza	Brinell	190	230	420	460	125	185
Impacto	ft-lb	32	28	7	6	--	--

(1) Recocido.

(2) Recocido y templado.

hojuelas, hacen que el material muestre buena ductilidad (de aquí el nombre de maleable).

Se pueden encontrar dos tipos de este metal -el estándar y el peréalítico. Los dos tipos de grados estándar de hierro maleable se incluyen en la especificación A-47 de la ASTM y los siete grados de hierro maleable peréalíticos se incluyen en la especificación A-22 de la misma ASTM. Un análisis de hierro maleable se muestra en la tabla 3.2.

Al igual que otros hierros fundidos, los hierros maleables se especifican con base en sus propiedades mecánicas (tabla 3.3). Sus límites de tensión varían de 50,000 psi, para los grados estándar, hasta los 90,000 psi para los grados peréalíticos. Cuando aumenta el límite de tensión la elongación disminuye el incremento de la resistencia a la tensión de el tipo peréalítico resulta de la retención del carbón combinado, lo cual aumenta también la dureza, la rigidez y la resistencia a la abrasión.

El hierro maleable estándar tiene una excelente manejabilidad, mientras que los grados peréalíticos son menos fáciles de trabajar. Ambos grados resisten considerablemente la flexión antes de romperse y pueden ser trabajados en frío para mejorar su forma o su estabilidad dimensional.

Los hierros maleables no son más resistentes a la corrosión que los hierros fundidos grises, por lo que se usan ampliamente debido a sus propiedades mecánicas. Entre sus aplicaciones encontramos la manufactura de accesorios para tuberías, válvulas, vástagos, anclas, herramientas y bastidores. La mayor parte del hierro fundido maleable se usa en la industria de la construcción, eléctrica, de herramientas, de trenes y de automóviles.

3.1.1.4. Hierros Dúctiles.

Estos materiales exhiben ductilidad en la forma de hierro fundido. El grafito se presenta como nódulos o esferas como resultado de un tratamiento especial del metal fundido. Las propiedades mecánicas de los hierros dúctiles pueden alterarse por tratamiento térmico al igual que el hierro ordinario.

La ASTM reconoce siete grados de hierro nodular. Los grados 60-45-10 son ferríticos y los grados 80-60-03 son peralíticos, ambos grados se encuentran como hierros de uso general dentro de la especificación ASTM A-339. Los hierros grados nodular para recipientes a presión que trabajan a temperaturas elevadas se especifican en la sección A-396 del ASTM y son los grados 100-70-03 y 120-90-02. El símbolo del grado de estos materiales designa, tomando el siguiente ejemplo 60-45-10, a un hierro nodular con un límite mínimo de tensión de 60,000 psi, un límite mínimo de elasticidad de 45,000 psi y una elongación mínima del 10%.

Las propiedades físicas de los hierros dúctiles son similares a las del hierro gris con una composición comparable. Su densidad y su coeficiente de expansión térmica son equivalentes a las del hierro gris, pero menor que las del acero fundido. Sin embargo, su conductividad térmica es 75% mayor que la del hierro gris. Los grados de resistencia a la tensión van desde 80,000 psi para los grados ferríticos hasta 130,000 psi para los grados peralíticos. Los hierros esferoidales enfriados y templados pueden producirse con valores de tensión desde 100,000 a 160,000 psi que excede por mucho los de otros tipos de hierros fundidos, incluyendo a los

llamados hierros resistentes.

Los hierros esferoidales fundidos son excepcionalmente buenos tanto en su forma fundida como en su forma recocida. La forma de hierro nodular fundido con una dureza arriba de 300 a 320 Bhn se ha sujetado sin dificultad a una considerable variedad de operaciones de corte -Trabajo con torno, perforación, molienda, moldeo y aserrado.

El hierro dúctil no se considera como un metal resistente a la corrosión. Las diferencias de las resistencias químicas entre el hierro dúctil y el hierro gris son nulas, por lo que ambos materiales se usan indistintamente. El hierro nodular tiene una vida prolongada en servicios con presión escasa.

La resistencia a la expansión de los hierros dúctiles es superior que la de los hierros sin alear y equivalente a la de los hierros con resistencia térmica. Los hierros fundidos esferoidales han sido puestos en servicio a temperaturas por arriba de 1100°F; de hecho el hierro dúctil contiene 6% de silicón que le da una excelente resistencia a la oxidación arriba de los 1800°F. Sin embargo, este grado no se recomienda para aplicaciones en donde se tiene choque térmico.

Los grados ferríticos no se recomiendan, normalmente, para aplicaciones de desgaste o resistencia a la abrasión, para la que los grados peralíticos han demostrado propiedades superiores a estos tanto en condiciones lubricadas como no lubricadas.

Debido a las propiedades superiores de los hierros dúctiles, las aplicaciones de este material relativamente nuevo son muchas y variadas. Algunas de ellas son en compresores, válvulas, bombas,

engranes, pistones y otros artículos similares. Las características destacadas se dan en la tabla 3.4. La alta

**TABLA 3.4. CARACTERÍSTICAS SOBRESALIENTES
DE LOS HIERROS DUCTILES.**

GRADO	CARACTERÍSTICA
60-45-10	Dureza y manejabilidad máximas.
80-60-03	Alta resistencia y resistencia óptima al desgaste.
100-70-03	Combinación excelente de resistencia, dureza y resistencia al desgaste.
120-90-02	Excelente resistencia al desgaste.
Resistente al calor	Máxima resistencia a la oxidación y al fundido.

resistencia del hierro nodular, su rigidez y su ductilidad le dan resistencia al choque mayor que cualquier otro metal; su resistencia superior a la oxidación y a la expansión son responsables del incremento en las aplicaciones tales como partes de hornos y motores.

3.1.1.5. Hierro Fundido con Alto Contenido de Silicón.

Cuando el contenido de silicón en los hierros fundidos grises se incrementa arriba del 14%, estos adquieren una resistencia extrema a la corrosión provocada por muchos ambientes. La excepción notable es el ácido fluorhídrico. De hecho, estos hierros con alto contenido de silicón son los materiales más universalmente resistentes de los metales y aleaciones (no preciosos). Su dureza inherente hace de ellos materiales

resistentes, tal como el Duriron, que contienen alrededor de 14.5% de silicón y 0.95% de carbón. Esta composición debe ser extremadamente controlada con límites estrechos para dar la mejor combinación de resistencia a la corrosión y resistencia mecánica. Las aleaciones se modifican algunas veces por la adición del 3% del molibdeno, (Durichlor) para incrementar la resistencia al HCl, cloruros y a la picadura. Una nueva aleación Durichlor 51, tiene una mejor resistencia a la corrosión y ha remplazado al Durichlor de composición regular. El Durichlor 51 contiene cromo, con pequeña cantidad de molibdeno el cual imparte un mejoramiento en la resistencia a las condiciones oxidantes. Por citar un ejemplo, la presencia de cloruro férrico y/o cloruro cúprico en ácido clorhídrico inhibe la corrosión en lugar de causar un severo ataque selectivo como sucede en la mayoría de los metales y aleaciones. (2)

El Duriron y el Duriron 51 exhibe una resistencia a la tensión de alrededor de 20,000 lb/in² y una dureza de 520 Brinell. La gravedad específica es 7.0. Ambas aleaciones pueden ser fabricadas sólo por molienda o trituración. La soldadura de estas aleaciones es muy difícil y mientras figuras o formas simples como tubos pueden ser soldados con precauciones adecuadas, esto no se puede hacer con formas complejas.

Estas aleaciones se pueden conseguir sólo en su forma fundida para líneas de desagüe (tuberías), bombas, válvulas y otros equipos de proceso. Tienen un uso extensivo como ánodos para protección catódica con corriente impresa.

La excelente resistencia a la corrosión de los hierros de alto

silicón se debe a la formación de una capa superficial pasiva SiO_2 , la cual se forma durante la exposición al medio ambiente.

3.1.1.6 Otras Aleaciones de Hierros Fundidos.

En suma, el silicón y el molibdeno, níquel, cromo y el cobre se adicionan a los hierros fundidos para mejorar su resistencia a la corrosión y a la abrasión, su resistencia al calor y algunas de sus propiedades mecánicas. La adición del cobre imparte una mejor resistencia al ácido sulfúrico y a la corrosión atmosférica.

Los hierros fundidos con alto contenido de níquel y cromo y sin cobre (mayor o arriba del 7%) son las más utilizadas de este grupo. Estas aleaciones austeníticas, conocidas como Ni-Resist, son las más duras de los hierros fundidos grises. Siete variedades de las Ni-Resist contienen desde 14 a 32% de níquel, de 1.75 a 5.5% de cromo y poseen una resistencia a la tensión de 25 a 45,000 lb/in². Algunas veces se producen como hierros dúctiles con una resistencia a la tensión arriba de 70,000 lb/in² y una elongación arriba del 40% sólo una variedad contiene 35% de níquel y se usa cuando se requiere una expansión térmica baja.

El Ni-Hard es un hierro fundido blanco que contiene cerca del 4% de níquel y 2% de cromo. Es muy duro, con una dureza de 550 a 725 Brinell. El Ni-Hard ha encontrado mucha aplicación en casos donde es necesaria una resistencia a la corrosión y a la erosión, en soluciones casi neutras y en soluciones alcalinas o lechadas.

(3)

3.1.2. Hierros Comercialmente Puros.

Los hierros comercialmente puros son barras de hierro y hierro Armco. Estos son relativamente frágiles y no se usan cuando se requiere resistencia a esfuerzos.

3.1.2.1 Hierro Forjado.

El hierro forjado es una mezcla "mecánica" de escoria y hierro con bajo contenido de carbón. Es un material ferroso que incluye una cantidad amplia y uniformemente distribuida de escoria. La escoria es un silicato de hierro que no se encuentra unido al hierro, pero coexiste con este como una fase discreta y separada. La composición de los cuatro grados de hierros forjados se dan en la tabla 3.5.

TABLA 3.5. COMPOSICION NOMINAL DE ALGUNOS HIERROS FORJADOS

GRADO	CARBON*	SILICON	MANGANESO	FOSFORO	AZUFRE	NIQUEL
Standar	0.02	0.12	0.03	0.12	0.02	--
4D	0.02	0.13	0.06	0.13	0.02	--
Níquel	0.06	0.18	0.035	0.07	0.01	2.25
Manganeso	0.035	0.11	1.00	0.035	0.02	--

*Balance: Hierro más 9.0% de escoria excepto para el grado Níquel que contiene 1.0% de escoria.

El Hierro Forjado genuino tiene poca cantidad de carbón y manganeso; el contenido de carbón, en este, es de menos del 0.10% y el de manganeso es de menos del 0.06%. El silicón, que se encuentra presente en alrededor del 0.10-0.20%, se encuentra principalmente en la escoria como silicato de hierro. En el hierro de alta calidad, el contenido de escoria varía de 1 a 4% en peso con un promedio de 2.5%. El hierro forjado es el único metal

ferroso que contiene escoria de silicio. Esta escoria le proporciona al hierro forjado sus propiedades características. Debido a su alta pureza, el hierro forjado tiene una muy alta conductividad térmica, la cual es una cuarta parte más alta que la del acero al carbón. Su coeficiente de expansión es aproximadamente igual que la del acero. Al igual que otros metales ferrosos, es magnético. Su límite de tensión y de elasticidad son aproximadamente el 80% de las del acero al carbón común. La presencia de fibras de silicato causa que el metal sea fuerte y dúctil y que pueda soportar la fatiga y el impacto. Su resistencia a la fatiga es considerada excelente y superior a la del acero. La adición de cerca del 3% de níquel incrementa la resistencia sin cambiar las propiedades del material. Un hierro forjado especial contiene cerca del 1% de manganeso y tiene alta resistencia al impacto a temperaturas bajo cero. Algunas propiedades promedio de los hierros forjados se tabulan en la tabla 3.6.

Los productos de hierro forjado pueden ser elaborados en cualquier forma que se desee. Son fáciles de forjar con cualquiera de los métodos comunes. Su pureza relativa contribuye a que sean fáciles de soldar.

El hierro forjado se considera normalmente como un material resistente a la corrosión, pero no puede ser puesto en la misma categoría de los aceros inoxidable. Este es más parecido al acero al carbón y al hierro fundido. Al ser expuesto a los ambientes corrosivos, este metal desarrolla una capa protectora, densa, uniforme y adherente que tiende a disminuir el ataque. Las fibras

TABLA 3.6. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS
PROMEDIO DE LOS HIERROS FORJADOS

PROPIEDAD	UNIDADES	HIERRO FORJADO	HIERRO FORJADO CON 3% DE NIQUEL
FISICAS:			
Densidad	lb/in ³	0.278	----
Conductivi- dad Term. a 212°F	Btu/ft ² /hr/ (°F/ft)	35	----
Coef. Prom. de Expan- sión Term. (68-212°F)	ln/ln/°F x 10 ⁻⁴	6.7	----
MECANICAS:			
Tem. máx. en servi- cio cont.	°F	1200	1200
Mod. Elas- ticidad ba- jo Tensión	psi x 10 ⁴	20.5	----
Recocido:			
Límites de Tensión	psi x 10 ³	(1) 48	(1) 60
Elasticidad	psi x 10 ³	90	45
Elongación	%	25	22
Reduc. Area	%	45	40
Dureza	Brinell	100	150
Impacto	ft-lb	55	----

(1) Moldeado por calentamiento.

de silicato tienden aumentar la capa de óxido y bloquear la corrosión. Cualquier reducción del espesor del metal ocurre lenta y uniformemente con un mínimo de picadura. Por esta razón el hierro forjado tiene una excelente resistencia a la corrosión atmosférica, ya sea rural, marina o industrial. Los hierros forjados son menos corroides que los aceros, en aplicaciones

estructurales. El hierro resiste el ataque del agua y de suelos húmedos. Como los álcalis y las soluciones alcalinas no son agresivas se puede utilizar este material para su transporte, no sucede lo mismo con los ácidos, si estos son diluïdos, ya que causan una rápida desintegración del metal. Ciertos ácidos, como el nítrico y el sulfúrico pueden transportarse en tanques hechos de este metal, si se encuentran concentrados y fríos. Los compuestos orgánicos ocasionan problemas y atacan un poco a los hierros forjados.

El hierro forjado encuentra un uso extensivo a temperaturas elevadas. Aunque han sido usados a temperaturas tan altas como 1200°F, su temperatura de operación segura con carga mecánica es de 650°F. Arriba de este punto, su resistencia a la tensión desciende rápidamente. Algunas de sus aplicaciones típicas a altas temperaturas son; tubería de abastecimiento de vapor, líneas de recirculación de condensado y líneas de alimentación de calentadores. (4)

3.1.3. ACEROS DE BAJA ALEACION.

El acero al carbón es una aleación, que sólo o en combinación con cromo, níquel, cobre, molibdeno, fósforo y vanadio en un rango de poco porcentaje dan como resultado los aceros de baja aleación los cuales mejoran sus propiedades mecánicas y su dureza al agregarseles acero de alta aleación. Sus resistencias son apreciablemente menores a las del acero al carbón puro, pero su atributo más importante es su mejor resistencia a la corrosión atmosférica. Presentan ventajas apreciables en soluciones acuosas.

Su relación de alta resistencia/peso es su factor predominante, con ambientes corrosivos de poca importancia. Un buen ejemplo es el acero H-11 (5% de Cr, 1.5% de Mo, 0.4% de V y 0.35% de C) el cual puede ser tratado térmicamente para dar una resistencia a la tensión mayor a 300,000 lb/in². (5)

Para fabricar el acero, se utilizan cerca de 20 sustancias diferentes. Algunas de ellas son impurezas y gases que tienen que ser removidos del metal fundido; otras se adicionan para impartir ciertas características al acero. Dentro de estas el carbón es el agente principal para impartir dureza al acero, pero debemos aclarar que si bien, la resistencia a la tensión se incrementa con el contenido de carbón, la ductilidad y la soldabilidad disminuyen. La composición nominal del acero al carbón se da en la tabla 3.7.

TABLA 3.7. COMPOSICION NOMINAL DEL ACERO AL CARBON

AISI No.	CARBON	MANGANESO	FOSFORO	AZUFRE
C1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.040 máx	0.050 máx
C1040	0.37-0.44	0.60-0.90	0.040 máx	0.050 máx

El acero al carbón en combinación con ciertos ingredientes adquiere propiedades deseables. Las propiedades promedio de los grados comunes, AISI 1020 y 1040, se dan en la tabla 3.8.

La resistencia a la corrosión del acero depende de la formación de la película superficial pasivada, generalmente un óxido. Esta película, la cual es producto de la acción destructiva, es visible al ojo humano, y puede favorecer tanto la aceleración o el

bloqueo del ataque. Con una la película gruesa, densa e impenetrable, la penetración de oxígeno y agua a la superficie del metal disminuye y la velocidad de corrosión se ve retardada. Si la

TABLA 3.8. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS PROMEDIO DEL ACERO

PROPIEDAD	UNIDAD	ACERO AL CARBON		ALEACION DE ACERO		
		C1020	C1040	2940	3140	4940
FISICAS:						
Densidad	lb/in ³	0.284	0.284	0.284	0.284	0.284
Conducti- vidad term. a 212°F	Btu/ft ² /hr/ (°F/ft)	28	28	27	27	27
Coef. prom. de Expan--- sion term. (68-212°F)		6.5	6.2	6.1	6.5	6.5
MECANICAS:						
Temp. máx. de opera-- ción en -- serv. cont.	°F	900	900	1200	1200	1200
Modulo de Elasticidad en Tensión	psi x 10 ⁶	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Recocido;						
Límite de Tensión	psi x 10 ³	57	75	100	95	108
Elasticidad	psi x 10 ³	49	51	72	61	68
Elongación	%	36	30	24	24	22
Red. Area	%	66	57	48	51	50
Dureza	Brinell	111	149	200	190	217
Impacto	ft-lb	80	38	72	34	38
Normal;						
Resistencia a la Tensión	psi x 10 ³	64	86	110	125	185
Elasticidad	psi x 10 ³	50	54	76	84	125
Elongación	%	36	28	22	20	12
Red. Area	%	68	55	48	55	36
Dur eza	Brinell	130	170	240	260	360

capa de óxido es abultada y voluminosa, la resistencia a la penetración de aire y humedad es pequeña y la velocidad de ataque puede permanecer constante o incrementarse.

La velocidad general de corrosión del acero al carbón expuesto a la atmósfera varía de acuerdo al grado de contaminación y humedad. la combinación de humedad y contaminación da como resultado variados efectos, teniendo una velocidad de 1mil (milésima de pulgada) por año en áreas rurales y arriba de 5mils en exposiciones marinas a 10mils en áreas altamente industrializadas. La picadura del metal ocurre rara vez a condiciones normales.

Este metal no se ve afectado por las aguas naturales, pero con los cambios de pH alcalino o neutro a ácido, la velocidad de ataque aumenta, mientras que el agua de mar y subterránea disminuye su vida útil.

Los ácidos son muy agresivos y generalmente el acero no puede usarse en contacto con ellos, ya que a un pH de 4 o mayor, el metal es susceptible a la fragilización por hidrógeno. También se ve atacado por los álcalis y algunos compuestos orgánicos.

Las propiedades del acero al carbón son tales que el metal encuentra muchas aplicaciones a temperaturas arriba de 900°F. El metal resiste el ataque por oxidación atmosférica, vapor, gases de combustión, monóxido de carbón, dióxido de carbón e hidrocarburos gaseosos. El acero común se usa para torres de destilación, recalentadores de vapor y tubos de escape.

3.1.4 ALEACIONES DE ACERO CON CONTENIDO MEDIO DE CARBON.

Estas nuevas aleaciones se necesitan para combatir las condiciones más vigorosas de los procesos, incluyendo los ambientes más agresivos de los nuevos y de los antiguos procesos. La demanda más grande de estas aleaciones proviene de las industrias química, petroquímica, alimentaria, farmacéutica y de fibras sintéticas.

Las aleaciones de acero con contenido medio de carbón se usan para reforzar barras de concreto, gradas, árboles de levas, engranes y otros implementos de agricultura, automóviles y maquinaria.

Antes de describir las aleaciones de acero con medio contenido de carbón debemos aclarar que los aceros se designan de acuerdo a su contenido de carbón y que se clasifican como se muestra en la tabla 3.9.

TABLA 3.9. CLASIFICACION DE LOS ACEROS SEGUN SU CONTENIDO DE CARBON.

DESIGNACION	CONTENIDO DE CARBON	AREA DE USO
1. Acero con bajo contenido de carbón	0.03 a 0.30% C	Hojas y estructuras.
2. Acero con contenido medio de carbón	0.35 a 0.55% C	Partes de maquinaria.
3. Acero con alto contenido de carbón	0.60 a 1.5% C	Herramientas y mecanizado.
4. Hierro fundido	más del 2% de carbón.	Partes fundidas.

De acuerdo con la tabla 3.9. las aleaciones de acero con contenido medio de carbón son aquellas aleaciones en las que el

carbón se encuentra presente de 0.35 a 0.55% del peso total.

3.1.4.1. El "Durimet 20" y otras aleaciones "20".

El "Durimet 20" es una aleación fundida austenítica muy conocida, el Instituto de Aleaciones Fundidas la ha designado como ACI tipo CN-7M. Esta aleación, como se muestra en la tabla 3.10, es un acero inoxidable austenítico aleado con acero al carbón y que contiene además níquel, cromo, cobre y molibdeno. El cromo le da una resistencia media a la oxidación; el níquel más cromo la proveen de las propiedades mecánicas normalmente asociadas a los aceros inoxidables; el molibdeno mejora su resistencia a la picadura e incrementa su resistencia química; el cobre incrementa su inusual resistencia al ácido sulfúrico. Para una máxima resistencia a la corrosión las aleaciones fundidas deben ser enfriadas y recocidas al fundirse o laminarse.

Esta aleación fue desarrollada originalmente para tener una resistencia al ácido sulfúrico superior a la de los otros aceros inoxidables. Su composición está tan bien balanceada que su resistencia a la corrosión producida por muchos otros agentes químicos es ampliamente superior a la de los aceros inoxidables austeníticos convencionales. Esta aleación es altamente resistente tanto a las soluciones oxidantes como a las soluciones reductoras. Sus propiedades físicas y mecánicas son muy cercanas a las de las aleaciones CF-8 y CF-8M. En la tabla 3.11 se mencionan las propiedades más importantes del "Durimet 20". Al igual que los aceros inoxidables austeníticos fundidos, esta aleación tiene una baja conductividad térmica y un alto coeficiente de expansión

térmica. Es normalmente no-magnética pero si se le da un tratamiento de enfriamiento puede proporcionarle algo de

TABLA 3.10. COMPOSICION NOMINAL DE ALGUNAS ALEACIONES MEDIAS.

	CARBON	NIQUEL	CROMO	MOLIBDENO	COBRE	OTROS
"Durimet"	0.07 *	29.00	20.00	2.00 min	3.00+	Mn 1.50 Silicon 1.50
"Worthite"	0.07 *	24.00	20.00	3.00	1.75	Mn 0.60 Silicon 3.25
"Carpenter 20"	0.07 *	29.00	20.00	2.00 min	3.00+	Mn 0.75 Ti 0.90
"Ni-o-nel"	0.05 *	42.00	21.50	3.00	2.25	Mn 1.00 Silicon 0.50
"Hastelloy F"	0.05 *	44.50	22.00	6.50	--	Co 2.50 W 1.00 Mn 1.50 Silicon 1.0 Columb. Ta 2.15
"Illium a"	0.29	56.00	22.50	6.40	6.50	Mn 1.25 Silicon 0.65
"Illium R"	0.08 *	64.00	22.00	5.00	2.50	Mn 0.90 Silicon 0.15

* Contenido máximo.

+ Contenido mínimo.

Balance: Hierro con cantidades normales de azufre y fósforo.

magnetismo. Las características de soldadura son buenas.

Las aleaciones normales designadas como "20" en su estado fundido son enfriadas y recocidas para mejorar su resistencia química. Esta aleación es poco afectada por las atmósferas rurales, urbanas e industriales, por lo que la superficie maquinada puede conservar su estado original por muchos años. Su

resistencia al agua natural, de drenaje y de proceso es excelente, pero si en ellas se encuentra presente cloro en estado libre puede ocasionar problemas. Esta aleación presenta una resistencia satisfactoria a la concentración de cloro si esta se encuentra cercana al punto de saturación; mientras que arriba de este punto, se forma cloro húmedo que ataca rápidamente al metal.

El agua limpia de mar ordinariamente no presenta ningún problema, pero si el metal trabaja con este tipo de agua a condiciones muy severas, presentará picadura y agrietamiento corrosivo.

Las sales neutras o alcalinas no tienen ningún efecto deteriorante sobre esta aleación fundida por lo que comúnmente pueden transportarse y elaborarse en equipo de proceso fabricados con esta aleación. Los nitratos, nitritos, fosfatos, sulfatos y sulfitos provocan pocos o ningún efecto corrosivo sobre la aleación ya que esta se pasiva ante la presencia de ellos. La aleación CN-7M se prefiere a la CF-8 y a la CF-8M para servicios en los que se encuentran presentes sulfitos y sulfatos debido a que el ácido sulfúrico libre ataca a las aleaciones bajas de aceros inoxidable.

El "Durimet 20" y otras aleaciones designadas como "20" son altamente resistentes a las salmueras a todas sus concentraciones. Aunque los cloruros de aluminio, amonio, magnesio y zinc son más agresivos que los de bario, calcio y níquel, todos pueden transportarse con seguridad en equipo elaborado con esta aleación a todas sus concentraciones y a todas las temperaturas. Las únicas excepciones las representan los cloruros cúprico y férrico al

igual que los hipocloritos los cuales son muy agresivos y hasta en pequeñas cantidades provocan la formación de celdas de concentración corrosivas y picadura del metal.

TABLA 3. 11. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS PROMEDIO DE ALGUNAS ALEACIONES FUNDIDAS CON CONTENIDO MEDIO DE CARBON.

PROPIEDAD	UNIDADES	"DURIMET 20"	"WORTH-ITE"	"HASTE-ELLOY F"	ILLIUM 0"
FISICAS:					
Densidad	lb/in ³	0.286	0.284	0.295	0.309
Conductividad térm. a 212°F	Btu/ft ² /hr/°F/ft)	12.1	10.7	9.4	7.0
Coef. med. de Expansión term. (68-212°F)	in/in/°F x 10 ⁻⁶	8.6	8.5	8.1	12.2
MECANICAS:					
Temp. máx. de operación en servicio cont.	°F	1200	---	1600	1600
Módulo de Elasticidad en tensión	psix 10 ⁶	24.0	---	29.0	24.8
Recocido:					
Límite de Tensión	psix 10 ³	65	75	73	(1) 68
Elasticidad	psix 10 ³	90	95	97	99
Elongación	%	48	35	20	7
Red. de área	%	52	--	20	11
Dureza Brinell		130	160	160	168
Impacto	ft-lb	70	--	80	6

(1) Fundido.

Aunque en el rango de 60-90% de concentración de ácido sulfúrico se observa que la velocidad de ataque aumenta para otras

aleaciones, la aleación "20" da una resistencia satisfactoria a todas las concentraciones arriba de 175°F. A la temperatura de ebullición del ácido sulfúrico si se incrementa la concentración del ácido se observa un incremento en la velocidad de corrosión.

La aleación no es atacada por el ácido nítrico a menos que la temperatura sea mayor de 250°F y la concentración exceda el 70%; arriba de estos límites la velocidad de deterioro se acentúa y se presenta un ataque acentuado en presencia de ácido nítrico fumante arriba de los 150°F.

El "Durimet 20" y sus contrapartes no son comúnmente recomendadas para transportar ácido clorhídrico. El ácido fluorhídrico a temperatura ambiente y arriba del 20% de concentración, puede transportarse en equipo fabricado con esta aleación. La aleación no se recomienda para caústicos fundidos y para soluciones caústicas arriba del 50% de concentración y a una temperatura de 300°F. Los gases reductores tienden a romper la superficie pasivada de la aleación y causa un ataque acelerado.

Las aplicaciones más comunes de este tipo de aleaciones se encuentra en la fabricación de bombas, válvulas, eyectores, agitadores, ventiladores, tanques pequeños y otros elementos parecidos.

3.1.4.2. "Worthite".

El "Worthite" es una aleación ampliamente aceptada como un excelente material para bombas, válvulas y otras aplicaciones en las que se requiera resistencia a la abrasión y a la corrosión. Al igual que la aleación "20", el "Worthite" es una aleación

super-inoxidable de níquel-cromo-cobre-molibdeno. Esta aleación se puede encontrar tanto en su forma forjada como en su forma fundida. La composición nominal de esta aleación se da en la tabla 3.10 en la que también se puede comparar con la composición del "Durimet 20". Las propiedades de las aleaciones fundidas se dan en la tabla 3.11 mientras que las de las aleaciones forjadas se dan en la tabla 3.12.

El "Worthite" es normalmente una aleación pasiva y las atmósferas rurales, urbanas e industriales no lo afectan y puede conservar su brillo superficial por años. Aunque el agua natural la afecta muy poco, la adición del cloro libre la vuelve agresiva para el "Worthite". Con el agua de mar esta aleación llega a tener una vida indefinida.

Las sales neutras y alcalinas no afectan a este metal, al igual que los sulfatos, sulfitos, nitratos, nitritos y fosfatos, mientras los cloruros tienen efectos variados. Los cloruros de aluminio, calcio, magnesio, potasio, sodio y zinc incrementan ligeramente la velocidad de ataque, pero no en forma alarmante, sin embargo la tendencia a la picadura del metal siempre está presente. Los cloruros cúprico, férrico, ferroso y de níquel son más agresivos para este metal, que los cloruros antes mencionados y el uso del "Worthite" estará en condiciones extremas.

El "Worthite" resiste todas las concentraciones de ácido sulfúrico a temperaturas por arriba de los 175°F. La presencia de cloruros contaminantes en el ácido pueden romper la película pasivada y causar un ataque local y picadura del metal.

El "Worthite" resiste el ataque de las bases débiles y de las

soluciones de hidróxido de sodio a una concentración del 50%. A temperaturas elevadas, las concentraciones mayores de caústicos contribuye a la ruptura intergranular, por lo que esta aleación no se recomienda para caústicos fundidos.

Los compuestos orgánicos tienen efectos ligeros o ninguno sobre esta aleación, por lo que es ampliamente utilizada en la industria química, petroquímica, del petróleo y de tejido. Aunque los hidrocarburos clorados secos pueden ser transportados en equipo fabricado con esta aleación sin peligro de ser atacados por estas sustancias, la presencia de humedad causa hidrólisis y la formación del ácido clorhídrico diluído. Bajo estas circunstancias la película pasivada del "Worthite" se rompe y el metal queda susceptible a la picadura.

La forma fundida del "Worthite" es apropiada para bombas, válvulas, conexiones y otros equipos químicos resistentes; los productos forjados incluyen conexiones, bombas, ejes, válvulas, tuercas y tornillos.

3.1.4.3. "Carpenter 20".

El "Carpenter 20" es la versión forjada del "Durimet 20" y se produce en diversas formas -alambre, barras, bielas, bandas, hojas, platos, tubos y tuberías.

Esta aleación forjada tiene todas las propiedades deseables de resistencia a la corrosión de la aleación fundida además de otras ventajas adicionales.

La composición nominal del "Carpenter 20" se dan en la tabla 3.10, esta es aproximadamente igual a la del "Durimet 20". Una

versión de esta aleación estabilizada con columbio es el

TABLA 3.12. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS PROMEDIO
DE ALGUNAS ALEACIONES FORJADAS CON CONTENIDO
MEDIO DE CARBON.

PROPIEDAD	UNIDAD	"CAR-- PENTER 20 Y - 20Cb"	"WORTH- ITE"	"NI-O- NEL"	"HAST- ELLOY F"	"ILLI- UM R"
FISICAS:						
Densidad	lb/in ³	0.289	0.284	0.295	0.295	0.309
Conductivi- dad térm. a 212°F	Btu/ft ² / hr/(°F/ft)	12.1	10.7	---	9.4	7.5
Coef. med. de Expansión térmica (68-212°F)	in/in/ °F x 10 ⁻⁶	7.9	8.5	7.2	8.1	12.0
MECANICAS:						
Temp. max. de Operac. en serv. continuo	°F	1800	---	---	1600	1600
Módulo de Elasticidad en Tensión	pa x 10 ⁶	---	---	28.5	29.0	31.1
Recocido:						
Límite de Tensión	pa x 10 ³	85	85	95	102	109
Elasticidad	pa x 10 ³	95	40	47	47	50
Elongación	%	50	40	42	45	54
Red. de área	%	65	--	--	50	71
Dureza	Brinell	160	170	150	168	170
Impacto	ft-lb	--	--	--	79	78

·Carpenter 20Cb·, que se usa en aplicaciones que involucran la soldadura de las piezas durante su fabricación por lo que el equipo, así fabricado debe ser puesto en servicio en el lugar donde se lleve a cabo la soldadura de las piezas. Las propiedades

promedio de esta aleación se dan en la tabla 3.12.

Las características de manejabilidad del "Carpenter 20" son las mismas que las del acero inoxidable 18-8.

El "Carpenter 20" puede soldarse rápidamente.

Los datos de resistencia química del "Durimet 20" pueden aplicarse al Carpenter 20" debido a que estas dos aleaciones tienen una composición idéntica entre si.

El "Carpenter 20" y el "Carpenter 20Cb" se usan en la manufactura de sistemas de tuberías, tanques, columnas, válvulas, bielas de bombas y otros equipos de proceso.

3.1.4.4. "Ni-o-nel".

El "Ni-o-nel" es una de las últimas aleaciones que han sido comercializadas y que se puede conseguir en formas forjadas. La tabla 3.10 muestra la composición nominal de esta aleación. El "Ni-o-nel" es una aleación de níquel-hierro-cromo que ha sido desarrollada para proveer resistencia tanto a ambientes oxidantes como a ambientes reductores.

El bajo contenido de carbón y la adición de titanio estabilizan la aleación evitando la precipitación de los carburos en las zonas afectadas por el calentamiento para la soldadura.

La combinación de cromo-níquel proporciona una resistencia media a la oxidación, mientras que la combinación de níquel-cobre-molibdeno aumenta la resistencia a los ambientes reductores.

El "Ni-o-nel" resiste también la "tensión-corrosión" que provoca la ruptura de los metales en ambientes clorados.

El "Ni-o-nel" es comparable al "Carpenter 20", ambas aleaciones tienen una densidad similar. Como se muestra en la tabla 3.12, las propiedades mecánicas de estas dos aleaciones son casi similares; aunque el "Ni-o-nel" tiene una resistencia mecánica ligeramente superior, pero su elongación es menor.

Esta aleación de níquel-hierro-cromo puede ser forjada y formada en caliente. Su resistencia a la corrosión atmosférica es excelente. En atmósferas rurales o urbanas conserva su brillo por varios años; pero en atmósferas industriales y contaminadas su superficie se oscurece. El agua natural y de proceso no tienen ningún efecto deteriorante sobre la aleación, ante el agua de mar esta aleación es más resistente a la corrosión que causa picadura y agrietamiento, que los aceros inoxidable austeníticos.

El "Ni-o-nel" muestra una resistencia inusual al ácido sulfúrico a todas sus concentraciones cuando se encuentra a temperatura ambiente. A 175°F sólo es capaz de resistirlo si se encuentra a una concentración del 60% o menor, y si el ácido está en su punto de ebullición la concentración debe ser del 40% como máximo. La presencia tanto de sales oxidantes (excepto los cloruros) y de aire aumentan la resistencia de esta aleación hacia el ácido sulfúrico.

Ante el ácido nítrico, el "Ni-o-nel" es completamente resistente a todas sus concentraciones a temperatura ambiente, pero si el ácido se encuentra en su punto de ebullición su concentración deberá ser del 65% o menor. Una ventaja distintiva de esta aleación es su resistencia al ácido nítrico que contiene pequeñas cantidades de cloruros y fluoruros, y a las mezclas de

ácido nítrico y ácido sulfúrico, o de ácido nítrico y de ácido fosfórico.

Las bases débiles afectan a esta aleación en forma ligera. El "Ni-o-nel" resiste la mayoría de las soluciones de hidróxido de amonio. Las bases fuertes como el hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio la afectan en forma mínima, pero las soluciones caústicas causan un gran deterioro del metal.

Esta aleación de níquel-hierro-cromo es muy resistente a los ácidos orgánicos.

Generalmente, este nuevo material tiene unas propiedades resistentes a la corrosión superiores a las de los aceros inoxidable austeníticos, por lo que puede sustituirlos cuando se encuentren operando a condiciones extremas. Para aplicaciones a temperaturas elevadas, el "Ni-o-nel" más ampliamente resistente que los aceros inoxidable pero no tan bueno como otros metales que se utilizan a estas temperaturas.

3.1.4.5. "Hastelloy F".

El "Hastelloy F" es una aleación de níquel-cromo-hierro-molibdeno que se ha desarrollado para soportar los efectos corrosivos tanto de los medios oxidantes como los de los medios reductores. El cromo aumenta la resistencia a los medios oxidantes mientras que el cromo mas molibdeno mejoran la resistencia a la picadura. El níquel sirve para dos propósitos; aumenta la resistencia a los ambientes reductores y disminuye la susceptibilidad del metal a la ruptura. La composición nominal de esta aleación se da en la tabla 3.10. En la tabla 3.11 se pueden

observar sus propiedades físicas y mecánicas más sobresalientes. Esta aleación es austenítica y no magnética.

El "Hastelloy F" puede ser trabajado en frío, aunque tiende a ser más duro de trabajar que la mayoría de los aceros inoxidable austeníticos.

La operación de soldadura para esta aleación debe hacerse de la manera más continua y uniforme que se pueda, ya que el sobrecalentamiento del metal puede ocasionar la precipitación de los carburos, mientras que un calentamiento corto ocasiona ruptura. Después de la soldadura las piezas deben ser calentadas a 2100-2150°F, por una hora, y enfriadas rápidamente con aire o con agua. Si la aleación se sobrecalienta 25°F más que la temperatura recomendada se puede disminuir en forma seria su resistencia química y mecánica.

El "Hastelloy F" tiene mucho uso en aplicaciones en las que se encuentran presentes el ácido fórmico, el ácido acético, el ácido fosfórico y el ácido nítrico.

3.1.4.6. "Illium".

El "Illium" es una aleación inoxidable de níquel-cromo fortalecida con cobre y molibdeno para incrementar de esta forma su resistencia química. Se puede conseguir en dos formas "G" y "R", la composición nominal de cada una de ellas se dan en la tabla 3.10. El "Illium G" sirve para formas fundidas mientras que el "Illium R" se puede encontrar en forma de hojas, tiras, barras y tubos.

El "Illium R" tiene excelentes propiedades mecánicas; su

resistencia a la tensión y su límite de elasticidad son 50% mayores que las propiedades correspondientes del acero 18-8. Es duro, dúctil y fuerte, con una resistencia a la tensión de 140,000 psi, que permite trabajarlo en frío. El "Illium G" tiene una menor resistencia mecánica y una mayor dureza, pero su resistencia al impacto y su elongación son pobres. Esta aleación puede ser endurecida por trabajo en frío pero no por tratamiento térmico. Las propiedades más sobresalientes de estas aleaciones se dan en la tabla 3.11.

Debido a que la composición del "Illium G" es substancialmente la misma que la del "Illium R", los datos de resistencia a la corrosión dados para la aleación "G" pueden ser aplicados para la aleación "R". Estas aleaciones resisten el ataque provocado por el agua natural y por el agua de proceso, y pueden ser utilizadas para transportar agua de mar en condiciones críticas. Han sido adaptadas para servicios químicos que involucran el uso de ácido fosfórico, nítrico y sulfúrico, pero han visto limitada su aplicación en servicios en los que se encuentra presente el ácido clorhídrico y otras soluciones cloradas. Generalmente los álcalis a todas sus concentraciones y temperaturas pueden ser transportados con seguridad en equipo fabricado con estas aleaciones, excepto los hidróxidos de potasio y de sodio que causan ataque intergranular a temperaturas elevadas. Los compuestos orgánicos atacan ligeramente a estas aleaciones.

El "Illium" se usa en las industrias química, petroquímica, alimentaria, del celofán y de la pulpa y el papel. Sus aplicaciones más comunes son la elaboración de bombas, válvulas,

espreas de rociado, conexiones, filtros, coples y ejes.

Debido a que estas aleaciones son muy caras, sólo deben utilizarse cuando ninguna otra aleación, más barata, resista las condiciones del ambiente de trabajo. (6)

3.1.5. ACEROS INOXIDABLES:

Con la denominación de aceros inoxidable se agrupa una serie de aceros que en determinadas condiciones y circunstancias resisten bien la acción de ciertos agentes corrosivos como atmósferas industriales, ambientes húmedos, ácidos de diversas clases y concentraciones y también el efecto de temperaturas elevadas sin sufrir una oxidación o destrucción sensible. Conviene advertir que aunque reciben el nombre de inoxidable, no son completamente inoxidable en el sentido mas amplio de la palabra, ya que en realidad sólo resisten bien la acción de ciertos agentes corrosivos y en cambio, en otras circunstancias determinadas, se oxidan y corróen en forma parecida a los aceros ordinarios.

El cromo es su principal elemento aleable, ya que estos aceros deben contenerlo mínimamente en un 11%. El cromo sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejorar la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, la inoxidable y lo que es más importante la resistencia a la corrosión.

Actualmente se utiliza un gran número de aceros inoxidable, por su resistencia a la corrosión, sus propiedades mecánicas y su amplia variedad de precios.

El Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI siglas en

inglés), ha clasificado numéricamente a los cuatro grupos de estos materiales.

3.1.5.1. GRUPO I.

Los materiales de este grupo son llamados aceros inoxidables martensíticos porque pueden endurecerse por tratamiento térmico similar al que se aplica ordinariamente al acero al carbón. En estos aceros, la resistencia se incrementa y su ductilidad decrece con el incremento de dureza. Su resistencia a la corrosión generalmente es menor que las de los grupos II y III. Los aceros martensíticos pueden tratarse térmicamente para obtener mayor resistencia a la tensión. Su resistencia a la corrosión es generalmente mejor en las condiciones de dureza que en las de fragilidad y suavidad. Se usan en aplicaciones que requieran resistencia moderada a la corrosión, alta resistencia a los esfuerzos y gran dureza. Algunos ejemplos de aplicación son en partes de válvulas, conexiones de bola (440 A) e instrumentos quirúrgicos (420). Estos aceros no deben utilizarse para interiores de equipo, tales como tanques y líneas de tubería.

El tipo 416 es el más fácil de cortar y se usa para cuerpos y soportes de válvulas, tuercas, pernos y otras partes, con la finalidad de reducir el costo de la maquinaria.

3.1.5.2 GRUPO II FERRITICO.

Aceros no endurecibles que son designados con este nombre por no poder ser endurecidos por tratamiento térmico. Estos aceros salen de la forma gamma y consisten de hierro alfa a temperaturas

por arriba del punto de fusión. Los aceros al carbón ordinarios se endurecen debido a los cambios de fase durante su enfriamiento. Los aceros de este grupo son austeníticos por arriba de los 1670°F y con un contenido entre 0 y 2% de carbón. Los aceros austeníticos son hierro gamma, no magnético y con estructura cúbica centrada en la cara. Al sobre enfriarse, se transforma en hierro alfa o ferrítico, el cuál es magnético y con estructura cúbica centrada en el cuerpo. Cuando se enfrían rápidamente se transforman en estructuras martensíticas dúras, que son endurecibles debido a sus diferentes contenidos de la forma gamma. El tipo 405 parece ser la excepción, por no endurecerse debido a su alto contenido de aluminio.

El tipo 430 pueden formarse fácilmente y tiene una buena resistencia a la atmósfera, esta es una razón por la que es muy utilizado en accesorios de automóviles, en plantas de oxidación de amoníaco para la fabricación de ácido nítrico, para carros-tanque y tanques de almacenamiento de ácido nítrico. Pese a todo lo anterior, en estas aplicaciones químicas, ha sido desplazado por el tipo 18-8 debido a la facilidad de soldado y su mejor ductilidad, además de su mejor resistencia a la corrosión, si se le da un tratamiento térmico apropiado. Otros usos del tipo 430 es en contenedores frágiles para latón y aquellos que requieran tratamiento térmico de baja temperatura, anillos de quemadores de aceite, ventanas sujetadas con pernos y otros adornos decorativos.

Los tipo 442 y 446 encuentran aplicaciones donde se requiere resistencia al calor, tal como partes de hornos y equipo de tratamiento térmico. Poseen buena resistencia a la oxidación a

altas temperaturas y al ataque de gas sulfuroso, debido a su alto contenido de cromo. Estos materiales no poseen una buena estabilidad estructural, ni buena resistencia a altas temperaturas, por lo que se deben seleccionar con cuidado.

Uno de los aspectos más interesantes del grupo II es su resistencia a la corrosión, ya que tienen un desempeño bueno en muchos casos en donde los tipos 18-8 fallan, particularmente en aguas que contienen cloro.

3.1.5.3 GRUPO III AUSTENITICOS.

Los aceros inoxidable austeníticos son esencialmente no magnéticos y no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Al igual que los aceros ferríticos, se endurecen sólo por enfriamiento. La mayoría de estos aceros contienen níquel como su principal forma austenítica, aunque los tipos 201 y 202, relativamente nuevos, contienen poco níquel y cantidades substanciales de manganeso.

Los aceros austeníticos poseen mejor resistencia a la corrosión que los aceros fuertes de cromo (Grupos I y II) y generalmente la mejor resistencia de los cuatro grupos, exceptuando al CD-4MCu. Por esta razón, son ampliamente recomendados para la mayoría de los ambientes corrosivos como los que se encuentran en los procesos industriales. Son resistentes a la herrumbre debida a la atmósfera y encuentran amplio uso en cuestiones arquitectónicas, en accesorios para cocinas, en la manufactura de alimentos enlatados y para aplicaciones en donde la contaminación (herrumbre) no es deseable.

Los aceros de las series 201 y 202 muestran casi la misma resistencia a la corrosión que los aceros tipo grado 302. Los "caballos de trabajo" para los procesos industriales son los aceros tipo 304, 304L, 316 y 347. Los aceros con molibdeno como soporte, tipo 316, son considerablemente mejores en muchas aplicaciones que el tipo 304. El tipo 316 exhibe una mejor resistencia a la picadura, al ácido sulfúrico y a los ácidos orgánicos calientes. Su resistencia al calor generalmente se incrementa con el contenido de cromo y molibdeno. Por esto el tipo 310, algunas veces llamado 25-20, es una de las aleaciones más resistentes al calor.

La aleación 20 no tiene una clasificación numérica dada por AISI, pero se lista en el grupo III debido a su uso extensivo en aplicaciones de corrosión. Esta aleación es mejor conocida en su forma forjada el Carpenter 20 y en su forma fundida el Durimet 20. Posee la mejor resistencia a la corrosión sobre cualquiera de las otras aleaciones citadas. Se fabrica con y sin la adición de columbio.

3.1.5.4 GRUPO IV.

Consiste en aceros endurecidos por añejamiento o por precipitación. Se endurecen y se hacen resistentes por inmersión en una solución seguida de calentamiento por un tiempo considerable a una temperatura aproximada al rango de 800 y 1000°F. Puede obtenerse una resistencia a la tensión por arriba de las 200,000 lb/in². Estos aceros tales como el tipo 322, 17-7 PH, 17-4 PH, 14-8 MoPH y el AM350 se aplican en la industria de

aviones y misiles bajo condiciones relativamente ligeras de corrosión. Su resistencia a la corrosión a algunos ambientes es generalmente menor que la del tipo 18-8, excepto para el CD-4MCu, el cual es mucho mejor que los cinco listados anteriormente, esta aleación es algunas veces superior al acero 18-8.

Los aceros inoxidable fundidos y sus aleaciones generalmente tienen alguna composición química diferente a la de sus similares forjados. Una diferencia es su alto contenido de silicón, lo cual incrementa su fundibilidad. El contenido de silicón es generalmente del 1% como máximo en los aceros inoxidable forjados. Cabe aclarar que una parte fundida no puede laminarse en su forma particular, ya que la microestructura puede ser variada considerablemente con el correspondiente contenido de ferritas. El alto contenido de ferritas en una matriz substancialmente austenítica incrementa su resistencia, pero los productores de los materiales forjados no pueden tomar ventaja de esta situación debido a que la mezcla de estructuras ferríticas y austeníticas causan dificultad en el laminado. Por eso y otras razones el Instituto de Aleaciones Fundidas usan una designación de ACI (por sus siglas en inglés) para grados de fundición como se muestra en la tabla 3.13. Los materiales fundidos deben especificarse siempre con las designaciones ACI. Los tipos AISI similares a los anteriores se dan en la segunda columna de la tabla 3.13.

La C indica el grado usado primordialmente para ambientes acuosos y la H para aplicaciones resistentes al calor. Para la mayoría de los ambientes, la resistencia a la corrosión de las estructuras fundidas y la de las estructuras forjadas se

consideran equivalentes.

Los materiales con alta resistencia, exhiben buena relación de resistencia y peso para la industria de aviones y misiles. Su alta dureza es deseable en algunas aplicaciones en donde se requiere resistencia a la erosión y a la corrosión, por ejemplo, para accesorios de válvulas de vapor de alta presión.

Los aceros inoxidable de las series 200 y 300 exhiben, aproximadamente, las mismas propiedades mecánicas en su forma recocida.

La mayor excepción comprende a las aleaciones fundidas con doble microestructura, notándose que la alta resistencia producida (por consiguiente la alta resistencia de diseño) para el tipo CF-8, que contiene 15% de ferritas, es comparable al tipo 304. Los aceros austeníticos conservan buena ductilidad y buena resistencia al impacto a muy bajas temperaturas, se usan en tanques para almacenar oxígeno y nitrógeno líquidos. Los metales FCC y sus aleaciones (aceros austeníticos, cobre y aluminio) poseen buenas propiedades a temperaturas criogénicas.

El único método adecuado para endurecer a los aceros inoxidable austeníticos es el enfriamiento. Este reduce generalmente, sólo un poco, la resistencia a la corrosión pero en ciertos ambientes críticos se puede formar una celda galvánica entre el material enfriado y el material recocido. El tipo 301 se utiliza mucho en su forma enfriada para cuerpos de trenes y camiones. Los aceros austeníticos pueden laminarse en frío para resistir esfuerzos cercanos a las 300,000 lb/in² en forma de alambre. Los tipos 301 y 302 no se usan para aplicaciones severas

de corrosión, debido a su bajo contenido de Cr y Ni, y su alto contenido de carbón. (7)

3.1.6. EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

El aluminio puro es un metal blando sin marcadas propiedades para trabajos que requieran dureza, su máxima resistencia a la tensión es sólo de 10,000 lb/in², su módulo de elasticidad es de 10×10^6 y su peso es tres veces mayor que el del acero. Debido a esto se usa en aviones, vehículos espaciales, trenes, barcos, etc., por lo que ha sido llamado "el metal del transporte".

El metal puro exhibe mejor resistencia a la corrosión y una mejor conductividad eléctrica que sus aleaciones, por lo que se aplica, comercialmente en donde se requieren resistencia a la corrosión, conductividad térmica y eléctrica.

Como se dijo anteriormente, el aluminio puro es blando y frágil, pero puede alearse y tratarse térmicamente para obtener un amplio rango de propiedades mecánicas. En las aleaciones comerciales, el aluminio es aleado con silicón, magnesio, manganeso, cobre, zinc y cromo.

Las aleaciones de aluminio se clasifican en dos grupos: (a) Aleaciones Forjadas y (b) Aleaciones Fundidas.

(a) Aleaciones Forjadas:

Las formulaciones de las aleaciones forjadas son usadas para laminado, extruído, estirado y forja.

Se utilizan dos sistemas numéricos para clasificar a las aleaciones forjadas; uno de cuatro dígitos y otro de dos dígitos, el primero se emplea en los Estados Unidos y es el más común, el

TABLA 9.19. DESIGNACIONES ESTANDAR DEL INSTITUTO DE ALEACIONES FUNDIDAS Y RANGOS DE COMPOSICION QUIMICA DE METALES FUNDIDOS RESISTENTES A LA CORROSION Y AL CALOR.

Composición, % (balance Fe)							
DESIGNACION DE ALEACIONES FUNDIDAS	TIPO DE ALEACION FORJADA	C	Mn max	Si max	Cr	Ni	Otros elementos
CA-15	410	0.15*	1.00	1.50	11.5 -14	1*	Mo 0.5máx+
CA-40	420	0.20 -0.40	1.00	1.50	11.5 -14	1*	Mo 0.5máx+
CB-90	431	0.30*	1.00	1.00	18- -22	2*	---
CC-50	446	0.50*	1.00	1.00	26- -30	4*	---
CD-4MCu	---	0.04*	1.00	1.00	25- -27	4.75	Mo 1.25 -2.25 Cu 2.75 -8.25
CZ-90	---	0.30*	1.50	2.00	26- -30	8-11	---
CF-9	304L	0.03*	1.50	2.00	17- -21	8-12	---
CF-8	304	0.08*	1.50	2.00	18- -21	8-11	---
CF-20	302	0.20*	1.50	2.00	18- -21	8-11	---
CF-3M	316L	0.03*	1.50	1.50	17- -21	9-13	Mo 2.0-3.0
CF-8M	316	0.08*	1.50	1.50	18- -21	9-12	Mo 2.0-3.0
CF-12M	316	0.12*	1.50	1.50	18- -21	9-12	Mo 2.0-3.0
CF-8C	347	0.08*	1.50	2.00	18- -21	9-12	Cb8xCmín, 1.0máx, o Cb-Ta 10x Cmín, 1.95 máx.

Composición, % (balance Fe)

DESIGNACION DE ALEACIONES FUNDIDAS	TIPO DE ALEACION FORJADA	C	Mn máx	Si máx	Cr	Ni	Otros elementos
CF-16F	303	0.16*	1.50	2.00	18- -21	9-12	Mo 1.5 máx Se 0.20-0.95
CG-8M	317	0.08*	1.50	1.50	18- -21	9-13	Mo 3.0-4.0
CH-20	309	0.20*	1.50	2.00	22- -26	12-15	---
CK-20	310	0.20*	1.50	2.00	23- -27	19-22	---
CN-7M	---	0.07*	1.50	°	18- -22	21-31	Mo-Cu°
HA	---	0.20*	0.35 0.65	1.00	8-10	---	Mo 0.90- 1.20
HC	446	0.50*	1.00	2.00	26- -30	4*	Mo 0.5máx+
HD	329	0.50*	1.50	2.00	26- -30	4-7	Mo 0.5máx+
HE	---	0.20- -0.50	2.00	2.00	26- -30	8-11	Mo 0.5máx+
HF	302B	0.20- -0.40	2.00	2.00	19- -23	9-12	Mo 0.5máx+
HH	309	0.20- -0.50	2.00	2.00	24- -28	11-14	Mo 0.5máx+ N 0.2 máx
HI	---	0.20- -0.50	2.00	2.00	26- -30	14-18	Mo 0.5máx+
HK	310	0.20- -0.60	2.00	2.00	24- -28	18-22	Mo 0.5máx+
HL	---	0.20- -0.60	2.00	2.00	28- -32	18-22	Mo 0.5máx+
HN	---	0.20- -0.50	2.00	2.00	19- -23	23-27	Mo 0.5máx+
HT	330	0.35- -0.75	2.00	2.00	13- -17	33-37	Mo 0.5máx+
HU	---	0.35- -0.75	2.00	2.50	17- -21	37-41	Mo 0.5máx+
HW	---	0.35- -0.75	2.00	2.50	10- -14	58-62	Mo 0.5máx+
HX	---	0.35- -0.75	2.00	2.50	15- -19	64-68	Mo 0.5máx+

* Valor máximo.

+ Molibdeno adicionado no intencionalmente.

* Existen muchas propiedades que decrecen si no contiene la composición adecuada de cromo y de níquel, el contenido de silicón, molibdeno y cobre es variable en estas aleaciones.

segundo se emplea en Canadá. La siguiente tabla 3.14 compara a estos dos sistemas:

TABLA 3.14. CLASIFICACION DE ALEACIONES DE FORJADAS DE ALUMINIO.

99.0% aluminio puro	1S	1060
99.0% aluminio puro	2S	1100
Aleaciones de manganeso	de 9S a 9S	3xxx
Aleaciones de cobre	de 10S a 29S	2xxx
Aleaciones de silicón	de 30S a 39S	4xxx
Aleaciones de magnesio	de 50S a 69S	5xxx
Aleaciones de Mg-Sili- cón	de 50S a 69S	6xxx
Aleaciones de Zinc	de 70S a 79S	7xxx

En la aleaciones forjadas se utilizan pequeños porcentajes de elementos aleantes, mientras que las aleaciones fundidas contienen cerca de 17% de silicón, 11% de cobre ó 10% de magnesio.

El sumario siguiente es una ayuda para recordar las aleaciones importantes de aluminio:

1. Para fundición -aleaciones con silicón
2. Para costura o mecanizado -aleaciones con cobre, como 2011.
3. Para soldadura -aleaciones con magnesio o con magnesio y silicón.
4. Para moldeado -aluminio puro o aleaciones con manganeso, como la 3003.
5. Para extrusión -la aleación 6063.
6. Para reforzado -aleaciones de cobre, como la 2024.

Para designar el tipo de temple que tiene la aleación se le agrega al sistema numérico correspondiente una terminación adicional, por ejemplo 655-T6. El "temple" se refiere a las condiciones de dureza dadas al metal por trabajo mecánico o por

tratamiento térmico; los aluminios templados se producen por enfriamiento o por endurecimiento por añejamiento o ambos. Sólo las aleaciones de zinc, cobre y magnesio-silicón se endurecen por añejamiento.

Las aleaciones forjadas que no son tratadas térmicamente son clasificadas con temple "O" (Recocidas) o con temple "F" (como se fabrican). Las propiedades mecánicas de este último tipo (F) no se garantizan. Otro tipo de temple incluyen:

- H1 - Sólo trabajo de endurecimiento.
- H2 - Trabajo de endurecimiento y parcialmente recocido.
- H3 - Trabajo de endurecimiento y estabilizado.

Puede haber un segundo dígito en el número que indica el temple y este expresa el grado del trabajo de endurecimiento:

- 1.-Endurecido 1/8.
- 2.-Endurecido 1/4.
- 4.-Endurecido 1/2.
- 6.-Endurecido 3/4.
- 8.-Completamente endurecido.
- 9.-Extra duro.

Por lo anterior, la clasificación 6061-H12 indica una aleación con magnesio y silicón, sólo con trabajo de endurecimiento a un grado de 1/4 de endurecimiento.

Las aleaciones tratadas térmicamente, como la 2024 (245) algunas veces sufre el tratamiento térmico por endurecimiento y reforzado; este tipo de temple se indica con la letra T:

- T4.-Solución tratada térmicamente.
- T6.-Solución tratada térmicamente y añejada artificialmente.

(b) Aleaciones Fundidas:

Las aleaciones fundidas de aluminio son formuladas por vaciado, moldeado y troquelado. Estas aleaciones se designan con tres números, por ejemplo 108, 356, etc.

El sistema más utilizado para clasificarlas es el dado por la Asociación de Aluminio. En este sistema, las aleaciones fundidas con silicón tienen números arriba del 99; las aleaciones fundidas que contienen cobre y silicón se indican con números del 100 al 199; las que contienen magnesio con los números del 200 al 299 y las que contienen silicón y manganeso con los números del 300 al 399.

Las aleaciones con alto contenido de cobre se utilizan principalmente para propósitos estructurales. Las aleaciones de cobre libre y de bajo contenido de cobre se usan en procesos industriales en los que se requiere una mejor resistencia a la corrosión. (8)

La aleación tipo 3003 es la más utilizada en la industria de proceso. Se usa en aleaciones vaciadas, troqueladas o moldeadas.

Las aleaciones 5052 exhiben la más alta resistencia de las aleaciones no tratadas térmicamente. La 7178 es una de las aleaciones tratadas térmicamente de mayor resistencia y la que más se utiliza en aplicaciones de aviación y naves espaciales.

En resumen su resistencia a la corrosión y otras propiedades tales como sus productos de corrosión no tóxicos, su ausencia de color, su apariencia, su conductividad térmica, su conductividad eléctrica, su reflectividad, su ligereza y su relación de resistencia/peso contribuyen a su aplicación extendida.

Sin embargo, cabe aclarar que las aleaciones de aluminio

pierden rápidamente su resistencia cuando son expuestas a temperaturas de 350°F y mayores.

3.1.7. MAGNESIO Y SUS ALEACIONES.

El magnesio es uno de los metales comercialmente ligeros, su gravedad específica es de 1.74. Se utiliza en camiones, en motores de automóviles, escaleras, sierras portátiles, aviación y misiles debido a su poco peso y a su buena resistencia cuando se alía. Sin embargo, es uno de los que tienen una mínima resistencia a la corrosión y por consiguiente se usa como ánodo de sacrificio en la protección catódica y en las baterías de celda seca. Es generalmente más anódico que otros metales y sus aleaciones deben ser protegidas de ello.

El magnesio exhibe buena resistencia en atmósferas de tierra adentro debido a la formación de la película protectora de óxido. Esta protección tiende a romperse (picarse) en aire contaminado con sal y requiere protección moderada. Estas incluyen aislantes y baños de "cromo", los cuales proveen una buena base para los aislantes. La resistencia a la corrosión generalmente disminuye con las impurezas y los aleantes. Las aleaciones son muy susceptibles al esfuerzo de corrosión y deben protegerse. La presencia de oxígeno disuelto en agua no tiene un efecto significativo en la corrosión. El metal es susceptible a la corrosión y a la erosión. El magnesio es mucho más resistente a los álcalis que al aluminio. Es atacado por muchos ácidos, excepto por el ácido crómico y por el ácido fluorhídrico. El producto de corrosión con el HF actúa como una película protectora.

El magnesio y sus aleaciones son apropiadas en una variedad de formas forjadas y troqueladas, obteniéndose resistencias a la tensión en un rango aproximado de 15,000 a 50,000 lb/in².

3.1.8. EL PLOMO Y SUS ALEACIONES.

El plomo es uno de nuestros metales más viejos. Fue usado para tuberías de agua durante la época de la Roma Imperial, y algunas de estas aún siguen funcionando. Los adornos y las monedas de plomo fueron utilizadas hace unos mil años. Las películas protectoras de plomo consisten en productos debidos a la corrosión tales como sulfatos, óxidos y fosfatos. La mayoría del plomo se produce para utilizarse en aplicaciones de corrosión. El plomo y sus aleaciones se usan en tuberías, hojas de revestimiento, soldadura (Pb-Sn) metales tipo, baterías de almacenamiento, capas antirradiactivas, cables forrados, plato ternario (acero aislado con aleación de Pb-Sn), cojinetes, techumbre y municiones. El plomo es blando, fácil de formar y tiene un punto de fusión bajo. El acero revestido de plomo se puede fabricar algunas veces calentando el plomo. Este está sujeto a corrosión y a la erosión debido a su blandura.

Cuando se requiere resistencia a la corrosión en equipo de proceso, se especifica que el plomo químico contenga alrededor del 0.06% de cobre, particularmente cuando se trabaja con ácido sulfúrico. Este plomo es resistente al ácido sulfúrico, al ácido crómico, al ácido fluorhídrico, al ácido fosfórico, a las soluciones neutras, al aguas de mar y a los aceites. Es atacado rápidamente por el ácido acético y generalmente no se usa con el

ácido nítrico, ni con el ácido clorhídrico, ni con los ácidos orgánicos.

El plomo químico exhibe una resistencia a la tensión de alrededor de 2300 lb/in² a temperatura ambiente. El plomo duro, contiene de 3 a 18% de antimonio, que duplica su resistencia. Sin embargo, la resistencia de ambos materiales disminuye rápidamente cuando la temperatura aumenta, y muestran la misma resistencia alrededor de 230°F. La resistencia de diseño a temperaturas apreciablemente altas disminuye a cero.

3.1.9. COBRE Y SUS ALEACIONES.

El cobre es diferente a otros metales, ya que combina la resistencia a la corrosión con una alta conductividad eléctrica y con una alta conductividad térmica, moldeabilidad, maleabilidad y resistencia cuando se alía, excepto cuando se tienen altas temperaturas. El cobre exhibe buena resistencia a las atmósferas urbana, marina e industrial, y al agua. El cobre es un metal noble y la evolución del hidrógeno no forma parte usualmente en su proceso de corrosión. Por esta razón no es corroído por los ácidos a no ser que se encuentre presente el oxígeno u otros agentes oxidantes. Las aleaciones comunes de cobre son resistentes a las soluciones neutras y a las soluciones ligeramente alcalinas con excepción de las que contienen amoníaco, el cual causa corrosión y algunas veces ataca rápidamente en forma general. En condiciones fuertemente reductoras a temperaturas elevadas (300 y 440°F), las aleaciones de cobre son algunas veces superiores a los aceros inoxidable y sus aleaciones.

Las aleaciones más comunes de cobre son los latones (Cu-Zn), los bronce (estaño, aluminio o silicio adicionados al Cu) y los cuproníqueles (Cu-Ni).

Los siempre durables poseen una alta resistencia relativa y propiamente son utilizados en ferretería, como tornillos, pernos y vástagos de válvulas para equipo de cobre común, ya que esto minimiza la corrosión de los dos metales.

Los cobres y los latones están sujetos a la erosión, a la corrosión o al ataque de intrusión o choque. Los bronce y el latón de aluminio son mucho mejores en este aspecto. Los bronce son fuertes y duros. Los cuproníqueles con pequeñas cantidades de hierro tienen algunas veces una resistencia superior a la erosión y a la corrosión.

El cobre y sus aleaciones se encuentran como tubería doble (por dentro un metal y por fuera otro) en combinación con acero, aluminio y acero inoxidable.

El cobre y sus aleaciones encuentran extensa aplicación en tuberías para agua, válvulas, tubos para intercambiadores de calor, espejos de tubos para intercambiadores de calor, ferretería, alambres, protecciones o cubiertas, ejes, techos, conexiones, alambiques, tanque y otros recipientes.

3.1.10. NIQUEL Y SUS ALEACIONES.

Un grupo importante de materiales para aplicaciones de corrosión se basan en el níquel. El níquel es resistente a muchas soluciones corrosivas y tiene una resistencia natural para las soluciones alcalinas. Los problemas más fuertes de corrosión, que

comprenden caústicos y soluciones caústicas, se resuelven al utilizar níquel como material de construcción. Actualmente, la resistencia de las aleaciones para hidróxido de sodio, es aproximadamente proporcional a su contenido de níquel. El níquel muestra una buena resistencia a las soluciones neutras y de ácidos débiles. Es ampliamente utilizado en la industria alimentaria. No es resistente a las soluciones fuertemente oxidantes, como ácido nítrico y las soluciones de amoníaco. Las formas del níquel, para una buena base para aleaciones, requieren de resistencia a altas temperaturas. Pese a todo, el níquel y sus aleaciones son atacadas y fracturadas por gases de sulfuros a temperaturas elevadas.

Dentro de las aleaciones del níquel, encontramos el Aged Duranickel que posee buenas propiedades y también una buena resistencia a muchos ambientes. El Monel que es ideal para ácido fluorhídrico. El Chlorimet 3 y el Hastelloy C que son dos de las aleaciones comerciales más usadas generalmente para prevenir la corrosión. El Chlorimet 2 y el Hastelloy B son quebradizos al igual que los hierros con alto contenido de silicón. El Nichrome que se usa para resistores y elementos para calentamiento. Todas estas entre otras. (9)

Las aleaciones conocidas con la denominación "Nimonic" que tienen gran resistencia mecánica en caliente y gran resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas, son aleaciones de níquel derivadas de las aleaciones níquel-cromo 80-20, que se conocen con el nombre de Nichrome V. La primera aleación de la serie nimonic que se fabricó fue la "Nimonic 75", al final de los años treinta.

Las aleaciones Nimonic, conocidas con los nombres de Nimonic 75, 80, 80A, 90, 95, 100, 105, etc., son aleaciones que a la temperatura ambiente tienen resistencia a la tracción variable de 38 a 100 Kg/mm². La composición de estas aleaciones se dan en la tabla 3.15.

Otra serie importante de aleaciones son las de níquel-cromo-hierro, conocidas como Inconel, las cuales se obtienen a partir del Inconel 600, dentro de ellas se incluyen el Inconel X-750, el Waspaloy, el M252, (estas dos se utilizaban en paletas de turbinas), el Undimet 500, el Undimet 700, el Rene 41 y el Hastelloy X. Las aleaciones más notables y fuertes desarrolladas en los años 60's fueron el Inconel 713, el In-100, el B-1900 y el Mar-M-200, en las que se tiende a reemplazar parte del cromo, con molibdeno, tungsteno y tantalio.

TABLA 3.15. COMPOSICION DE LAS ALEACIONES
"NIMONIC".

Calidades	Composición en %								R Kg/mm ²
	C	Ti	Al	Fe	Co	Mo	Ni	Cr	
Nimonic 75	0.1	0.4		5			resto	20	38
Nimonic 80	0.08	2.5	1	5			"	20	60
Nimonic 80A	0.08	2.5	1	3			"	20	65
Nimonic 90	0.08	2.5	1.5	3	18		"	20	80
Nimonic 95	0.1	2.9	1.9	3	18		"	20	85
Nimonic 100	0.25	1.5	4	1	20	5	"	15	95
Nimonic 105	0.2	1.4	5	1	20	4	"	15	100
Nimonic 115	0.2	4	4	1	15	9.5	"	15	105

Podemos decir que el níquel, las aleaciones con alto contenido

de níquel y las aleaciones que contienen 8% de níquel, son los materiales más utilizadas para resolver los problemas severos de corrosión.

3.1.10.1. Aceros Inoxidables Cromo-Níqueles Austeníticos.

Aceros del Tipo 18-8. Suele ser considerado en la actualidad como el acero de mayor aplicación. Resiste muy bien la acción de numerosos agentes corrosivos y por tener una gran ductilidad puede ser trabajado en frío por muy diversos procedimientos y obtenerse con él las formas y perfiles más variados, quedando, según convenga, con muy altas resistencias o muy elevada ductilidad. Es muy utilizado para elementos decorativos en arquitectura, restaurantes, cocinas, clínicas, cafeterías, etc. Tiene también numerosas aplicaciones en las industrias químicas, textiles, etc.

Su contenido en carbón suele variar de 0.08 a 0.20%, el cromo de 17 a 19% y el níquel de 8 a 10%. Su resistencia a la tracción después del tratamiento de austenización es de unos 60 Kg/mm², su límite de elasticidad muy bajo, unos 25 Kg/mm², su alargamiento muy elevado, 45% aproximadamente. Por acritud se consigue en chapas laminadas en frío resistencias variables de 110 a 140 Kg/mm², y en alambres resistencias hasta de 170 Kg/mm².

El máximo ablandamiento de este acero se consigue calentándolo a 1050° y enfriándolo en agua (perfiles muy delgados se pueden enfriar al aire). Para eliminar la acritud que se crea durante el trabajo en frío de este acero, basta con calentar a 800° y enfriar en agua.

Aceros Austeníticos Cromo-Níquel 25-12. Este acero, que tiene porcentajes de cromo-níquel y silicio mayores que los clásicos 18-8, posee en caliente una elevada resistencia mecánica y también una resistencia a la oxidación o a la formación de cascarilla a elevada temperatura muy notable. Se usa para numerosas aplicaciones en calderas, parrillas y elementos de hornos que deben resistir elevadas temperaturas, pudiendo trabajar de una manera continua sin formar cascarilla hasta temperaturas de unos 1100°. Cuando es empleado a temperaturas comprendidas dentro de la zona de fragilidad (500° a 650°) se recomienda regenerarlo periódicamente por calentamiento a 1050° durante 30 minutos y enfriamiento al aire. En el caso de que a pesar de tomarse esas precauciones sigue acusándose el fenómeno de fragilidad, es preferible utilizar el acero 18-8 bajo en carbón o el 18-8 con titanio o columbio y molibdeno.

No es recomendable usar este acero para piezas soldadas.

Este acero 25-12, junto con el 27% de cromo es el que mejor resiste a la oxidación (formación de cascarilla) a elevada temperatura.

Acero Austenítico 25-20. Puede considerarse como el acero inoxidable resistente a temperaturas elevadas de más alta calidad para usos de carácter general. Se comporta muy bien en presencia de gases que contengan SO₂. En cambio, su comportamiento es malo en contacto con el gas SO₃ en cuyo caso es mejor el acero 20-25. Se usa par toda clase de piezas de hornos, recalentadores, calderas, etc., que se han citado antes para el acero 25-12,

cuando trabaja en las zonas de fragilidad debe ser regenerado periódicamente. No conviene emplearlo para piezas soldadas.

3.1.10.2. Aceros Cromo-Níqueles Austeníticos de Mayor Porcentaje de Níquel que de Cromo. Para algunos usos especiales se emplean, aunque no con mucha frecuencia, esta clase de aceros, siendo los más empedados el 9-22 y el 20-25, cuyas principales características señalaremos a continuación.

Acero Cromo-Níquel Austenítico 9-22. Este acero se comenzó a emplear en Estados Unidos al comenzar el desarrollo de los aceros inoxidable y a pesar de que poco a poco va siendo desplazado por los aceros del tipo 18-8, que son de propiedades similares y de más bajo precio, se emplea todavía para ciertas aplicaciones, en especial en las instalaciones de petróleo donde se utiliza para ejes de bombas y otras piezas de mecanismos y máquinas empleadas en las refinerías. También se emplea para piezas que deben estar en contacto con ácido sulfúrico diluido, cenizas, cloruro cálcico, etc.

Acero Austenítico Cromo-Níquel 20-25. Este acero se caracteriza por tener gran resistencia a la corrosión por la acción de ácidos o sustancias alcalinas y por tener también al mismo tiempo alta resistencia mecánica y alta resistencia a la corrosión a altas temperaturas.

Su extraordinaria resistencia a la oxidación a altas temperaturas lo ha hecho muy recomendable para la fabricación de

cajas de recocido, de cementación, elementos de movimiento de hornos automáticos y elementos de instalaciones de forja y tratamientos sometidos a muy altas temperaturas.

También se emplea para piezas de hornos de sinterizar, calcinar y tostar. Se comporta muy bien en presencia del gas SO_2 , que es precisamente muy perjudicial para el acero 25-20. En cambio se comporta mal en presencia de SO_2 , dando en ese caso mejores resultados el acero de 27% de cromo. Si se emplea a temperaturas de $500^{\circ}C$ a $650^{\circ}C$, debe ser regenerado periódicamente para reducir su fragilidad.

Acero 12-12 de Fácil Embutición. Aunque el acero 18-8 se ha considerado siempre como un acero de fácil embutición, para algunos usos se desea que el material tenga todavía más ductilidad con el fin de poder realizar embuticiones muy profundas. Durante los trabajos mecánicos en frío de los aceros inoxidable del tipo 18-8, se inician siempre importantes transformaciones de austenita que endurecen el material y le dan una cierta fragilidad impidiendo la continuación de los trabajos. Estudiando cuidadosamente las composiciones y estructuras, se llegó a la conclusión de que el acero austenítico 12-12 es el que mejor se comporta en estos trabajos. Cuando la acritud adquirida por el trabajo de embutición es grande, el acero puede volver a recuperar la ductilidad por calentamiento a 1050° y enfriamiento al agua o al aire, según el espesor. Por lo demás, sus propiedades y tratamientos son, en general, bastante similares a los del tipo 18-8. (10)

3.1.10.3. Hastelloy B.

Es una aleación de níquel-molibdeno-hierro que fue desarrollada primordialmente para resistir todas las concentraciones de ácido clorhídrico a cualquier temperatura. La combinación de níquel y molibdeno le proporciona buenas propiedades mecánicas, una excelente resistencia a los ambientes reductores y excelentes propiedades mecánicas a altas temperaturas. Esta aleación se puede conseguir en forma de barras, hojas, varillas, tiras, platos, tubos, alambres y formas fundidas. La composición nominal de esta aleación se da en la tabla 3.16.

Esta aleación de níquel-molibdeno-hierro tiene una estructura austenítica que es no magnética y cuyas propiedades físicas son similares a la de los aceros inoxidable austeníticos. Sus propiedades típicas se dan en la tabla 3.17. Las propiedades mecánicas de esta aleación forjada con alto contenido de carbón, son superiores a la de los aceros inoxidable forjados, ya que su resistencia a la tensión, su límite de elasticidad y su dureza son 50% mayor que la de estos últimos. Además retiene dos terceras partes de la resistencia que presenta a temperatura ambiente cuando se encuentra a temperaturas mayores a los 1600°F. El trabajo en frío endurece la aleación, incrementando su resistencia a la tensión y su límite de elasticidad, pero disminuyendo su ductilidad.

Las propiedades mecánicas de la aleación fundida, son menores que las de la aleación forjada.

La aleación forjada exhibe una buena ductilidad y puede ser trabajada en frío con los métodos usuales.

**TABLA 9.16. COMPOSICION NOMINAL DE ALGUNAS ALEACIONES
 CON ALTO CONTENIDO DE NIQUEL.**

	CARBON	NIQUEL	HIERRO	MOLIBDENO	CROMO	OTROS
"Haste-- lloy B"	0.05 *	61.00	5.50	28.00	1.00	Mn 1.00 Silicón 1.00 Co 2.50
"Chlori-- met 2"	0.10	69.00	9.00	92.00	--	Mn 1.00 Silicón 1.00
"Haste-- lloy C"	0.08 *	54.00	5.50	16.00	15.50	Mn 1.00 Silicón 1.00 Co 2.50 W 9.75
"Chlori-- met 9"	0.07	60.00	2.00	18.00	18.00	Mn 1.00 Silicón 1.00

* Cantidad máxima.

La manejabilidad de la aleación es similar a la de los aceros
 inoxidable, pero es más difícil debido a su alta velocidad de
 endurecimiento.

La mayoría de los métodos convencionales de soldado son
 adecuados para unir piezas elaboradas con esta aleación.

El "Hastelloy B" es una de las aleaciones más resistente a la
 corrosión que se conocen, y en la mayoría de los casos sólo los
 metales preciosos llegan a ser superiores a esta. Aunque este
 metal es prácticamente incorroible por la mayoría de las
 atmósferas comunes, su uso se ve restringido por su alto costo.
 Por lo que raramente se especifica su uso en aplicaciones que
 involucran atmósferas rurales, urbanas e industriales, o agua

natural o de proceso. Su uso es económicamente justificable para

TABLA 9.17. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS PROMEDIO DE ALGUNAS ALEACIONES CON ALTO CONTENIDO DE NIQUEL.

PROPIEDAD	UNIDAD	"HASTELLOY B" FORJADA	"HASTELLOY B" FUNDIDA
FISICAS:			
Densidad	lb/in ³	0.896	0.896
Conductividad Térm. a 212°F	Btu/ft ² /hr/ (°F/ft)	7.1	7.1
Coefficiente Medio de Expansión Térmica (68-212°F)	in/in/°F x 10 ⁻⁶	5.6	5.6
MECANICAS:			
Temperatura Máxima de Operación en servicio continuo	°F	1400	1400
Módulo de Elasticidad en Tensión	psix10 ⁶	30.8	26.5
Recocido:			
Límite de Tensión	psix10 ³	127	90
Límite de Elasticidad	psix10 ³	56	50
Elongación	%	52	10
Reducción de Area	%	--	10
Dureza	Brinell	205	195
Impacto	ft-lb	60	18

servicios en los que se encuentre presente agua de mar o aguas contaminadas con ácido clorhídrico o cloruros.

La aleación "B" tiene una alta resistencia a todas las concentraciones de ácido clorhídrico sin importar la temperatura a la cual se encuentre. La presencia de aire y de sales cúpricas o férricas dentro del ácido clorhídrico pueden acelerar la

velocidad de ataque y causar una avería prematura del metal. Tiene también una excelente resistencia al ácido sulfúrico, a 150°F la velocidad de corrosión es muy baja para todas las concentraciones de ácido sulfúrico, pero a la temperatura de ebullición, la concentración máxima que puede ser utilizada es del 60%. Con el ácido fosfórico, la aleación "B", presenta una baja velocidad de ataque a todas las concentraciones y a cualquier temperatura (incluyendo a la temperatura de ebullición). Además de ser resistente a los ácidos, es también muy resistente a las sales reductoras de estos mismos. Los cloruros férrico y cúprico son muy perjudiciales mientras que los cloruros de amonio, aluminio y zinc son inofensivos para el metal. Las sales y los ácido oxidantes son también muy perjudiciales, por lo que esta aleación presenta poca o ninguna resistencia a los nitratos, nitritos, cromatos, persulfatos, hipocloratos, al ácido nítrico y al ácido crómico. Los álcalis y las soluciones alcalinas no le ocasionan un daño excesivo.

La mayoría de los ácidos y compuestos orgánicos son moderadamente corrosivos para esta aleación de níquel-molibdeno-hierro.

El "Hastelloy B" es también conocida como una aleación para altas temperaturas, posee excelentes propiedades a temperaturas mayores a 1400°F en atmósferas oxidantes y a temperaturas mayores a 1600°F en presencia de gases reductores. El "Hastelloy B" resiste el ataque ocasionado por gases de combustión, amoníaco, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos.

En las industrias de proceso el "Hastelloy B" es ampliamente

usado en bombas, válvulas, tuberías y reactores para ambientes oxidantes. Debido a que tiene buenas propiedades a altas temperaturas se emplea en las industrias de aviación, de fuerza y del petróleo. El Código de Calentadores ASME reconoce a esta aleación y permite su uso en recipientes a presión.

3.1.10.4. "Chlorimet 2".

El "Chlorimet 2" es otra aleación austenítica con alto contenido de carbón que combina la resistencia a la corrosión con una alta resistencia mecánica. Es una aleación de níquel-molibdeno-hierro que sólo se puede adquirir en su forma fundida. La producción de bombas y válvulas es su principal aplicación. Su composición nominal se da en la tabla 3.16. Esta aleación es similar a la forma fundidad del "Hastelloy B".

Sus propiedades se dan en la tabla 3.18, en ella se puede ver que estas son semejantes a las de los aceros inoxidable fundidos, de hecho su resistencia a la tensión y su límite de elasticidad son de la misma magnitud que la de los anteriores, pero la dureza del "Chlorimet 2" es mayor. La aleación puede ser endurecida por trabajo en frío o por tratamiento térmico, pero hay que tomar en cuenta que este último reduce la resistencia a la corrosión, por lo que sólo se debe aplicar cuando se desee una mejor resistencia al desgaste y a la abrasión sin que la pérdida de resistencia química sea perjudicial. Esta aleación tiene también una excelente resistencia al choque térmico y al choque mecánico.

Esta aleación de níquel-molibdeno-hierro es fácil de soldar, pero deben seguirse las mismas precauciones que para el soldado de

los aceros inoxidable austeníticos fundidos. (11)

TABLA 9.18. PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS PROMEDIO DEL "CHLORIMET 2" Y DEL "CHLORIMET 3".

PROPIEDAD	UNIDAD	"CHLORIMET 2" FUNDIDA	"CHLORIMET 3" FUNDIDA
FISICAS:			
Densidad	lb/in ³	0.996	0.924
Conductividad Térm. a 212°F	Btu/ft ² /hr/ (°F/ft)	7.1	6.5
Coefficiente Medio de Expansión Térmica (68-212°F)	in/in/°F x 10 ⁻⁶	5.6	6.9
MECANICAS:			
Temperatura Máxima de Operación en servicio continuo	°F	1400	2100
Módulo de Elasticidad en Tensión.	psix10 ⁶	26.5	26.0
Recocido:			
Límite de Tensión	psix10 ³	80	75
Límite de Elasticidad	psix10 ³	55	50
Elongación	%	5	10
Reduc. de Area	%	6	12
Dureza	Brinell	230	220
Impacto	ft-lb	--	--

3.1.11. ALEACIONES DE COBALTO.

Stellitas. Son aleaciones a base de cobalto, cromo y wolfranio que se caracterizan por su gran resistencia al desgaste, dureza bastante elevada y sobre todo por mantener esas características a alta temperatura. Generalmente se depositan por soldadura y en

ocasiones mucho más limitadas se utilizan en forma de piezas fundidas.

Hacia el año 1985 Elwood Haynes, en sus investigaciones sobre las aleaciones de cobalto llegó al conocimiento de las excelentes propiedades de un grupo de aleaciones de cobalto con alto contenido de cromo y wolfranio que denominó Stellitas.

Se emplean mucho para hacer depósitos de soldadura sobre herramientas, piezas de máquinas, útiles y elementos de motores que deben soportar fuertes rozamientos, resistir bien el desgaste y la acción de las temperaturas elevadas.

Para poder recordar más fácilmente su composición, se da como referencia de esta aleación cobalto, cromo y wolfranio las cifras 50-25-12.5 y sus durezas suelen variar de 40 a 55 Rockwell-C. Las calidades más utilizadas son la Stellita no. 1, Stellita no. 12, Stellita no. 6 y la Stellita no. 100.

Estas aleaciones se suelen clasificar en tres grupos. Todos ellos se caracterizan por su gran resistencia al desgaste pero se diferencian por su dureza y tenacidad.

Primer grupo: Alta dureza y baja tenacidad, 55 Rc, Stellita 1.

Segundo grupo: Intermedio, 50 Rc, Stellita 12.

Tercer grupo: Baja dureza y gran tenacidad, 40 Rc, Stellita 6.

Además se puede citar otra Stellita de dureza mucho más elevada que las anteriores, la Stellita 100 que alcanza 62 Rockwell-C.

Las composiciones de estas aleaciones varían entre los siguientes límites: Co=50 a 66%; Cr=25 a 35%; W=5a15% y C=1a2.5%.

Las propiedades más importantes que poseen son:

1).-Gran resistencia al desgaste en general y dureza bastante

elevada.

- 2).-Gran resistencia a la abrasión.
- 3).-Gran resistencia a la corrosión.
- 4).-Gran resistencia al calor.

La composición de cada una de ellas se dan en la tabla 3.19.

TABLA 3.19. COMPOSICION DE LAS STELLITAS.

	Co %	Cr %	W %	C %	Rc	R Kg/mm ²	Temp. Fusion	Características
Stellita 1	50	33	13	2.5	55	63	1275°	Alta dureza. Tiene buena resistencia al desgaste a cualquier temperatura.
Stellita 6	66	26	6	1	41	91	1340°	Gran resistencia al desgaste y al choque en caliente.
Stellita 12	59	29	9	1.8	50	85	1300°	Tiene buena resistencia al desgaste y resiste bien el choque.
Stellita 100	43	34	19	2	62	90	1275°	Máxima dureza.

Las propiedades más importantes de cada una de estas aleaciones, son:

Stellita 1. Tiene máxima resistencia al desgaste a cualquier temperatura. Se emplea para orugas de tractores, dragas, empujadoras, molinos, excavadoras, barrenas, arados, amasadoras, etc.

Stellita 6. Es la de mayor tenacidad. Tiene máxima resistencia

al desgaste con choque en caliente. Se emplea para cizallas, estampas, válvulas, troqueles, punzones, hileras para extrusión, puntas de tenazas para lingotes.

Stellita 12. Es de dureza y tenacidad intermedia entre las anteriores. Tiene máxima resistencia al desgaste con choque. Se emplea para quebrantadoras y molinos de martillos.

Stellita 100. Es la de mayor dureza de todas.

Se emplea para usos en que es necesario gran resistencia al desgaste, con buena resistencia a la corrosión y a la oxidación. Resisten muy bien a la abrasión hasta temperaturas del rojo vivo en piezas sometidas a muy altas temperaturas. Gracias a sus buenas características antifricción tienen innumerables aplicaciones, sobre todo en piezas u órganos de máquinas en que hay dificultad de engrase. Se emplean en el caso de superficies metálicas deslizando una sobre otra con grandes presiones. (12)

3.1.12. EL ZINC Y SUS ALEACIONES:

El zinc no es un metal resistente a la corrosión, pero se usa como un metal de sacrificio para la protección catódica del acero. Su uso principal en la galvanización de acero para tubería (recubrimiento de zinc), vallas, clavos, etc. Se utiliza también en forma de barras o láminas como ánodos para proteger cascos de buques, tuberías y otras estructuras.

Las partes de aleaciones de zinc se fabrican por fundición debido a sus bajos puntos de fusión. Muchos componentes de automóviles tales como rejillas y manijas son fundidas para darles

resistencia a la corrosión.

3.1.13. ESTAÑO Y REVESTIMIENTO DE ESTAÑO.

La mitad del estaño producido se utiliza para revestir otros metales, entre los que se encuentra principalmente el acero. en general ofrece resistencia a la corrosión. Los revestimientos de estaño para el acero son de fácil soldado, proveen una buena base para recubrimientos orgánicos, no son tóxicos y tienen una apariencia agradable. El revestimiento de estaño se aplica por inmersión pero la mayoría es electroplateado. Se deben controlar dos desventajas, en este tipo de recubrimientos, la cantidad y el hecho de que el acero puede ser revestido con diferentes espesores en cada lado de la hoja (generalmente el espesor interno es mayor que el externo). El estaño es relativamente inerte, pero en presencia de oxígeno u otros agentes oxidantes es atacado. (13)

3.1.13.1. Estaño Puro.

La cantidad comercial que se usa de estaño puro es pequeña, y se puede decir que esta aumenta solo cuando este metal se usa como recubrimiento o protección de otros metales. El estaño puro es generalmente de estructura blanda, pero gracias a su no toxicidad a encontrado aplicaciones como la de tubos plegables para dentríficos y medicamentos. Este metal muestra una excelente resistencia al agua relativamente pura, lo que permite utilizar tubos y hojas de estaño sólido y/o de cobre estañado para producir y transportar agua destilada. La laminilla de estaño es mejor conocida como un material para envolver, pero ha sido ampliamente

reemplazada por la laminilla de aluminio (papel de aluminio). En las pequeñas cantidades que aun se elaboran, es común la adición de pequeños porcentajes de antimonio y cobre; pero para aumentar su resistencia se le adiciona, generalmente, arriba del 8% de zinc. Para trabajos fuertes, como el de los tubos plegables y el "papel de estaño" para envolturas especiales, el contenido de hierro se mantiene arriba de 0.01%.

Las marcas comerciales de estaño más utilizadas, contienen 99.8% mínimo de Sn (99.75% garantizado). El estaño con alto contenido de plomo, puede ser utilizado como base para aleaciones de plomo; que con un alto contenido de cobre se puede utilizar con buenos resultados en algunos bronces.

Aunque de menor importancia que los recubrimientos de estaño y de artículos de hierro estañado, hay un gran número de aplicaciones para el recubrimiento de estaño sobre cobre, el cual se usa para transportar agua natural que es muy blanda o para transportar agua que contiene grandes porcentajes disueltos de dióxido de carbono y oxígeno. Como recubrimiento de alambre y de cable de cobre, el estaño disminuye la corrosión causada por el azufre en los aislantes de caucho.

Las soldaduras son otra aplicación importante del estaño. En estas el contenido de estaño y plomo varía de 30 a 70%.

El estaño muestra una buena resistencia a la corrosión atmosférica, a los ácidos minerales diluïdos en ausencia de aire y a muchos ácidos orgánicos, pero es corroïdo por ácidos minerales fuertes. El estaño generalmente no se usa para transportar álcalis.

El Pewter, una aleación importante de estaño, se usa para jarras, floreros y otros recipientes, contiene de 6 a 7% de antimonio y de 1 a 2% de cobre.

El estaño es un metal débil, blando y dúctil. Su resistencia a la tensión a temperatura ambiente es de alrededor de 2500 lb/in² y decrece rápidamente cuando se incrementa la temperatura. (14)

3.1.14. CADMIO.

Excepto para aleaciones de bajo punto de fusión y algunas conexiones, el cadmio se usa casi exclusivamente como recubrimiento de otros metales. La apariencia brillante y la soldabilidad con las que cuenta, hacen posible su uso en equipo electrónico y en ferretería. El cadmio es menos electronegativo que el zinc y no es tan eficiente como este cuando se utiliza como ánodo de sacrificio. Es un poco menos protectorio que el zinc para el acero cuando trabaja en atmósferas industriales. El cadmio es más caro que el zinc y sus sales son más tóxicas. A diferencia del zinc, el cadmio tiene una poca resistencia a los álcalis.

El revestimiento de cadmio se usa en aceros con alta resistencia para aviones, debido a su mejor resistencia a la fatiga y a la corrosión. Sin embargo, su susceptibilidad al hidrógeno es un problema. Las técnicas apropiadas para revestir y hornear sin la presencia de hidrógeno después de revestir resuelven este problema. A temperaturas cercanas al punto de fusión (610°F), el acero puede ser atacado por el cadmio.

El cadmio es un metal relativamente débil con una resistencia a la tensión de alrededor de 10,000 lb/in² y una elongación del 50%.

(15)

3.1.15. EL TITANIO Y SUS ALEACIONES.

El titanio es un metal relativamente nuevo, que fue usado en primera instancia como metal estructural en 1952. Es fuerte y tiene una gravedad específica de 4.5, ubicada a la mitad de la del aluminio y la del acero. Estos materiales tienen una relación de alta resistencia/peso adecuada para la industria de aviones y artillería. Actualmente este metal y sus aleaciones se utilizan en la industria de misiles y en las industrias de procesos químicos.

Dentro de sus propiedades más sobresalientes se encuentra su alta resistencia, su baja densidad y su excelente resistencia a la corrosión. Al mismo tiempo, sus características electroquímicas, únicas, han revolucionado la industria de los álcalis clorados a través del uso de ánodos de titanio dimensionalmente estables revestidos con metales preciosos.

El titanio es un metal reactivo y depende de una película protectora (TiO_2) para resistir la corrosión. El fundido y el soldado de estos materiales debe hacerse en ambientes inertes o el metal se hace quebradizo debido a que absorbe gases. Por esta razón, el titanio no es un material apto para trabajos a temperaturas elevadas.

El titanio posee tres características notables, con las que cuenta para sus aplicaciones en servicios corrosivos. Estas son resistencia; (1) al agua de mar y otras soluciones de sales de cloro o cloruros, (2) a los hipocloritos y al cloro húmedo y (3) al ácido nítrico e inclusive a los ácidos fumantes. Las sales

tales como FeCl_3 y CuCl_2 que tienden a picar la mayoría de los metales y las aleaciones, inhiben la corrosión del titanio. No resiste los ácidos sulfúrico y clorhídrico relativamente puros, pero hace un buen trabajo con muchos de esos ácidos cuando se encuentran muy contaminados con iones de metales pesados tales como el hierro y el cobre. Muestra una tendencia pirofórica con el ácido nítrico fumante rojo que tiene un alto contenido de NO_2 y bajo contenido de agua, y también con los halógenos secos.

Aleado con 30% de Mo se incrementa apreciablemente su resistencia al ácido clorhídrico. La adición de pequeñas cantidades de estaño reduce las pérdidas por desincrustación durante el laminado en caliente. La adición de pequeñas cantidades de paladio, platino y otros metales nobles incrementa su resistencia a los medios moderadamente reductores. Una de las aleaciones comerciales de titanio contiene cerca del 0.15% de paladio. Muchos elementos han sido aleados con el titanio para obtener aleaciones comerciales que contienen aluminio, cromo, hierro, manganeso, molibdeno, estaño, vanadio y zirconio.

Fontana escribió una serie de artículos en la que detalla el desarrollo único en medios corrosivos del Titanio,¹⁷ y en ellos concluye que "el titanio posee una superficie metálica altamente reactiva con una capa protectora y tenaz de óxido que provee una excelente resistencia a la corrosión en salmueras de cloruros, especialmente con un carácter que va de neutro a oxidante". Otros investigadores también encontraron que el titanio muestra una buena resistencia a la mayoría de los compuestos orgánicos¹⁸. En

¹⁷ Fontana, M. G., Ind. and Eng. Chemistry (1948-1954).

¹⁸ Bishop, C. R., Corrosion, 10(9), p. 208 (1963).

TABLA 3.20. RESISTENCIA A LA CORROSION DEL TITANIO
EN DIFERENTES MEDIOS CORROSIVOS

MEDIO	CONCENTRACION wt%	TEMP. °C	VELOCIDAD DE CORRO- SION mil/año
Acético	todas	100	<0.05
Cloruro ácido de Anilina	5-20	50-100	<0.05
Benceno + HCl, sin Cl	Vapor+Líquido	176	0.02
Tetracloru- ro de Car- bono	100	P. e.	<5.0
Acido Cromico	25	100	<0.05
Etanol	95	P. e. *	0.5
Formaldehído	37	P. e. *	<5
Acido Fórmico	10	100	<0.05
Acido Clorhídrico	5	100	>250
Acido Nítrico	15	100	<0.05
	40	100	>25
Acido Oxálico	25	100	<1,000
Acido Fosfórico	10	100	450
Sulfúrico	5	P. e. *	>2,000
Acido Tereftálico	75	P. e. *	<0.05

Conversion a SI: mm = mil x 0.0254

* Punto de ebullición.

las tablas 3.20 y 3.21 se muestra la resistencia a la corrosión del titanio puro y cuando se alia con diferentes sustancias.

Stern¹⁹, al final de los años 50's, demostró que la adición al titanio de cantidades tan pequeñas, tales como 500 ppm, de metales

¹⁹ Stern, M. and H. Wissenberg, J. Electrochem. Soc., 106(9), p. 759 (1959).

nobles mejoraba la resistencia a la corrosión de este metal. Dada la pobre conductividad térmica del titanio se podría esperar que este no tuviera un buen desempeño en equipo como los intercambiadores de calor, sin embargo, mas que cualquier otro metal, varias de sus características han sido combinadas para producir una aleación altamente desarrollada que permita su uso en este tipo de equipos con gran competitividad; la corrosión permitida es nula, alta resistencia/baja densidad, que ubican al proceso cerca de la inmunidad más que las unidades de grafito o de cuproníquel.

TABLA 9.21. EFECTO DE EL CONTENIDO DE IMPUREZAS EN LA RESISTENCIA A LA CORROSION DEL TITANIO BAJO LA ACCION DE UN ACIDO MINERAL REDUCTOR.*

IMPUREZA	CONCENTRACION wt%	VELOCIDAD DE CORROSION mil/año
Ninguna	---	>250
Tl ⁴⁺	1.0	1.5
Cr ²⁺	1.0	1.0
Co ²⁺	0.05	2.5
Fe ³⁺	0.15	1.5
HNO ₃	1.0	4.0
Cl ₂	0.01	0.5

Conversión a SI: mm = mil x 0.0254

* 5% HCL a 100°F.

La aleación Ti-Pd y más recientemente la ASTM grado 12 (Ti-0.3Mo-0.8Ni)²⁰ han extendido el uso del titanio debido a su mejor resistencia a la corrosión en ambientes reductores de ácido clorhídrico, desafortunadamente ambas aleaciones tienen sólo una

²⁰ Covington, L. C., "A New Corrosion Resistant Titanium Alloy Ti-3Ba for High Temperature Brine Service." AIME Symp. Detroit (Oct. 21-24, 1974).

moderada resistencia mecánica, lo cual limita sus aplicaciones en muchas áreas industriales.

Para aplicaciones en recipientes a presión, sólo el titanio puro y algunas aleaciones de titanio con baja resistencia son aprobadas por el Código para Calentadores de la ASTM. La tabla 3.22. muestra datos de diseño de algunas aleaciones de titanio a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas.

TABLA 3.22. DATOS DE DISEÑO PARA ALEACIONES DE TITANIO

ALEACION	DENSIDAD ³ g/cm ³	RESISTENCIA DE DISEÑO PERMITIDA		
		98°C MPa	149°C MPa	316°C MPa
Titanio Grado 2	4.52	86.2	62.1	39.3
Titanio Grado 3	4.52	112.4	80.7	41.4
Ti-0.3Mo-0.8Ni Grado 12	4.52	120.7	97.9	73.8
Ti-3Al-2.5V	4.49	167.5*	138.2*	114.8*

* Datos de diseño estimados.

Las aleaciones del titanio se clasifican en tres tipos metalúrgicos. El titanio tiene una estructura cristalina hexagonal cerrada- α a temperatura ambiente que se transforma en cubica centrada en el cuerpo a 1625°F. Varios elementos tienden a estabilizar y/o favorecer una u otra estructura. Las aleaciones alfa son generalmente más dúctiles y soldables. Ambas estructuras pueden ser favorecidas por tratamiento térmico. El titanio tiene un módulo de elasticidad bajo (16'800,000 lb/in²) comparado con el del hierro (28'500,000 lb/in²).

Las aleaciones comerciales fundidas del titanio son apropiadas para bombas y válvulas. (16)

3.2 METALES REFRACTARIOS.

Estos metales se caracterizan por sus muy altos puntos de fusión, comparados con los del hierro y el acero, pero desafortunadamente muestran una resistencia pobre a la oxidación a altas temperaturas, por lo que se requieren medidas protectivas.

Al lado del tantalio, el columbio (niobio), el molibdeno, el tungsteno y el zirconio proporcionan aleaciones relativamente nuevas en el campo de la corrosión para soluciones acuosas.

Los puntos de fusión de estos metales se muestran en la tabla 3.23.

TABLA 3.23. PUNTOS DE FUSION DE LOS METALES REFRACTARIOS

METAL	PUNTO DE FUSION	
	°F	°C
Columbio	4474	2468
Molibdeno	4790	2620
Tantalio	5425	2996
Tungsteno	6170	3410
Zirconio	3366	1852
Hierro (por comparación)	2798	1596

3.2.1. Columbio.

Este metal exhibe buena resistencia a la corrosión en presencia de ácidos orgánicos e inorgánicos. Aparentemente la formación de una película de Cb_2O_5 da la protección. El columbio es pobre para soluciones alcalinas.

3.2.2. Molibdeno.

El molibdeno muestra una buena resistencia a los ácidos fluorhídrico, clorhídrico y sulfúrico, pero con agentes oxidantes tales como el ácido nítrico causa ataque rápido. Es bueno para soluciones alcalinas acuosas. Este metal forma un óxido volátil (MoO_3) en aire a temperaturas por arriba de $1300^{\circ}F$. Una gran ventaja, del molibdeno, en su aspecto mecánico es su alto módulo de elasticidad $50\,000,000\text{ lb/in}^2$. Esto significa que se puede estirar y flexionar menos que el acero bajo una carga dada y una sección transversal dada.

3.2.3. Tantalio.

Debido a su mayor resistencia a la mayoría de los ambientes corrosivos, el tantalio ha sido utilizado por muchos años. Unas pocas excepciones en las que se ve limitado su uso, incluye álcalis, ácido fluorhídrico y ácido sulfúrico concentrado caliente. Se usa para transportar soluciones químicamente puras, como ácido clorhídrico. Debido a su extenso rango de resistencia a la corrosión se utiliza en la reparación de equipo de vidrio. Cualquier reacción con el hidrógeno -(reacción de corrosión o cualquier otra) se presenta al ser absorbido o durante el endurecimiento del metal. La desorción del hidrógeno, para restablecer la ductilidad del tantalio, no se practica por que se requiere una temperatura elevada y un alto vacío. La hoja de tantalio es fuerte, por lo que su costo se reduce a través del uso de secciones delgadas. El tantalio se usa para material quirúrgico.

3.2.4. Tungsteno.

El tungsteno tiene el más alto punto de fusión que cualquier otro metal. Su principal uso es la resistencia a temperaturas elevadas. El tungsteno muestra buena resistencia a los ácidos y a los álcalis, pero no se utiliza comúnmente para soluciones acuosas. Exhibe una resistencia a la tensión de 20,000 lb/in² a 3000 °F.

3.2.5. Zirconio.

Con el advenimiento de la Era Atómica, el zirconio ha encontrado un incrementado uso, debido a que tiene una baja energía térmica por sección transversal del neutrón y que resiste agua y vapor a temperaturas elevadas. Su excelente resistencia a la corrosión se debe a una película protectora de óxido. Este metal exhibe una buena resistencia a la corrosión causada por álcalis y ácidos, (incluyendo los ácidos bromhídrico y yodhídrico), excepto para el ácido fluorhídrico, el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico concentrados y calientes. Los cloruros cúpricos y férrico causan picadura del metal. El zirconio ha encontrado aplicación en el servicio para el ácido clorhídrico. Su resistencia a la corrosión se ve afectada por impurezas en el metal, tales como nitrógeno, aluminio, hierro y carbón.

Las aleaciones de zirconio con pequeñas cantidades de estaño, hierro, cromo y níquel (zircalloy), muestran mejor resistencia al agua a alta temperatura. El zirconio y sus aleaciones en agua a temperatura elevada muestran primero una disminución en su índice de corrosión que puede ser seguido por un coeficiente lineal

rápido de ataque (llamado "ruptura"). Tienden también a tomar hidrógeno (hidratarse) de la reacción de corrosión y se hacen quebradizos. El zirconio posee una resistencia a la tensión de cerca de 16,000 lb/in² a 800°F y 80,000 lb/in² a temperatura ambiente. Su módulo de elasticidad es de 13'700,000 lb/in².

3.3. METALES NOBLES.

Estos metales se caracterizan por su alto potencial positivo con respecto al electrodo de hidrógeno, por su alta resistencia a la corrosión, sus óxidos inestables (no se oxidan) y su alto costo. Ultimamente se les ha dado el término de metales preciosos. En la mayoría de los casos, no se requiere de la formación de películas protectoras (pasivación). Pese a su alto costo, los metales nobles son los más económicos para numerosas aplicaciones de corrosión. Su alto valor como chatarra es una característica ventajosa. Sus combinaciones más comunes se dan en los revestimientos (chapados), guarniciones y recubrimientos con sustratos que proveen resistencia no muy costosa. Los metales nobles son oro, plata, platino y otros cinco metales "platinados", iridio, osmio, paladio, rodio y rutenio. El oro, la plata, el platino y el paladio se pueden adquirir en muchas formas comerciales; los tres primeros se usan extensivamente en la industria. Los demás metales nobles son utilizadas principalmente como elementos aleantes.

3.3.1. Oro.

El oro es el más antiguo de los metales utilizados por el

hombre debido a que se encuentra en la naturaleza en estado puro. Sus primeras aplicaciones se hicieron en joyería y en monedas. Actualmente su consumo mayor se hace en joyería. En estos casos, el oro es aleado con cobre debido a la extrema blandura del oro puro. En general, el oro y sus aleaciones se usan en incrustaciones dentales, contactos eléctricos, revestimientos, vajillas, equipo de proceso, circuitos impresos, en hojas y laminillas para implantar quirúrgicamente en el cuerpo humano y en accesorios decorativos.

El oro es muy bueno en ácido nítrico diluido y en ácido sulfúrico fuerte caliente. Es atacado por el agua regia, el ácido nítrico concentrado, el cloro y el bromo, el mercurio y los cianuros alcalinos.

3.3.2. Platino.

Debido a su resistencia a muchos ambientes oxidantes y particularmente al aire a altas temperaturas, el platino es utilizado para termocoples (Pt-PtRh), tanques e hileras de vidrio fundido, crisoles para trabajos de análisis químicos, espirales para elementos para resistencias eléctricas (aleaciones arriba de 3200°F) y cámaras de combustión o reacción para ambientes extremadamente corrosivos a temperaturas arriba de los 1800°F. Actualmente se usan revestimientos para láminas con un sustrato aleante. Una película de óxido (p.ejemplo Al_2O_3) previene la aleación a la reacción con el sustrato. Este ha remplazado al cuarzo fundido en muchas aplicaciones de este tipo. El contacto accidental con sílica a temperaturas muy elevadas hacen quebradizo

al platino. La inercia del platino esta comprobada por su uso extensivo en servicios como catálisis.

Otros usos para platino y sus aleaciones son en hileras (70 Au, 30 Pt) para rayón, para discos seguros o frágiles arriba de 900°F y el oro a 160°F), absorbedores de ácido sulfúrico, ánodos electroplateados, ánodos de corriente impresa para protección catódica, otro equipo químico y joyería de alta calidad. El platino no es atacado por el mercurio.

TABLA 3.24. ALGUNAS PROPIEDADES MECANICAS Y FISICAS DE LOS METALES NOBLES.

MATERIAL	TEMPE- RATURA °F	RESIS- TENCIA MECANI CA lb/in2	LIMITE DE RE- SISTEN CIA lb/in2	ELON- GACION %	DU- RE- ZA Bhn	MODULO DE ELASTICIDAD	PUNTO DE FUSION °F
Plata	Amb.*	18000	8000	55	26	11,000,000	1721
Oro	Amb.	19000	nulo	70	25	11,600,000	1945
70 Au- 30 Pt	Amb.	29000	9500	--	130	16,500,000	2640
Platino	Amb.	21000	<2000	40	40	21,000,000	3217
Platino	750	19000					
Platino	1830	4000					
Platino	2190	2400					

* Ambiente

El platino exhibe buenas propiedades mecánicas a temperaturas elevadas como se muestra en la tabla 3.24. El oro y el platino son pobres en este aspecto.

El platino es atacado por el agua regia, el ácido yodhídrico, el ácido bromhídrico, cloruro férrico, el cloro y el bromo.

3.3.3. Plata.

La plata es muy conocida por su uso en monedas y vajillas, en su formas sólidas y de recubrimientos. La plata pierde su "nobleza" al entrar en contacto con compuestos sulfurados -su pérdida de brillo es muy conocida. Sirve para contactos eléctricos, para barras de autobuses (las que van arriba de la cabeza), soldaduras, para soldar y aleaciones dentales con mercurio. La plata es ampliamente usada en la industria química como plata sólida y también como plata libre, revestimientos y revestimientos para soldar. Sus aplicaciones incluyen destiladores, serpentines de calentamiento y condensadores para ácido fluorhídrico puro, morteros para evaporar, para la producción de hidróxido de sodio anhidro químicamente puro, autoclaves para la producción de urea y para todos los tipos de equipo para la producción de alimentos y medicamentos en donde la pureza del producto es de extrema importancia. Es altamente resistente para ácidos orgánicos.

La plata es atacada por ácido nítrico, ácido clorhídrico caliente, ácido iodhídrico y ácido bromhídrico, el mercurio, los cianuros alcalinos y se puede corroer por ácidos reductores si se encuentran presentes agentes oxidantes. (17) y (18)

3.4. NO METALES:

3.4.1. CAUCHO SINTETICO Y NATURAL.

Las características sobresalientes del caucho y los elastómeros es su bajo módulo de elasticidad. La flexibilidad se requiere para

muchas aplicaciones tales como tubos, correas y neumáticos de automóviles. No obstante, resulta tener resistencia química y resistencia a la abrasión, y buenas cualidades aislantes en muchas aplicaciones de corrosión. El caucho y el ácido clorhídrico forman una combinación natural, con la que tubos y tanques de acero y caucho han sido "estándares" para este servicio por muchos años.

En forma general, el caucho natural tiene mejores propiedades mecánicas (elasticidad, resistencia al corte y su propagación) que el caucho sintético o caucho artificial, pero los sintéticos tienen mejor resistencia a la corrosión.

3.4.1.1. Caucho Natural.

Hablando orgánicamente, el caucho es una larga cadena de moléculas de isopreno (poliisopreno). Este se obtiene de los árboles como un líquido llamado látex. Debe considerarse su forma estructural parecida a un enrollamiento para la alta elasticidad (100 a 1000% de elongación). El caucho blando tiene una temperatura límite de alrededor de 160°F. Esta temperatura límite puede aumentarse a cerca de 180°F por endurecimiento directo "aleado" (combinado). Adicionando azúfre y calentando se obtiene el caucho duro y más quebradizo. El primero en descubrir este proceso fue Charles Goodyear, el cual se le conoce como vulcanización, en 1939. La ebonita que es un producto duro, contiene cerca del 50% de azúfre, la ebonita se usa para fabricar bolas de boliche. El caucho semiduro y duro se usa para llantas, tanques y muchos otros artículos. Su resistencia a la corrosión se incrementa generalmente con el endurecimiento. En el caso de

las líneas de tubos y tanques, el caucho se aplica generalmente blando y después se vulcaniza en el lugar (para gran cantidad de artículos) o en autoclaves. Sus módulos de elasticidad varían aproximadamente de 500 a 500,000 lb/in² para el caucho blando y para el caucho duro, respectivamente.

3.4.1.2. Caucho Sintético.

Se puede conseguir una gran variedad de cauchos sintéticos, incluyendo mezclas con plásticos. Rellenos plastificantes y endurecedores son mezclados para obtener un gran rango de propiedades -elasticidad, resistencia a la temperatura y resistencia a la corrosión. El Neopreno y el nitrilo de caucho poseen resistencia a aceites y gasolinas. Una de las primeras aplicaciones del neopreno fue y es, la elaboración de mangueras para gasolina. Una de las características sobresalientes de caucho butílico es su impermeabilidad a los gases. Esto explica su uso en interiores de tubos y equipo de proceso tal como un sello o junta para tanques de almacenamiento con cabeza flotante. El caucho butílico exhibe una mejor resistencia a los ambientes oxidantes tales como aire y ácido nítrico diluido. Los recipientes de Neopreno y de caucho-nitrilo transportan hidróxido de sodio puro y concentrado.

Uno de los nuevos elastómeros es un polietileno (Hypalon), el cual posee una resistencia superior a los ambientes oxidantes tales como ácido sulfúrico al 90% y ácido nítrico al 40% a temperatura ambiente.

Los cauchos blandos son los de mejor resistencia a la abrasión.

La química y el mezclado de todos los tipos de caucho son muy complejos y no se puede conseguir mucha información al respecto. El mejor procedimiento es discutir la situación que se tenga con el fabricante con el fin de obtener el material adecuado para el problema dado.

3.4.2. PLASTICOS:

La producción y la utilización de los plásticos se ha incrementado en forma extrema durante los últimos 15 años. Los plásticos se pueden conseguir en una gran variedad de formas hoy en día, estas incluyen bolas de billar, bombas, válvulas, tubos, ventiladores, aislantes, forros, etc.

La Sociedad Americana para Prueba de Materiales establece que "Un plástico es un material que contiene como ingrediente esencial una sustancia orgánica de gran peso molecular, su estado final es sólido que puede formarse por flujo". En otras palabras son materiales orgánicos de alto peso molecular que pueden ser transformados en artículos de uso común. Algunos son de origen natural, pero la mayoría se producen en forma sintética. En general, los plásticos comparados con los metales y las aleaciones, son mucho más débiles, blandos más resistentes a los iones de cloro y al ácido clorhídrico, menos resistentes a los solventes y tienen menores limitaciones de temperatura. El flujo frío o contracción a temperatura ambiente es un problema particular de los termoplásticos.

Los plásticos se dividen en dos clases; termoplásticos y termofijos. Los primeros se tornan blandos cuando se incrementa su

temperatura y retornan a su dureza original cuando se enfría. Los termofijos se endurecen al ser calentados y retienen esta dureza al ser enfriados. Se vuelven "rígidos", es decir, no cambian de forma cuando se calientan y se les aplica una presión. Generalmente sus recortes no pueden ser reprocesados.

Las propiedades de los plásticos pueden ser modificadas considerablemente por medio de los plastificantes, rellenos (para incrementar su peso) y endurecedores.

Los plásticos generalmente no se disuelven al igual que los metales. Estos materiales se degradan o corróen debido a que se hinchan o inflaman con la consecuente pérdida de sus propiedades mecánicas, reblandecimiento, endurecimiento, astillamiento y decoloración.

3.4.2.1. TERMOPLASTICOS:

3.4.2.1.1 Fluorocarbonados.

El Teflón y el Kel F y otros materiales fluorocarbonados son llamados los "metales nobles" de los plásticos, ya que son resistentes a la corrosión en prácticamente todos los ambientes arriba de los 550°F. Estos plásticos consisten principalmente en carbón y flúor. El primer politetrafluoroetileno fue producido por Du Pont y se designó con el nombre de Teflón. (TFE) Algunos materiales similares a este, con composición modificada o copolimerización son el Kel F y el Viton.

En suma la resistencia a la corrosión su bajo coeficiente de fricción son la base para muchas aplicaciones exitosas del Teflón.

Entre ellas se encuentra su uso como grasas, para prevenir las adherencias y "el bloque" de las partes metálicas al actuar como "lubricante". Otros usos son sellos y empaques, aislamiento o recubrimiento de alambre, juntas de expansión, recubrimientos para tubos, cinta, tubos, diafragmas de válvulas, revestimiento y algunas veces intercambiadores de calor (tubos de pared delgada).

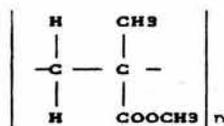
(19)

La tabla 3.25 muestra la estructura y el nombre comercial de algunos compuestos fluorocarbonados. (20)

3.4.2.1.2. Acrílicos.

El grupo más conocido es el de metilmetacrilato (Lucita y Plexiglas). Se usa en cepillos y bolsas, escaparates, modelos de trabajo, casquetes de aviones y faros. Es hermoso, transparente y conduce la luz. Los acrílicos son blandos, fáciles de rayar y no muy resistentes a la temperatura. (21)

Los acrílicos se basan en el polimetil metacrilato, ya que tienen su estructura química, que es la siguiente: (22)



Polimetil metacrilato

3.4.2.1.3. Nylon.

Este material es muy conocido por su uso en medias y calcetines, pero también encuentra mucha aplicación en donde se

requiere una estricta resistencia a la corrosión. Sus principales

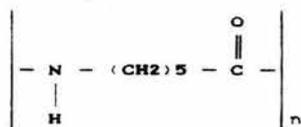
TABLA 3.25. ESTRUCTURA QUIMICA Y NOMBRE COMERCIAL DE ALGUNOS COMPUESTOS FLUOROCARBONADOS.

COMPUESTO	ESTRUCTURA	NOMBRE COMERCIAL
TFE (tetrafluoroetileno)	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array} \quad \quad n$	Teflón TFE (E. I. du Pont) Halon TFE (Allied Chemical)
FEP (fluoruro etilen-propileno)	$\begin{array}{c} \text{F} \text{ F} \text{ F} \text{ F} \\ \quad \quad \quad \\ -\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}- \\ \quad \quad \quad \\ \text{F} \text{ F} \text{ F} \text{ F} \end{array} \quad \quad n$	Teflón FEP (E. I. du Pont)
CTFE (clorotrifluoro etileno)	$\begin{array}{c} \text{Cl} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array} \quad \quad n$	Kel-F (SM)
PVF2 (fluoruro de vinilideno)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{F} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{F} \end{array} \quad \quad n$	Kynar (Pennealt Chemicals)
PVF (fluoruro de polivinilo)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C} - \text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{F} \end{array} \quad \quad n$	Tedlar (E. I. du Pont)

aplicaciones dependen de su resistencia, su bajo coeficiente de fricción y su resistencia al desgaste. Se usa para aislamiento eléctrico, el cual permite una operación a temperaturas más altas que las del caucho. (23)

A continuación se muestran las estructuras de los nylons más

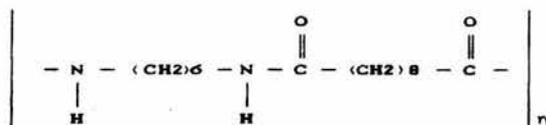
conocidos. (24) y (25)



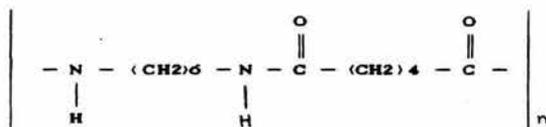
Nylón 6



Nylón II



Nylon 6/10



Nylón 6/6

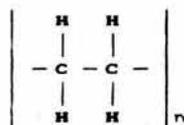
3.4.2.1.4. Poliéter Clorado.

El Penton, un poliéter clorado, es uno de los nuevos plásticos que es ampliamente utilizado para transportar sustancias corrosivas y soportar inclusive ambientes agresivos. Se pueden adquirir partes sólidas como válvulas, tubos y revestimientos de este material. Los aislantes pueden aplicarse por el proceso de lecho fluidificado arriba de 40 mils de espesor.

3.4.2.1.5. Polietilenos.

El Alathon, el Aeroflex, el Polytheno y otros polietilenos representan la gran producción de plásticos, puestos a la venta por muchos productores. Estos materiales se usan para películas

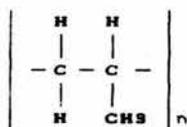
de empaque, hojas, botes a presión, sartenes, vasos y muchos otros usos domésticos. Se utilizan comúnmente en tubería para agua y para otros productos químicos. Ciertos solventes producen una fuerte corrosión, que provoca la ruptura de los polietilénos. Su estructura química es la siguiente:



Polietileno

3.4.2.1.6. Polipropileno.

El polipropileno (Moplen, Profax, Escon). se originó en Italia. Exhibe mejor resistencia al calor y a la corrosión y es más duro que el polietileno. Se utiliza en válvulas, botes esterilizados por calor, tubos, accesorios para tuberías y partes de motores de vehículos. Su estructura química es la siguiente:

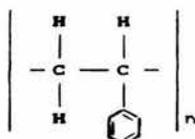


Polipropileno

3.4.2.1.7. Poliestireno.

El poliestireno (Styron, Lustrex) se usa para paredes de tubos, medidores de flujo, equipo de refrigeración, cabinas de radio, estuches de baterías y cierres de botes. Posee una buena resistencia química pero es quebradizo para muchas aplicaciones estructurales. El poliestireno muestra buena resistencia al ácido

fluorhídrico. Su estructura química es la siguiente: (26) y (27)



Poliestireno

3.4.2.1.8. Cloruro de Polivinilo Rígido.

Este material es básicamente rígido pero puede ser reblandecido por la adición de acetato de polivinilo y plastificantes que varían sus propiedades mecánicas. El PVC se usa para tubería y accesorios o conexiones de tuberías y ductos.

3.4.2.1.9. Vinil.

El Tygon, el Vinylite, el Plioflex, el Saran y otros viniles forman un grupo de materiales muy conocido y versátil. La mayoría de ellos son copolímeros del cloruro de vinilo y del acetato de vinilo. Algunos de su usos es en tuberías, películas para empaques, fibras, pisos de loza, discos fonográficos, impermeables y aislantes. La tubería para laboratorio es un ejemplo común. Estos pueden ser unidos por calentamiento, fusión, soldadura y adhesivos. El Saran es diferente a la mayoría de los viniles, debido a que consiste primordialmente de cloruro de vinilideno. (28)

3.4.2.1.10. El Grupo ABS.

Los homopolímeros e interpolímeros de acrilonitrilo, butadieno y estireno, ofrecen un amplio rango de propiedades. El copolímero

de estireno (SBR) se utiliza en un 70% en la fabricación de llantas, combinado con negro de carbón que actúa como refuerzo y aceite como extensor plastificante. Otra modificación del acrilonitrilo con butadieno, con bajo, alto y medio contenido de nitrilo, se denomina NBR o hule nitrilo, y tiene como propiedad notable su resistencia al hinchamiento en solventes no polares. Al aumentar el contenido de nitrilo, se incrementa la densidad de energía cohesiva, de manera que el hinchamiento en solventes no polares de baja densidad de energía cohesiva, disminuye. Se usa la denominación "hule resistente a los solventes", pero se debe considerar con precaución porque un hule polar realmente se hincha más que uno no polar en un solvente polar.

En la década de los 70's se puso a disposición una nueva familia de polímeros con base en una relación de 1:5 moles de acrilonitrilo a butadieno.²¹ Esos polímeros líquidos (peso molecular 3000 a 4000) se hacen con una variedad de grupos terminales. Carboxilo, amina y vinilo permiten la elección de reacciones subsecuentes. Los grupos carboxilo y amina reaccionan con los epóxidos y pueden ser parte de adhesivos o sistemas para colado de piezas. La clasificación de estos materiales resulta compleja desde el punto de vista de que el butadieno y el acrilonitrilo presumiblemente forman un copolímero al azar, el que después se copolimeriza en bloque con el estireno. Así, el resultado es parte aleatorio y bloque, un híbrido interesante.

Para aplicaciones que requieren la claridad del cristal del poliestireno, pero donde la resistencia química y la tensión son

²¹ "Hycar Vinyl-Terminated Liquid Polymers", B.F. Goodrich Chemical Co., Cleveland, (1977).

marginales; hay disponible un copolímero de estireno con acrilonitrilo (SAN). Algunos tipos soportan más del doble del esfuerzo que el poliestireno convencional antes de que se agrieten o se rompan.

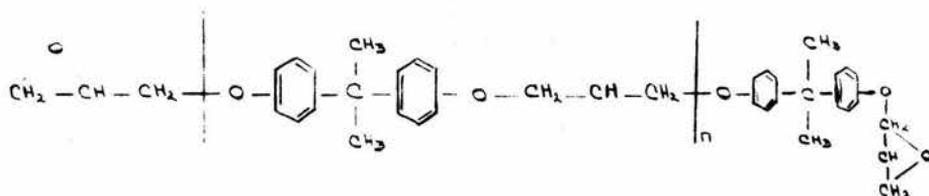
Cada uno de los miembros del grupo ABS se puede considerar primordialmente como una resina termoplástica para moldeo, como un hule, o como una fibra. Sin embargo, el "peso pesado" del grupo ABS, en el negocio de los recubrimientos es el látex de SBR alto en estireno. (29)

3.4.2.2 TERMOFIJOS:

3.4.2.2.1. Epóxidos.

El Epon, el Durcon, el Araldite y otros epóxidos representan quizás la mejor combinación de resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas. Los epóxidos pueden adquirirse como piezas fundidas, extruídos, en hojas, adhesivos y revestimientos. Se usa en tuberías, válvulas, bombas, tanques pequeños, recubrimientos protectivos, aislantes, contenedores, circuitos de impresión, lavabos, en compuestos de cerámica y troqueles para el moldeo de metales. (30)

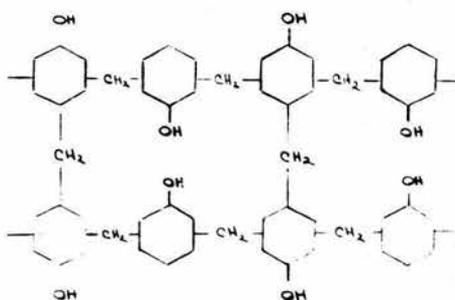
Las resinas epóxicas se caracterizan por tener un grupo epóxico (anillos de oxirano). Su estructura general es la siguiente: (31)



3.4.2.2.2. Fenólicos.

Los materiales fenólicos, (Bakelita, Durez, Resinox) son algunos de los plásticos que se conocen mejor. Se forman en su mayor parte de formaldehído fenólico. Sus aplicaciones incluyen cabinas de radio, teléfonos, sockets eléctricos, bombas, válvulas, distribuidores de autos, recubrimientos, valeros, clavijas y platos. (32)

La estructura química general de una resina fenol-formaldehída es la siguiente: (33)



3.4.2.2.3. Poliésteres.

Los plásticos poliésteres (Mylar, Dacrón, Dypol, Vibrin) son mejor conocidos, por su uso en la construcción de satélites espaciales. Su resistencia a la corrosión es desfavorable, comparada con la de otros plásticos. Uno de los principales usos de los poliésteres involucra o incluye los materiales reforzados. Una aplicación popular es su uso en maletas. El

cuerpo de algunos automóviles esta hecho de fibra de vidrio reforzada con poliéster.

3.4.2.2.4. Silicones.

Los silicones (Dow Corning) ofrecen una sorprendente resistencia térmica. Sus propiedades mecánicas cambian poco con la variación en la temperatura. Estos plásticos difieren de la mayoría en que tienen como componente un ingrediente importante, que es inorgánico. Los silicones se usan para moldear compuestos, laminar resinas y aislar motores y equipo electrónico. Su resistencia al ataque químico no es sorprendente.

3.4.2.2.5. Ureas.

La ureas (Lauxite, Beetle, Avisco) fueron la segunda clase importante de resinas termofijas, después de las fenólicas. Su resistencia a la corrosión no es buena. Sus usos incluyen, cocinas, lavadoras de platos utensilios de cocina, cabinas de radio, sellos y adhesivos.

3.4.2.2.6. Plásticos Laminados y Reforzados.

Estos materiales generalmente consisten de resinas termofijas "rellenas" o laminadas con trapos, tapetes, papel, recortes de fábricas o fibras tales como fibra de vidrio, la cual se usa comúnmente. Su principal ventaja es que la resistencia a la tensión puede ser incrementada a 50,000 lb/in². Esto da como resultado una relación alta de resistencia-peso, para estos materiales ligeros. Sus aplicaciones y usos incluyen tanques,

tubos, ductos, hojas, cuerpos de coches, botes, misiles, barras y partes de satélites.

3.5. OTROS NO METALES:

3.5.1. Cerámica.

Los materiales cerámicos consisten de compuestos de elementos metálicos y no metálicos. Un ejemplo simple es el MgO o magnesia. Otros materiales cerámicos incluyen ladrillos, rocas, vidrio, porcelana, abrasivos, concreto, sílica fundida, grés, arcilla y refractarios para alta temperatura. En general, comparados con los metales, los materiales cerámicos, tienen una mejor resistencia a la corrosión y a la abrasión, incluyendo la resistencia a la erosión-corrosión y son mejores aislantes; pero son frágiles, débiles en presencia de tensión y sujetos al choque térmico. La mayoría de los materiales cerámicos exhiben una buena resistencia a los agentes químicos, con la principal excepción de ácido fluorhídrico y cáusticos.

3.5.2. Ladrillo Acido.

Este material se fabrica a partir de arcilla refractaria común, cuyo contenido de sílica es alrededor de 10% mayor que la del ladrillo refractario. Una aplicación común es en revestimientos para tanques y otros recipientes resistentes a la corrosión por ácidos calientes o a la erosión-corrosión.

Un tanque de ladrillo y acero, contiene generalmente un revestimiento intermedio de plomo, caucho o un plástico. Los

ladrillos se unen con cemento o morteros resistentes a ácidos. Los pisos sujetos a derrames de ácido se fabrican con ladrillos ácidos.

3.5.3. Grés y Porcelana.

Ambos tienen muchas aplicaciones, debido a su buena resistencia a la corrosión. Las partes de porcelana son generalmente de menor tamaño que las de grés. La porcelana es menos porosa que el grés. La grés y la porcelana muestran una resistencia a la tensión de alrededor de 2,000 y 5,000 lb/in² respectivamente. Con grés se fabrican lavabos, cántaros y otros recipientes, torres de absorción, tubería, válvulas y bombas. Con la porcelana se fabrica equipo similar (espreas para ácido) y es muy utilizada como aislante y para interruptores de encendido.

3.5.4. Arcilla Estructural.

Estos productos arcillosos incluyen edificios, estufas, alcantarillas, ladrillos para pavimento, terra-cottas, tubería, techos y paredes. Los ácidos calientes atacan algunas veces a este tipo de materiales.

3.5.5. Vidrio.

El vidrio es óxido inorgánico amorfo, la mayor parte óxido de silicio (sílica), enfriado a condiciones rígidas sin cristalización. Los vidrios usados en el laboratorio, como el Pyrex y en recipientes son muy conocidos. Se pueden conseguir tubos y bombas de vidrio. Su transparencia se utiliza para equipo como medidores de flujo. La fibra de vidrio es ampliamente usada

en filtros de aire, aislantes y plásticos reforzados. El ácido fluorhídrico y los caústicos atacan al vidrio y muestra un ligero ataque con agua caliente.

3.5.6. Sílica Vítreo.

Este material, llamado también cuarzo fundido (casi sílica pura) tiene mejores propiedades térmicas que la mayoría de las cerámicas y una excelente resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas. Se usa para hornos, muflas, quemadores, absorbedores, tubería, etc. particularmente en donde no se desean productos contaminantes.

3.5.7. Concreto.

Los tanques y tubos hechos de concreto son muy conocidos para transportar productos poco corrosivos. Si se tienen ambientes muy agresivos, el concreto es protegido con revestimientos o recubrimientos.

La tabla 3.26 lista algunas propiedades de los materiales refractarios para temperaturas muy elevadas. Estos son llamados también super refractarios. Se usan para metales fundidos, escoria y gases calientes. La alúmina encuentra aplicación en asientos de bombas y válvulas debido a su alta dureza, su buena resistencia a la corrosión y a su buena resistencia al desgaste. El carburo de silicón se usa para espesas de ácido sulfúrico caliente.

3.5.8. Carbón y Grafito.

Estos son los únicos no metales que son buenos conductores del calor y la electricidad. Su alta conductividad térmica da como resultado una excelente resistencia al choque térmico. Se usan para intercambiadores, columnas, bombas y ánodos de corriente impresa. El carbón y el grafito son inertes a la mayoría de los ambientes corrosivos. Son blandos y quebradizos comparados con

TABLA 3.26. ALGUNAS PROPIEDADES DE MATERIALES REFRACTARIOS PARA TEMPERATURAS ELEVADAS.

	MAONESIA*	MULLITE	CARBURO DE SILICIO	ZIRCONIA ESTABILIZADA	ENLAZADO CON 99% AL2O3
Punto de Fusión °F	4800	3300	---	4700	3650
Temp. max. de uso °F	4170 oxid. 3100 red.	3000	3000	4400	3300
Módulo de Ruptura, lb/in ²	2500	1500	2000+	1900	2000
Dureza de Moh (N)	6	6.5	9.6	7	9
Resistencia al choque térmico	Pobre	Buena	Buena	Justa	Justa
Costo Relativo	2.8	1	2.1	10	3.1

* Refractarios básicos que tiene una resistencia pobre a los ácidos calientes.

+ Escala de 1 a 10. Talco=1, Acero con bajo contenido de carbón=4, Diamante=10.

~ A 2500 °F.

los metales. Su resistencia a la tensión varía entre 500 y 3,000 lb/in² y su resistencia al impacto es nula. Su resistencia a

temperaturas elevadas es buena y pueden emplearse a temperaturas arriba de 4,000 o 5,000°F si se protegen de la oxidación (quemado). Los recubrimientos comunes de silicón (siliciuros o carburo de silicón) y los recubrimientos de iridio se pueden utilizar para dar protección a temperaturas mayores de 2900°F.

El carbón exhibe buena resistencia a los álcalis y a la mayoría de los ácidos.

Los ácidos oxidantes, como el nítrico, el sulfúrico concentrado y el ácido crómico lo atacan. El flúor, el yodo, el bromo, cloro y el dióxido de cloro probablemente atacan al carbón. El Karbate (nombre comercial) que es una resina unida con grafito encuentra amplia aplicación en los procesos químicos industriales. El grafito en reactores nucleares es muy bien conocido.

El Grafito Piroclítico que es un material denso y anisotrópico tiene una mejor resistencia mecánica que los tipos más comunes de carbón.

3.5.9. Madera.

El ciprés, el pino, el roble y la secoya son las principales maderas usadas para aplicaciones de corrosión. Marcos de filtros prensa, elementos estructurales de edificios, barriles y tanques se elaboran a veces de madera. Los recipientes deben conservarse húmedos o los palos se encogerán, deformarán o dejarán salir el líquido. Generalmente su uso es limitado para agua y agentes químicos diluídos. Los ácidos fuertes, los ácidos oxidantes y los álcalis diluídos atacan a las maderas. También están sujetas al ataque biológico pero las ceras ayudan a reducir el ataque

ataque químico y biológico. (34)

3.6. SOLDADURA:

Soldar es la operación de unir dos o más piezas metálicas de un conjunto mediante una fusión localizada, asegurando la continuidad metálica entre las partes que se desean unir. No es preciso que las piezas a unir sean del mismo material pero, en caso contrario, lo importante es adoptar el medio de unión adecuado de forma que garantice la continuidad de las propiedades mecánicas.

Para soldar es necesario disponer de una fuente de calor que produzca la fusión localizada de las piezas y del metal de aportación. dicha fuente de calor puede ser de origen químico (llama de oxiacetileno) o de origen eléctrico.

3.6.1. Soldabilidad de los Aceros.

Generalmente todos los metales y sus aleaciones son soldables si se aplican los procedimientos de soldadura adecuados. Lógicamente el metal soldable de mayor interés, y por tanto al que dedicaremos este apartado de soldadura, es el hierro y, más concretamente sus aleaciones constituidas con las impurezas de carbono, manganeso, silicio, azufre, fósforo, o con los metales añadidos, como níquel, cromo molibdeno, titanio, niobio, etc. Hay que tener en cuenta que no todas las aleaciones de hierro son de la misma soldabilidad, sino que con el contenido de carbono se convierten en más difíciles de soldar. En función del contenido en carbono podemos dividir a los aceros y fundiciones de acuerdo

a su facilidad de soldadura en los siguientes grupos:

-Son aceros soldables cuando su contenido en carbono es inferior a 0.30%.

-Son aceros medianamente soldables cuando su contenido en carbono está comprendido entre 0.30 y 0.45%.

-Son aceros poco soldables los que tienen una concentración en carbono entre 0.45 y 0.65%.

-Los aceros cuyo contenido en carbono es superior a 0.65%, e igualmente las fundiciones de hierro (contenido en carbono superior a 1,76%), son muy difíciles de soldar, dado su alto contenido en carbono y su baja elasticidad. Actualmente existen algunos procedimientos que realizan soldaduras sobre estos aceros y fundiciones pero la dificultad de realización, la baja calidad de la soldadura y los defectos que se producen les hacen, de hecho, no soldables.

El primer aspecto en cualquier trabajo de soldadura es considerar el metal que se ha de soldar. El comportamiento del metal bajo el ciclo de calor de la soldadura puede ser crítico o puede no serlo. La economía y la calidad de la soldadura sobre diversos metales puede ser afectada por uno o más de los factores siguientes:

1. Oxidación. (a) La oxidación produce un óxido gaseoso de alguno de los elementos, causando picadura de gas en el metal soldado. (b) La oxidación produce óxidos sólidos que tienen una temperatura de fusión más alta que la del metal, ocasionando inclusiones de escoria. (c) La oxidación produce óxidos que son solubles o que son más pesados y se hunden en el metal fundido y

que hacen al metal de la soldadura frágil o de baja resistencia.

2. Vaporización. La vaporización de algunos elementos en el metal que se evaporan a una temperatura menor que el punto de fusión del metal.

3. Inclusiones no metálicas. Algunos metales pueden contener inclusiones no metálicas finamente divididas que tiene un punto de fusión más elevado que el del metal y, por tanto, no coalescieron cuando el metal fue refinado, pero que se funden y coalescen bajo la alta temperatura del arco y entonces forman inclusiones de escoria visibles.

4. Cambios de estructura. Durante la soldadura por arco puede producirse un cambio de estructura o disposición de los elementos dentro del metal, causando un cambio de la resistencia a la corrosión, etc.

5. Solubilidad gaseosa del metal. (a) Diferentes elementos pueden afectar la solubilidad de varios gases a diferentes temperaturas, y una disminución en la solubilidad de un gas con un descenso en la temperatura en el punto de solidificación puede causar porosidad en el metal de la soldadura. (b) El arrastre o eliminación de un elemento durante la soldadura puede causar la disminución de la capacidad del metal para un gas determinado, ocasionando así que se desprenda el gas produciendo porosidad en el metal de la soldadura. (c) Los gases son absorbidos durante la operación de soldadura para formar compuestos estables con elementos en el metal y así alterar la composición y propiedades físicas del metal de la soldadura.

6. Coeficiente de expansión térmica, o contracción elevada del

metal de la soldadura a enfriarse.

7. Baja resistencia del metal a temperaturas elevadas.

8. Conductividad térmica, o grado de transferencia de calor desde la zona de fusión.

9. Templabilidad. Tendencia del metal al endurecimiento y fragilidad en la soldadura o zona de fusión durante el ciclo de calor de la operación de soldar.

La lista anterior indica por qué algunos metales son más satisfactorios que otros. (35)

3.6.2. Soldabilidad de los Metales no Ferrosos.

ALUMINIO. El aluminio puro y varias aleaciones de aluminio en láminas forjadas, extrusionadas y fundidas, se pueden soldar tanto con soldadura por arco de carbono autoprotegido o por soldadura por arco protegido con gas, siendo el último el de uso más común.

Con la soldadura por arco, la elevada velocidad de fusión del electrodo de aluminio necesita una rápida operación de soldadura y presenta el problema de conseguir calor suficiente dentro del trabajo. La rápida velocidad de enfriamiento del metal puede también atrapar gases en la soldadura y causa porosidad. Para soldadura por arco autoprotegido, se recomienda que el espesor mínimo del metal sea de 1/8 plg. (3.17 mm), aunque se han soldado con éxito secciones más delgadas. El material de 1/4 plg. (6.35 mm) es considerado como el espesor mínimo para soldaduras por arco en aluminio herméticas al gas.

La soldadura por arco ha probado usualmente ser insatisfactoria para unir secciones extremadamente gruesas, debido al efecto de

temple resultante de la elevada conductividad térmica del material. Cuando se demanda la soldadura por arco para aplicaciones que impliquen piezas gruesas o soldaduras complicadas, el problema de la conductividad térmica puede ser resuelto parcialmente mediante calentamiento desde 250 a 400°F (121 a 204°C). El precalentamiento ayuda también a prevenir la porosidad, puesto que los gases producidos en el metal fundido durante la soldadura pueden escapar antes de que solidifique el cráter.

COBRE Y ALEACIONES DE COBRE. El cobre y sus aleaciones se pueden soldar con soldadura por arco autoprotegido, protegido por gas, o de carbono. De las tres se prefiere la soldadura por arco protegido con gas inerte.

La disminución en la resistencia a la tensión según se eleva la temperatura y el alto coeficiente de contracción, pueden hacer complicada la soldadura de cobre. Usualmente es necesario el precalentamiento de secciones gruesas debido a la elevada conductividad térmica del metal. Manteniendo caliente el trabajo y apuntando el electrodo a un ángulo tal que la llama sea rechazada sobre el trabajo, ayudará a permitir el escape del gas. Es conveniente también poner metal por cordón como se pueda.

(36)

3.6.3. Procedimientos de Soldadura.

La soldadura puede ser manual, semiautomática o automática, dependiendo de la forma de realización de ésta. Dentro de cada

tipo de realización existen varios procedimientos de soldadura, y entre los más importantes por su mayor utilización se encuentran los siguientes:

- Soldadura autógena u oxiacetilénica.
- Soldadura manual por arco eléctrico.
- Soldadura bajo gas de protección.
- Soldadura automática bajo arco sumergido.

a) Soldadura autógena u oxiacetilénica. La soldadura manual por fusión de gas (autógena) es aquella en que el calor para conseguir la fusión localizada necesaria se produce por una mezcla de gas combustible y oxígeno que sale de una tobera. Entre los gases combustibles el más utilizado es el acetileno, soldadura oxiacetilénica, cuya llama alcanza la temperatura de 3000°C , que es adecuada para todos los trabajos. Para llenar la junta de soldadura se funde metal de aportación (varilla de soldar). Este procedimiento sólo puede ser aplicable para soldadura manual.

b) Soldadura manual por arco eléctrico. Antes de explicar este procedimiento hay que tener en cuenta que es el uso más extendido. Los bordes de las piezas a unir se llevan hasta la fusión gracias al calor desarrollado por el arco eléctrico. Al principio de la soldadura eléctrica, el electrodo era de carbón especial y el material de aportación procedía de una varilla que se fundía por el del arco. Actualmente el carbón ha sido sustituido por los electrodos. Estos electrodos, normalmente revestidos, cumplen funciones físicas, químicas y eléctricas en

la sección 3.6.4 de este capítulo.

La soldadura por arco eléctrico es el procedimiento más simple y rápido de todos los utilizados en soldadura manual. La elevada temperatura del arco permite velocidades de soldadura mucho mayores que si se utiliza la soldadura oxiacetilénica. El calentamiento en la soldadura eléctrica es muy localizado, lo que permite disminuir la zona de transformación del metal base y las deformaciones.

c) Soldadura bajo gas de protección.

-Procedimiento TIG (Wolframio gas inerte, Tungsteno gas inerte). En el procedimiento TIG, y bajo la protección de un gas inerte, se utiliza un arco voltaico como fuente de calor. Como electrodos se emplean varillas de wolframio aleadas con renio o torio. el gas protector es argón, helio o mezcla de argón y helio, con una pureza mínima de 99.95%. Aquí, el gas protector tiene varias misiones: proteger al electrodo de wolframio, muy calentado, de la oxidación por el oxígeno del aire, lo enfría y facilita la formación de un arco voltaico estable. al mismo tiempo, el baño líquido de soldadura y el alambre de aportación a fundir están protegidos de la atmósfera de aire. En la soldadura TIG, el material de aportación es introducido lateralmente en el arco voltaico. Como material de aportación son utilizadas barras de un metro de longitud para la soldadura manual y alambres en rollo para la soldadura TIG con máquina. En el caso de aceros al carbono, aceros de media y alta aleación, se suelda casi exclusivamente con corriente continua, con polo negativo en el

electrodo.

En la figura 3.1. se incluye un esquema de este procedimiento de soldadura.

- Procedimiento MAG y MIG (Metal gas activo, Metal gas inerte). El procedimiento de soldadura MAG es una soldadura con CO₂ realizada con máquina semiautomática o automática, en la que salta un arco voltaico entre el electrodo de alambre conductor de la corriente y la pieza, y con CO₂ como gas de protección. Como electrodo actúa el alambre conducido mecánicamente desde un rollo, el cual se funde en el propio arco voltaico. El gas protector hace posible la formación de un arco voltaico estable y protege el baño líquido de la soldadura contra la entrada del aire atmosférico.

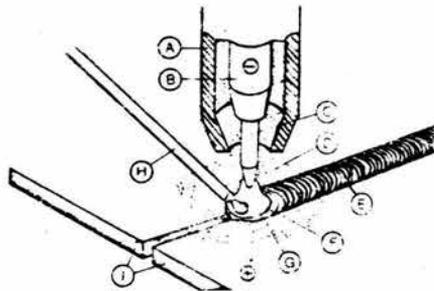


Figura 3.1 Soldadura con gas inerte TIG. A) Conducción de gas. B) Soporte del electrodo. C) Electrodo de wolframio no consumible. D) Gas de protección. E) Cordón de soldadura. F) Metal fundido. G) Arco. H) Metal de aportación. I) Metal base.

Los residuos calcinados que se forman de los componentes de la aleación son compensados por la aleación en exceso del alambre de aportación. Necesariamente hay que cuidar de que el lugar de

soldadura esté exento de corriente de aire. en el caso de altas velocidades de soldadura con el gas protector mediante las correspondientes cantidades de gas protector y formas de la tobera.

Cuando el gas protector es inerte, este procedimiento se denomina MIG y sus particularidades y aplicaciones son similares a las indicadas para el procedimiento MAG. Como gases protectores son utilizados en el procedimiento MAG argón con adición de oxígeno, helio con adición de oxígeno, ácido carbónico para soldar o mezclas de los gases citados. La adición de oxígeno en los gases protectores elimina la tensión superficial de costura más plana y buen tránsito del material en el arco voltaico llega a ser de gotas más finas.

d) Soldadura automática por arco sumergido (Sumerged arc Welding-SAW). Tras la soldadura manual con arco eléctrico y electrodos revestidos, el procedimiento de soldadura al arco sumergido es el más difundido. En este procedimiento la función eléctrica, química y física que cumplen los revestimientos del electrodo la desarrolla un polvo especial que cae de una tolva sobre el baño de fusión y sumerge también al arco eléctrico, lo que da el nombre de arco sumergido al procedimiento.

La varilla que hace la función de electrodo se funde y se consume, esto es, realiza la función de aportación de material. La reposición de la varilla viene resuelta por un dispositivo de avance automático de ésta, al tiempo que la máquina entera avanza igualmente automáticamente a lo largo de la soldadura. Se trata,

por lo tanto, de un procedimiento automático que permite una elevada velocidad de depósito, siendo posible utilizar tensiones e intensidades de corriente eléctrica más altas que en la soldadura manual de arco eléctrico. Esta ventaja se puede explotar al máximo usando la técnica de la fuerte penetración, depositando grandes cordones por pasada. Es oportuno, sin embargo, no exagerar la intensidad de la corriente para no inducir a una excesiva fragilidad al material del cordón debido al elevado tamaño de grano, o bien a los fenómenos de segregación o dilución de las impurezas. Es, por tanto, preferible utilizar la técnica de muchas pasadas, sobre todo en los casos de acero aleados o soldaduras de equipos destinados a trabajar a temperaturas bajas.

La soldadura con arco sumergido se aplica solamente para la

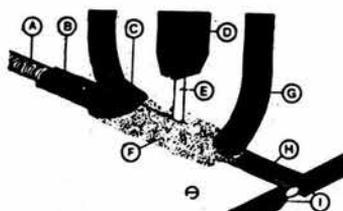


Figura 3.2. Soldadura por arco sumergido. A) Cordón de soldadura. B) Escoria. C) Eliminador de polvo. D) Soporte del electrodo. E) Metal de aportación. F) Polvo. G) Suministrador de polvo. H) Cordón de raíz. I) Metal base.

posición horizontal, aunque existen unas adaptaciones que permiten realizarlas en la posición frontal. En la figura 3.2. se muestra este tipo de procedimiento de soldadura.

3.6.4. Parámetros de Soldadura.

En todo procedimiento de soldadura (manual, semiautomático o automático) los parámetros son las diversas variables que intervienen en el proceso y cuya utilización adecuada o no da lugar a unos resultados correctos o no de la soldadura. De aquí se deduce la gran importancia que tiene la correcta observación y vigilancia de dichos parámetros, que a continuación indicamos:

3.6.4.1. SOLDADURA MANUAL.

A) Diámetro del electrodo. El diámetro del electrodo nos determina la intensidad de soldadura que se puede utilizar y, por tanto, tiene influencia directa en la penetración. El diámetro del electrodo viene medido en milímetros.

B) Intensidad de corriente. Dicha intensidad está ligada al espesor de la chapa y al diámetro del electrodo. Tiene gran importancia en la calidad de la soldadura, ya que la utilización de una intensidad incorrecta es causa de casi todos los efectos de soldeo. Algunos de estos posibles efectos son:

-Soldando con intensidades altas se producen porosidades, escorias, fisuraciones, mordeduras de bordes y deformaciones.

-Soldando con intensidades bajas se producen faltas de fusión y penetración, además de porosidades y escorias.

2.6.4.2. SOLDADURA SEMIAUTOMATICA.

A) Diámetro del hilo (alambre). Determina la densidad de soldadura que se debe utilizar y, por consiguiente, tiene influencia directa en la penetración. También determina en algunos

casos el tipo de transferencia que tenemos que emplear, bien sea siguiendo la técnica del arco corto (cortocircuito) o la del arco largo (pulverización).

B) Velocidad de arrastre (V). La velocidad de los rodillos de arrastre del hilo está sincronizada con la intensidad eléctrica de soldadura, y por tanto a un aumento de la velocidad de arrastre le corresponde un aumento de la intensidad de soldadura en la misma proporción, y de esta forma influye en la penetración.

C) Tensión en vacío (U_0). El arco eléctrico lo provoca una tensión entre puntos, que en este caso son el alambre y la pieza a soldar, pero quien lo mantiene es la intensidad. Así pues, es necesaria una determinada tensión de vacío para producir el cebado del arco eléctrico y, una vez conseguido, mantener una determinada intensidad de soldadura.

D) Extensión del hilo (H). Es la longitud del alambre a través de la cual pasa la corriente de soldadura, es decir, la longitud comprendida entre el punto en que la boquilla hace contacto con el hilo (alambre) y el extremo libre del hilo.

El valor de la extensión tiene importancia porque nos define la cantidad de material fundido por unidad de intensidad y de tiempo. Para un valor alto de la extensión necesitamos una elevada intensidad de soldadura para que nos funda esa longitud de alambre, pero con el peligro de que se desprendan las gotas antes de llegar al baño de fusión. Entonces tenemos muchas proyecciones y nos disminuye la penetración.

3.6.4 3. SOLDADURA AUTOMÁTICA.

A) Tensión del arco (U). Afecta a la penetración, ya que al aumentar dicha tensión de arco, disminuye la penetración y el sobre espesor, aumentando la cantidad de polvo consumido.

B) Intensidad eléctrica de soldadura (I). Al aumentar la intensidad, aumentan la velocidad de fusión, la penetración, la cantidad de metal fundido y el calentamiento; por lo tanto, cuando la intensidad aumenta por encima de cierto valor, pueden producirse ligeras mordeduras.

C) Velocidad de desplazamiento (V). Llamada también "velocidad de soldadura". La penetración es inversamente proporcional a la velocidad de desplazamiento. Su efecto, por consiguiente, es inverso al de la intensidad. Cuando se aumenta la velocidad a cuatro veces su valor inicial, se reduce la penetración y la anchura del cordón, aproximadamente a la mitad.

D) Densidad de corriente (δ). La densidad de corriente es el cociente entre la intensidad y la sección de la varilla ($\delta = \frac{I}{S}$).

Al aumentar la densidad de corriente, aumenta la penetración y disminuye la cantidad de polvo consumido.

3.6.5. Electrodo.

Los electrodos son los elementos indispensables para realizar la soldadura al arco eléctrico, sirviendo de polo eléctrico y de metal de aportación. Existen diversas clases de electrodos: electrodos desnudos, de alma llena y electrodos recubiertos.

A) Electrodo desnudo. Son los constituidos por una varilla desnuda, sin ningún otro elemento. Con estos electrodos sólo se

puede soldar con corriente continua; el arco formado entre el electrodo y la pieza a soldar se interrumpe con bastante frecuencia. El trabajo realizado con electrodos desnudos presenta muchos inconvenientes: el arco es inestable, se interrumpe muchas veces, la decrepitación es muy fuerte y las proyecciones muy numerosas (en forma de bolsas gordas).

Durante la soldadura las gotitas de metal fundido que fluyen de la punta de la varilla para formar el cordón están expuestas a la acción del aire, y estas gotitas absorben una gran cantidad de gases (O_2 y N_2) muy perjudiciales.

La acción del O_2 origina una reducción en el C y Mn que hace disminuir la resistencia y forjabilidad del metal aportado. El N_2 se combina con el Fe y forma el nitruro férrico que da al metal aportado gran dureza, haciéndolo frágil y con poca elasticidad. Estos electrodos están hoy en desuso.

B) Electrodos de alma llena. Son los constituidos por un tubo metálico cuyo interior está lleno de una masa que determina la calidad del electrodo. El trabajo con estos electrodos es difícil, pero en cuanto al metal aportado es de gran calidad. Su empleo no es frecuente, ya que su fabricación es difícil, así como su utilización.

C) Electrodos recubiertos. Son formados por una varilla metálica alrededor de la cual se ha aplicado un revestimiento formado por una mezcla de diversos productos orgánicos y minerales. Si la relación del espesor del revestimiento respecto a la varilla es del 130% o menor, los electrodos son de revestimiento delgado. Si la relación es del 140% es de

revestimiento medio y si es mayor de 150% es de revestimiento grueso. A continuación se exponen las funciones y clases de revestimientos.

3.6.5.1 REVESTIMIENTO DEL ELECTRODO.

El revestimiento del electodo está compuesto por una mezcla de elementos que son variables en cuanto a la cantidad y composición, según el tipo de electrodo. Dicho revestimiento se adhiere a la varilla metálica por medio de silicato sódico (SiO_2Na_2) o silicato potásico (SiO_2K_2).

En la fusión del electrodo el revestimiento lo hace un poco retrasado con respecto a la varilla, formando un cráter que favorece la dirección del arco y el transporte del metal fundido hacia un punto determinado. Múltiples son las funciones que tiene el revestimiento, al igual que múltiples son las ventajas que a la soldadura proporciona, dando como resultado que los electrodos recubiertos sean los de uso más común y que hayan desplazado, prácticamente, a los electrodos desnudos. Entre estas múltiples funciones de revestimiento se encuentran:

- Facilitar el encendido del arco y mantenerlo sin interrupciones.

- Crear una atmósfera protectora de gases y humos que rodeen el arco, protegiendo las gotas del metal fundido.

- Formar una capa de escoria sobre el metal fundido que lo proteja de un enfriamiento rápido y en definitiva de la oxidación, dando al cordón una forma regular y uniforme.

- Adicionar al metal fundido elementos del revestimiento que

mejoren las propiedades mecánicas del metal aportado.

-Hacer posible la soldadura en posición vertical y techo, es decir, tener la posibilidad de soldar en cualquier posición.

-Ejercer una función metalúrgica gracias a la cual es posible realizar soldadura de buena calidad.

3.6.5.2 CLASIFICACION DE LOS ELECTRODOS.

Como se observa dentro de las misiones del revestimiento existen algunas que afectan de forma importante al resultado final de las soldaduras; por lo que como medio de favorecer algunas propiedades de la soldadura se utilizan revestimientos de diversas composiciones, que originan electrodos de los siguientes tipos:

- Oxidantes.
- Ácidos.
- Rutilos.
- Básicos.
- Orgánicos o celulósicos.
- Resistentes.
- De gran rendimiento.
- De recargue.

A) Electrodos oxidantes. Llevan un revestimiento con proporciones elevadas de óxidos metálicos, principalmente óxidos de hierro, y dejan una escoria de carácter oxidante. La soldadura depositada no es forjable y tiene características mecánicas muy bajas, sobre todo su resiliencia.

B) Electrodos ácidos. Llevan un revestimiento con elementos que dan carácter ácido a su escoria. Dicho revestimiento está compuesto por óxidos de Fe y Mn, sílice, ferromanganeso, etc. Son electrodos

con buena penetración, apropiados para soldar en posición horizontal, también en vertical y techo. Pueden usarse con corriente alterna o corriente continua.

El metal depositado tiene buenas características mecánicas, pero si el metal base es de contenido en C > 0.25% y en S > 0.04%, la posibilidad de agrietamiento en caliente es elevada.

C) Electrodo de rutilo. Llevan en su revestimiento gran proporción de óxidos de titanio (rutilo); también llevan a veces cantidades variables de sílice, silicatos naturales, carbonatos, etc. La fusión es muy suave y elabora una escoria muy viscosa que facilita la labor del soldador, depositando un cordón muy bonito y regular. Dentro de éstos hay dos clases: de revestimiento no volátil y volátil. El manejo de estos electrodos es muy fácil, por lo que pueden ser usados por soldadores no calificados. Pueden usarse indistintamente con corriente alterna o corriente continua, con tensión de vacío de 50V.¹

D) Electrodo básico. Llevan en su revestimiento elementos que dan carácter básico a su escoria. Dicho revestimiento está compuesto por carbonato cálcico (CO_3Ca), ferromanganeso, etc. Estos electrodos, al fundir, dan una escoria muy densa de color pardo. El cordón depositado es convexo. Suelda en todas las posiciones con suma facilidad, dando un cordón de buen aspecto y penetración normal. Pueden utilizarse con corriente alterna o corriente continua, con tensión de vacío de 60V.

Son apropiados para soldar grandes espesores y construcciones rígidas de aceros suaves, dando calidad y seguridad a la soldadura.

El principal problema que poseen es el de ser muy higroscópicos (absorben fácilmente la humedad) dando poros y sopladuras en el cordón. Por ello deben secarse en estufas antes de usarlos, por lo menos durante dos horas y a temperaturas de 200°C y 300°C.

Las propiedades mecánicas del metal depositado son excelentes y su resiliencia es muy alta, incluso a 0°C, por tener el metal depositado por estos electrones bajo contenido en H₂ existe menos peligro de que se formen grietas.

E) Electrodes orgánicos o celulósicos. Llevan en su revestimiento un porcentaje elevado de sustancias orgánicas combustibles, superior al 20% (principalmente celulosa). Son apropiados para soldar en todas posiciones. Se pueden trabajar con corriente continua (electrodo al polo positivo) y con corriente alterna, con equipos de elevada tensión de vacío, no inferior a 70 V. Su característica es su gran penetración y su rápida fusión. Son electrodos con características intermedias entre los ácidos y básicos. El cordón depositado presenta una superficie algo rugosa y con ondulaciones espaciadas irregularmente.

F) Electrodes resistentes. Son los que aportan un metal de gran resistencia, como mínimo: 56 Kg/mm², y su resiliencia mínima de 9 Kg/mm², siendo apropiado para la soldadura de aceros al carbón y aleados. Existen dos clases de estos electrodos:

1.° Clase C. Electrodes cuya resistencia del metal aportado se consigue por medio del Mn (1.90%) y el Si (0.10%).

2.° Clase A. Electrodes cuya resistencia del metal aportado se consigue con elementos de aleación distintos a los de la clase C

(Ni, Cr, Mo, etc.).

En general, el tipo de revestimiento de estos electrodos puede ser de cualquier composición química, clase o espesor.

G) Electrodos de gran rendimiento. Se entiende por rendimiento gravimétrico la relación entre el peso del metal depositado por el electrodo y el peso de la varilla del mismo. Dicha relación debe ser igual o mayor a 130% en el caso de electrodos de gran rendimiento, pudiendo llegar hasta 180%; a este grupo pertenecen los electrodos que llevan polvo de Fe (de 30 a 170% en su revestimiento. Los electrodos normales sin polvo de Fe dan rendimientos comprendidos entre 85 y 98%.

Los electrodos de este tipo tienen un revestimiento grueso y al fundirse dan abundante escoria. Dicho revestimiento puede ser ácido (para posición de soldadura horizontal), básico o rutilo (para todas las posiciones). Estos electrodos permiten soldar con mayor intensidad de corriente que la usada para electrodos normales y dan mayor velocidad de fusión, lo que unido a su mayor rendimiento hace disminuir el tiempo de mano de obra.

H) Electrodos de recargue. Son los que tienen alta resistencia al desgaste y gran dureza, lo que se consigue introduciendo en su revestimiento proporciones variables de C, Mn, Cr, Ni, Mo, etc. Dicho revestimiento puede ser de cualquier composición: ácido, básico o de rutilo.

2.6.6. Preparación de Bordes para la Soldadura.

Para poder realizar la soldadura de dos chapas de acero de forma correcta deben ser preparados los bordes de éstas

convenientemente. El motivo principal de preparación de bordes es el permitir que la fuente de calor (arco eléctrico, llama, etc.) y el material de aporte tengan acceso a la zona a soldar, y en particular, donde se requiere una penetración total se debe poder acceder a fundir los bordes y a depositar el material de aportación sobre todo el espesor. El tipo de bordes con que se deben preparar las juntas de la soldadura es función entre otras variables, de: el espesor a soldar, procedimiento de soldadura utilizado, tipo y posición de la soldadura.

Entre los tipos de juntas más utilizados se encuentran:

a) Borde en escuadra (fig. 3.3.a). Es la preparación de bordes más económicas. Para realizar la soldadura se requiere muy baja cantidad de metal de aportación (bajo consumo de electrodos). La deformación angular que se produce en la soldadura es menor que en la preparación en V. Su desventaja más importante, y que limita su uso, es que si se suelda desde una sola cara puede existir falta de penetración y, por consiguiente, no es apta para soportar las tensiones en la raíz o fenómenos de fatiga. El espesor máximo al que se puede aplicar esta preparación de juntas es de 15 mm, soldando desde ambas caras y dependiendo del procedimiento de soldadura usado.

b) Bordes en V (fig. 3.3.b.). De amplísima utilización, la preparación en V con ángulo de 60 a 80° tiene como finalidad la penetración completa de las juntas que se sueldan por un solo lado, ya que facilita al acceso a la raíz. Debe tenerse cuidado con la deformación angular que se origina. El máximo espesor recomendado es de 20 mm, ya que en espesores superiores se debe

utilizar la preparación en "X".

c) Bordes en U (fig. 3.3.c). La finalidad de esta preparación es la misma que la V, pero se usa para espesores superiores a 20 mm, con objeto de reducir el material de aportación y por tanto las deformaciones. Su utilización está limitada por el alto coste de la preparación de bordes, que debe hacerse por fresado.

d) Bordes en X (fig. 3.3.d.). La finalidad de esta preparación es obtener penetración completa soldando desde ambas caras con el fin de atenuar las deformaciones. El consumo de electrodos disminuye sensiblemente con relación a la preparación en V. La preparación en X es preferible utilizarla siempre que sea posible, y sobre todo a partir de espesores superiores a 20 mm.

e) Bordes en doble U (fig. 3.3.e.) El objetivo de esta preparación es obtener juntas con penetración completa en grandes espesores soldando desde las dos caras y reduciendo la cantidad de metal de aportación, y consiguientemente las deformaciones. Se recomienda, en lugar de la preparación en X, para espesores

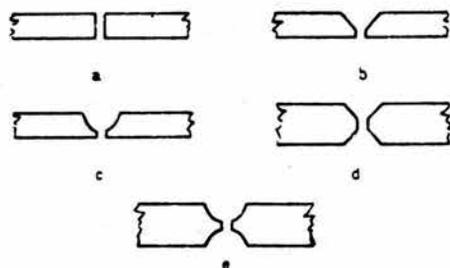


Figura 3.3. Preparación de bordes a) Bordes en escuadra. b) Bordes en V. c) Bordes en U. d) Bordes en X. e) Bordes en doble U.

superiores a 40 mm.

3.6.6.1. LIMPIEZA.

La preparación de los bordes puede hacerse por distintos procedimientos. Generalmente estos bordes no son correctos y por ello se debe pasar la piedra para eliminar partículas nocivas, que han quedado después del corte, que pueden originar posteriormente defectos de soldadura (grietas, escorias, poros, etc.).

Tan importante como la vigilancia de los parámetros de soldadura es la limpieza, ya que ambas fases deben ir perfectamente ligadas. Cuando sobre una superficie se observan restos de grasas, aceites u otros elementos, antes de comenzar el proceso de soldadura dicha superficie debe ser inspeccionada, limpiada con la piedra y acto seguido limpiada con un trapo empapado en acetona o cualquier otro producto desengrasante. Como norma general se puede decir que no se debe comenzar a soldar hasta que no se cumplan todo estos requisitos que nos aseguren un resultado satisfactorio al finalizar el trabajo.

3.6.7. Efectos del Calor en la Soldadura.

Las propiedades que tienen los metales de dilatarse con el calor y de contraerse por enfriamiento origina ciertas dificultades en la ejecución de soldaduras. Además, tanto el valor de la dilatación como de la concentración, función del coeficiente de dilatación varían para cada metal o aleación, es decir, son característicos de cada material y su valor es función

de la temperatura.

Si elevamos la temperatura de unas barras de acero hasta el rojo, por ejemplo, podemos comprobar que después de haberse enfriado a la temperatura inicial, estas barras han quedado algo más cortas que antes del ensayo. Este fenómeno es debido a la imposibilidad de calentar una pieza de tal forma que todos sus puntos reciban o pierdan la misma cantidad de calor en el mismo espacio de tiempo. Estas diferencias de temperatura dan lugar a la creación de tensiones internas en el material y, cuando esta diferencia es suficientemente grande, se origina una deformación plástica de contracción.

Al realizar la soldadura de una pieza de acero se aporta una gran cantidad de calor y la pieza se dilata en sus tres dimensiones. Al enfriarse la pieza se contrae igualmente, en sus tres dimensiones, denominándose a cada una de ellas: contracción longitudinal del cordón de soldadura; contracción transversal a la que tiene lugar en el sentido perpendicular al eje longitudinal del cordón de soldadura y contracción angular a la que se produce sobre el canto del cordón de soldadura.

Si al realizar la soldadura de una pieza de acero la deformación de ésta está impedida por el embridado o punteado, caso éste habitual, se originan tensiones internas en el material.

Los factores que intervienen, fundamentalmente, en las deformaciones y tensiones internas que se originan en las soldaduras son los siguientes:

- Tipo de material. Los materiales poco conductores del calor

sufren mayores deformaciones, o tensiones internas, que los metales buenos conductores. Cuanto mayores sean las diferencias de temperatura entre la zona soldada y la próxima a la soldadura, mayores serán las deformaciones que se originen en la pieza.

- Volumen del metal depositado. En la unión soldada las deformaciones y tensiones aumentan con el volumen del metal a depositar o aportar a la unión.

- Intensidad de la corriente. Como es lógico, a mayor intensidad mayor calor aportado, y por tanto mayores deformaciones y tensiones internas.

- Número de pasadas. Al depositar cada una de las pasadas el cordón se enfría originando una contracción. Por ello, cuanto mayor sea el número de cordones depositados, mayores serán estas contracciones, y por tanto mayores las deformaciones o mayores las tensiones internas si la pieza está embriada.

- Diámetro y tipo de electrodo. A igualdad de cordón el número de pasadas disminuye y, por tanto, las deformaciones y tensiones con el uso de electrodos de diámetros grandes y de gran rendimiento. Por el contrario, el uso de electrodos de pequeño diámetro o menor rendimiento aumenta el número de pasadas y, a su vez, aumenta las deformaciones y tensiones.

- Rigidez de las piezas. Si la pieza a soldar es muy rígida, o de gran espesor, las deformaciones que se originan son pequeñas; en cambio, las tensiones internas del cordón de soldadura son muy grandes, pudiendo llegar a provocar fisuración del cordón si su sección es pequeña en comparación con el espesor de la pieza.

Para evitar que las piezas queden deformadas después de

soldadas y las tensiones interiores no sean excesivas, se deben adoptar algunas precauciones, tales como:

- Preparación de los bordes adecuados, de modo que ajusten bien.
- Puntear cada metro (puntos de soldadura muy pequeños).
- En construcción, soldar primero las costuras transversales.
- Mantener fijas en su posición las partes a soldar, pero no de forma rígida, que origine grandes tensiones, sino de forma elástica.
- Contrarrestar la deformación con otra previa, cuando esta sea posible.
- No usar nunca un exceso de material de aportación.
- Repartir las pasadas de forma que se compensen las deformaciones.
- En las costuras en ángulo utilizar electrodos que permitan un avance rápido.
- En costuras en ángulo, siempre que no estén sometidas a grandes esfuerzos, utilizar soldadura intermitente.

3.6.8. Principales Defectos de las Soldaduras.

En la realización de la soldadura se pueden producir una serie de defectos que es preciso detectarlos y luego repararlos si es necesario. Los medios más comunes de la detección de los defectos de las soldaduras son el control visual, aplicación de líquidos penetrantes o partículas magnéticas, ultrasonidos y control radiográfico. Este último método es el más efectivo y el más utilizado a pesar de ser más costoso.

Las causas más comunes de aparición de defectos en las soldaduras son:

- Mala realización de la soldadura, con errores tales como utilización de electrodos de diámetro no adecuado, intensidad de la corriente aplicada indebida, velocidad de avance del electrodo no correcta, separación entre los bordes de los materiales a soldar inadecuada, preparación de bordes mal realizada, falta de limpieza del cordón depositado, etc.

- Defecto en los electrodos, varillas o polvo utilizados en la ejecución de la soldadura.

- Defecto en los materiales base, esto es, en los materiales a unir por la soldadura.

Los defectos más importantes que se pueden encontrar en las soldaduras y que se producen normalmente por las causas indicadas son:

- Falta de penetración.
- Excesiva penetración.
- Pegadura.
- Inclusión de escoria.
- Falta de espesor.
- Exceso de metal aportado.
- Mordeduras.
- Aspecto irregular del cordón.
- Poros superficiales.
- Sopladuras.
- Fisuras o grietas.

Las causas concretas que produce cada uno de los defectos mencionados, así como las precauciones que se deben tomar en cada caso para evitarlos, se pueden encontrar en los numerosos libros especializados sobre el tema. (37)

3.7. BIBLIOGRAFIA

- (1) Fontana, M.G. and N.D. Greene, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, Singapore, (1978).
- (2) Gackebach, R.E., Materials Selection for Process Plants, Reinhold Publishing Co., New York, (1960).
- (3) Fontana, M.G., op. cit.
- (4) Gackebach, R.E., op. cit.
- (5) Fontana, M.G., op. cit.
- (6) Gackebach, R.E., op. cit.
- (7) Fontana, M.G., op. cit.
- (8) Patton, W.J., Materials in Industry, 2a. ed., Prentice-Hall, Inc., USA, (1976).
- (9) Fontana, M.G., op. cit.
- (10) Apraíz, J.B., Aceros Especiales y Otras Aleaciones, 5a. ed., Dossat, Madrid, (1975).
- (11) Gackebach, R.E., op. cit.
- (12) Apraíz, J.B., op. cit.
- (13) Fontana, M.G., op. cit.
- (14) Ed. Library of Congress Cataloging in Publication Data, Source Book on Materials Selection, Vol. II, ASM Engineering Bookshelf, pp. 259-260, USA, (1977).
- (15) Fontana, M.G., op. cit.
- (16) Seagle, Stan R., and D.E. Thomas, Status of Titanium Technology, *Chem. Eng. Prog.*, pp. 63-68, (Jun. 1986).
- (17) Fontana, M.G., op. cit.
- (18) Ed Library of Congress Cataloging in Publication Data, op. cit.

- (19) Fontana, M.G., op. cit.
- (20) Harper, Charles A., Handbook of Plastics and Elastomers, McGraw-Hill, New York, (1975).
- (21) Fontana, M.G., op. cit.
- (22) Harper, Charles A., op. cit.
- (23) Fontana, M.G., op. cit.
- (24) Harper, Charles A., op. cit.
- (25) Chruma, J.L. and R.D. Chapman, Nylon Properties and Applications, *Chem. Eng. Prog.*, pp. 49-54, (Jan. 1985).
- (26) Fontana, M.G., op. cit.
- (27) Harper, Charles A., op. cit.
- (28) Fontana, M.G., op. cit.
- (29) Rodríguez, F., Principios de Sistemas de Polímeros, Manual Moderno, México, (1984).
- (30) Fontana, M.G., op. cit.
- (31) Harper, Charles A., op. cit.
- (32) Fontana, M.G., op. cit.
- (33) Harper, Charles A., op. cit.
- (34) Fontana, M.G., op. cit.
- (35) Baquero, J.F. y V. Llorente Martínez, Equipos para la Industria Química y Alimentaria, Alhambra, España, (1985).
- (36) Ed. Morrow, C.L., Enciclopedia de Mantenimiento Industrial, Tomo VII, 9a. Impresión, CECSA, México, (1985).
- (37) Baquero, J.F., op. cit.

IV

CORROSION EN LOS EQUIPOS DE PROCESO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

4.1 CORROSION EN TUBERIAS DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO

4.1.1. Corrosión en Tuberías de Agua

En la corrosión interna de las tuberías los puntos importantes a tener en cuenta son los siguientes:

En las aguas y en las soluciones salinas exentas de oxígeno la velocidad de corrosión está determinada por el pH.

En las aguas blandas y en aquellas en que por ser insatisfactoria la relación de cal a ácido carbónico no puede formarse capas protectoras, o que por la presencia de un alto contenido de cloruros la formación es defectuosa, la velocidad de corrosión está controlada por el contenido de oxígeno; la conductividad determina la distribución del ataque y por ello la naturaleza del daño corrosivo.

En aguas que están casi equilibradas respecto al contenido de cal y ácido carbónico, decide el contenido de oxígeno, y la alcalinidad a él ligada en la inmediación de las paredes, el que se forme o no una capa protectora.

Para el acceso y distribución de oxígeno a las pilas de corrosión y para los procesos de corrosión a ellos ligados, es importante la velocidad de corriente del agua. Para todas las velocidades se forma sobre las paredes de los tubos una capa en reposo, cuyo espesor depende algo de la velocidad del agua. A través de esta capa se debe difundir el oxígeno para alcanzar la pared del tubo.

Cuando el contenido de oxígeno es demasiado pequeño, la oxidación de los iones de hierro divalente primariamente formados en parte en el seno del agua que llena toda la sección del tubo, y

el hidróxido férrico precipitado es arrastrado por ella. Esta impurificación del agua por el hierro ha sido observada, por lo regular, solamente en las aguas pobres en oxígeno. En las que contienen bastante oxígeno el hidróxido férrico se origina en el mismo lugar de formación de los iones ferrosos y forma, en caso de que no pueda producirse una capa protectora, pústulas de orín, que en su curso posterior dan lugar a nódulos de orín más o menos continuos que aumentan la pérdida por frotamiento y llegan a dar lugar a pérdidas de rendimiento en la conducción que son realmente inesperadas. Al limpiar los tubos de esta incrustación por medios mecánicos o químicos se vuelve a dejar al descubierto una superficie sensible, que la experiencia demuestra que tienen una fuerte tendencia a volver a incrustarse. Se ha encontrado que en la formación de los nódulos o tubérculos de orín pueden resultar muy activos los efectos biológicos o catalíticos de las bacterias.

Para la corrosión por agua caliente se deben tener en cuenta las variaciones en las condiciones fisicoquímicas producidas por el calentamiento, es decir:

Se modifica la constante de equilibrio cal-carbónico; se descompone más carbonato cálcico o, lo que es igual, aumenta el contenido de ácido carbónico libre. Por este proceso se desplazan la mayoría de las aguas hacia el punto ideal de equilibrio, pero desgraciadamente es demasiado rápido el proceso de aproximación al equilibrio y el sobrepasarlo, y en particular ocurre sin que la superficie del hierro pueda acomodarse electroquímicamente a las nuevas condiciones. La segregación del carbonato cálcico ocurre la mayoría de las veces, en forma de depósitos de lodo, que,

especialmente, si se endurecen por cocido, aumentan el peligro de corrosión.

Es de efecto considerable la variación de la conductividad, que aumenta en unas 2.5 veces cuando la temperatura pasa de 10 a 80°C. En las tuberías de agua caliente las zonas de corrosión se presentan como picaduras muy marcadas.

Tiene su efecto el aumento de la movilidad del oxígeno disuelto y de la velocidad de difusión, que interviene en el sentido de producir un aumento de la corrosión en tanto que el oxígeno se mantenga disuelto, lo cual depende de la presión y la temperatura.

4.1.2. Corrosión en Tuberías de Gas

En las tuberías de gas, es decir, en las de conducción a larga distancia y en las redes de distribución de gases combustibles, hay que diferenciar tres regiones por lo que a la corrosión respecta. La primera es la húmeda, que origina la condensación del vapor de agua juntamente con la de hidrocarburos pesados.

Sobre las paredes internas de los tubos se forman unas capas húmedas, variadamente coloreadas, laminares, que al tacto parecen aceitadas o engrasadas. Muchas veces se forman depósitos azulados, visibles, que contienen azul de Berlín, originados por la reacción del orín primario con el ácido cianhídrico de los gases. Además, junto con el orín de hierro normal, se encuentran productos que contienen combinaciones sulfuradas de hierro y algunas veces azufre de hierro elemental, que resulta de una acción secundaria con el sulfuro de hidrógeno. La capa total moderadamente adherente

y de espesor moderadamente uniforme, está impregnada con los productos condensados del gas. La experiencia ha demostrado que el ataque es lento y bastante uniforme.

Esta región húmeda se enlaza con regiones que según la temperatura externa o del suelo, el contenido de agua de los gases y la presión, se suceden períodos húmedos y períodos secos en alternativa pendular. Sólo en los puntos más profundos, por ejemplo, en los cierres hidráulicos se mantienen los productos de condensación, que progresivamente se hacen más y más ácidos. Continuamente el sulfuro de hidrógeno, contenido como tal en el gas o procedente de la descomposición del sulfuro de carbono o de las combinaciones orgánicas sulfuradas del gas, se va disolviendo en los productos condensados y, lentamente se oxida a ácidos oxigenados del azufre. En tales lugares se producen daños considerables si no se eliminan regularmente los productos condensados o no se les neutraliza con materias alcalinas. (1)

4.1.3. Condiciones Que Causan Corrosión en Flujo de Corriente

4.1.3.1. Tipos de Celdas de Corrosión en Tuberías

a) Corrosión en Celdas Metálicas Distintas

Consideremos que una tubería subterránea de acero común se construye con ramales de cobre (la línea principal de acero con servicios de cobre). A menos que las líneas de cobre sean eléctricamente aisladas del tubo de acero. De acuerdo a la serie fem el acero será el ánodo y corroerá. En un suelo de baja resistividad, las líneas de cobre podrían producir grave corrosión de el acero.

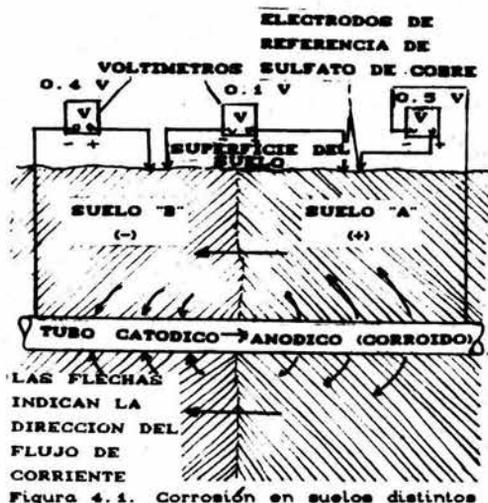
Otro ejemplo, se considera un sistema de tubería subterráneo que involucra una mezcla de línea de acero común y una línea de acero galvanizado sin aislamiento eléctrico entre los dos materiales. La serie fem nos dice que el zinc, el metal más activo, actuará como ánodo y corroerá. En un suelo de baja resistividad, el zinc galvanizado tenderá a consumirse rápidamente y no se tendrá la protección adecuada para las partes galvanizadas.

En el siguiente ejemplo, si el tubo galvanizado o los accesorios son aislados eléctricamente de la tubería común, el zinc galvanizado podrá seguir siendo anódico pero la corriente que él descarga podrá fluir sólo sobre el acero expuesto en el acero galvanizado. Tales áreas de acero expuesto normalmente son pequeñas y rápidamente polarizadas de tal forma que la corriente que fluye está restringida, produciéndose una vida más larga del galvanizado. El zinc así empleado produce una forma de protección catódica.

b) Corrosión Resultante de Suelos Distintos

De la misma manera muchas de las celdas de corrosión pueden establecerse con metales distintos, una tubería de acero pasando a través de suelos distintos puede formar celdas de corrosión. Esto se ilustra en la figura 4.1.

En esta figura, se muestra una tubería que atraviesa dos suelos distintos. Como se ilustra, el potencial del metal del que se constituye la tubería respecto al electrolito representado por el suelo "A" es ligeramente diferente al potencial del mismo metal



con respecto al electrolito representado por el suelo "B". El potencial natural o de media celda de un metal con respecto a su ambiente puede variar de acuerdo con la composición del electrolito. Esto aumenta la diferencia de potencial y satisface las condiciones necesarias para establecer una celda de corrosión. En la figura, el tubo que está en el suelo "A" es anódico con respecto al suelo "B" y es corroído como se indica por la descarga de corriente. Esto es algunas veces muy notorio cuando se descubre una tubería que ha estado enterrada mucho tiempo pudiéndose apreciar áreas catódicas en excelente estado y, a muy pocos pies de distancia, áreas anódicas severamente corroídas. El voltímetro que se encuentra entre los dos suelos, muestra que se puede medir la diferencia de potenciales entre ambos suelos.

Un caso especial de lo tratado anteriormente es aquel que involucra acero en concreto y acero en suelo.

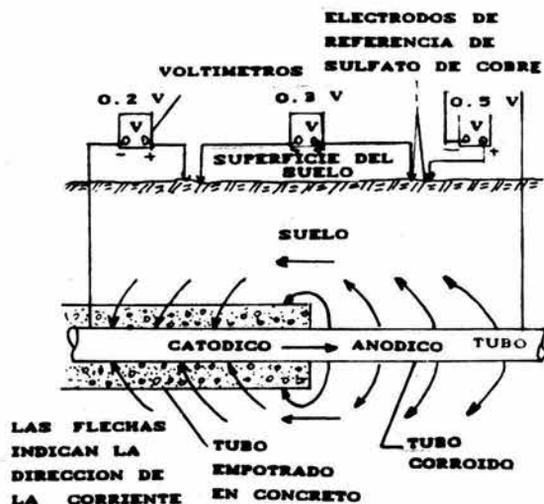


Figura 4.2. Acero en concreto

La figura 4.2 indica que la porción de tubo de acero empotrada en el concreto será catódica con respecto a la sección de tubo adyacente enterrada en el suelo. El ambiente electrolítico de concreto húmedo, que es enteramente diferente de aquel que corresponde al suelo circundante, produce diferencias substanciales en el potencial acero-medio ambiente. Prácticamente esto siempre da como resultado que el acero enterrado en el suelo sea de carácter anódico con respecto al acero empotrado en concreto. En algunos casos esto es una fuente importante de actividad corrosiva.

La figura 4.1 ilustra el efecto de suelos adyacentes de diferentes características. En algunos casos, las diferencias en los tipos de suelos son tan pronunciadas que cuando se entierra una tubería, el suelo que contacta con el tubo será una mezcla de los suelos. Esto da lugar a la condición ilustrada por la figura 4.3.

La condición mostrada en la figura 4.3 da como resultado muchas celdas de corrosión en la superficie del tubo las cuales no son necesariamente detectadas por mediciones de potencial tomadas en la superficie del suelo como se muestra en la figura 4.1.

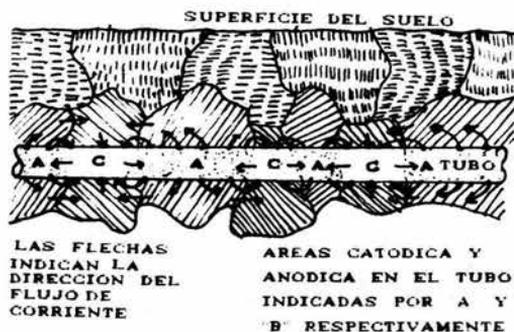


Figura 4.3. Corrosión causada por mezcla de suelos diferentes

c) Celdas de Corrosión de Aereación Diferencial

Otra fuente de corrosión es la condición referida como "aereación diferencial". Algunos investigadores consideran esta fuente como una de las más importantes razones del daño causado por la corrosión. Considerando que una tubería se empotra en un suelo completamente uniforme pero algunas áreas de la línea tienen una fuente libre de oxígeno (bien aireado) mientras otras áreas son privadas de oxígeno (pobremente aireado). Bajo estas condiciones, el tubo en el suelo bien aireado será anódico y corroído. Una condición simple se muestra en la figura 4.4.

En la figura 4.4 se muestra un tubo pasando bajo un camino pavimentado donde está en contacto con un suelo que tiene una fuente restringida de oxígeno que se compara con el resto del tubo de uno y otro lado del suelo no sellado por una superficie

pavimentada. La corrosión bajo el pavimento puede ser severa. Esta situación se presenta con frecuencia en los sistemas de tubería. Otro ejemplo de naturaleza similar es una tubería empotrada en un río o en una corriente pero en contacto con un suelo bien aireado de uno y otro lado. La corrosión se concentrará en el área bajo el río o la corriente.

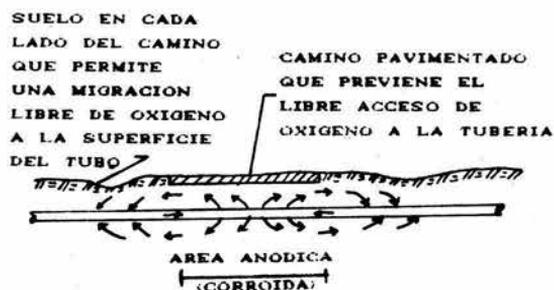


Figura 4.4. Corrosión de aireación diferencial (Las flechas indican la dirección de la corriente)

d) Tubo Nuevo y Tubo Viejo

Una condición relacionada muy estrechamente a la corrosión de metales diferentes surge cuando un tubo de acero nuevo se une a un tubo de acero viejo (figura 4.5). Esto se ha experimentado cuando ha sido necesario reemplazar secciones de tubo. La pieza de tubo nueva, expuesta a las mismas condiciones de corrosión, lógicamente se espera que tenga la misma duración que la sección original, pero siempre se encuentra que al menos que esta nueva sección del tubo sea aislada eléctricamente del resto del sistema) esta sección fallará más pronto de lo esperado.

Aunque hemos ilustrado el efecto de la adición de secciones nuevas de tubo a sistemas viejos, una condición de corrosión

similar puede surgir si, durante el trabajo en un sistema existente los instrumentos que cortan o raspan el tubo producen áreas de acero brillante. Estas manchas brillantes serán anódicas y pueden resultar en grave corrosión en un suelo de baja resistividad. (2)

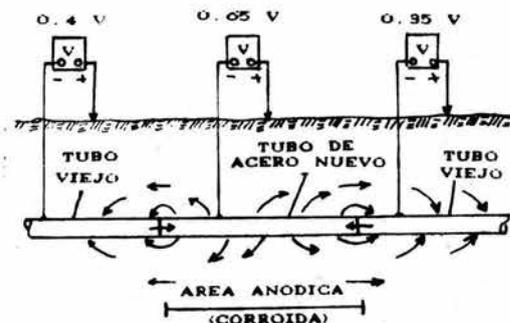


Figura 4.5. Corrosión de acero nuevo en contacto con acero viejo.

4.1.4. Corrosión en Válvulas

4.1.4.1 Ataque químico (corrosión galvánica) es una razón fundamental para reparar una válvula. El problema de la oxidación, de los hoyos y/o la formación de incrustaciones es lo más agudo en el vástago y en los sellos como corrosión en estas áreas puede restringir completamente la operación de una válvula.

4.1.4.2. Abrasión. Los cuerpos de las válvulas de compuerta, de bola, los asientos y otras partes son susceptibles al desgaste acelerado debido a las partículas de la línea.

4.1.4.3. Ruptura o pandeo. Frecuentemente, cuando las válvulas de metal se han corroído "suavemente", el torque del vástago puede

incrementarse exponencialmente. Los operadores se ven obligados a emplear una "barra de engaño" como palanca adicional para crear lo que el fabricante considera un torque excesivo para el cual la válvula fue diseñada. Generalmente alguna parte se doblará o romperá.

4.1.4.4. Desgaste. Con el uso normal, todas las válvulas requerirán asientos y sellos nuevos debido al desgaste. También, un vástago oxidado con un anillo sellante "O" a través del uso normal se desgastará. (3)

4.1.4.5. Corrosión en el huso de la válvula

La corrosión en los husos de las válvulas en servicios de agua ocurre comúnmente en muchas aplicaciones agravado por el hecho de que una vez que ha comenzado la corrosión los empaques se dañan y se provoca un goteo en la superficie atacada. El reemplazo de los empaques solo alivia temporalmente; pero será necesario cambiar el huso de la válvula.

Un problema adicional es que la corrosión puede hacer su aparición después de que la válvula ha sido evaluada hidráulicamente; pero especialmente en el servicio en válvulas que permanecen inoperadas durante largos períodos de tiempo.

El problema básico es que un empaque mojado en contacto con un acero inoxidable queda bajo condiciones que proveen una aereación diferencial e inclusión de oxígeno de la superficie del acero bajo el empaque. Como resultado el acero se vuelve activo más que pasivo en esta región estableciéndose así una celda de corrosión

electrolítica con el área actual del acero convirtiéndose en ánodo. Esto puede dar lugar a la corrosión por picadura, extendiéndose en cavidades en la superficie del vástago. El porcentaje de corrosión se ve afectado marcadamente por la cantidad de cloruro y oxígeno en el agua, y también por la calidad de los empaques. (4)

4.2. CORROSION EN BOMBAS

Las piezas de una bomba pueden dañarse de diferentes maneras. Las tres clases son: corrosión y erosión; abrasión y desgaste; y fracturas, grietas, extrusiones y abolladuras. En la práctica, la naturaleza y las causas del daño son más numerosas y complejas. En particular, muchas formas de daño son resultado de la acción combinada de uno o varios factores que pueden actuar como catalizador.

4.2.1. Corrosión y Erosión

Las siguientes clases pertenecen a este daño:

Reacciones químicas.

Acción electrolítica: Puede ocurrir en las juntas en las que esten en contacto metales distintos, en las soldaduras si el metal depositado no es completamente compatible y en las discontinuidades de conjuntos homogéneos. El ataque electrolítico se ve también reforzado por la presencia de aire en el fluido.

Corrosión por grietas.

Corrosión debida a temperaturas elevadas.

Los problemas relacionados por operar una bomba a temperaturas

elevadas puede subdividirse en dos clases:

Piezas sobrecalentadas en una bomba:

Las partes afectadas por sobrecalentamiento son : los cojinetes, la caja de cojinetes, el prensaestopas y el sello mecánico.

Algunas causas pueden ser: una mala instalación, un mal ensamblado o una mala mecanización.

Un sobrecalentamiento de los cojinetes puede destruir las propiedades del lubricante. En ellos mismos puede producirse la oxidación y la abrasión de las superficies hasta la ruptura. La temperatura alta también puede sobrecalentar y expandir ciertas partes de la caja de cojinetes provocando que algunos de ellos se desalinien y se rompan.

Un sobrecalentamiento del empaque o del sello mecánico puede conducir a una expansión accidental de las diferentes partes de la bomba. Por consiguiente, si se calienta demasiado la superficie del eje que está en contacto con el empaque puede arruinar los acoplamientos del sello mecánico. En ambos casos la capacidad de sellado del prensaestopas puede reducirse considerablemente, provocando la pérdida de líquido o que entre aire en la bomba.

Bombeo de líquidos calientes:

Para este problema se pueden aplicar cinco criterios que son comunes para todas las aplicaciones de bombas: reducción en la fuerza del material, mayor expansión térmica cercana a la del líquido caliente, algunos materiales de empaque y sellos mecánicos pueden fallar al hacer contacto, por lo que se requerirán juntas especiales ya que las partes que hacen contacto con el líquido

pueden volverse menos resistentes a la corrosión.

Operación intermitente de una bomba: Las bombas que operan continuamente muestran con frecuencia un porcentaje menor de corrosión que aquellas que operan en forma intermitente. Durante el paro de la bomba el aire puede infiltrarse acelerando la corrosión.

Cavitación: La cavitación siempre daña las piezas de la bomba debido a la acción combinada de la erosión y la corrosión. Las superficies rugosas de cualquier material son atacadas más rápidamente por agentes químicos que las lisas. Una razón es que las superficies rugosas atraen y retienen pequeños núcleos de aire y gas que más tarde actúan como catalizador.

La erosión causada por cavitación generalmente convierte cualquier superficie lisa en una superficie rugosa, lo que impulsa y acelera la corrosión. También convierte algo del líquido bombeado en vapor.

Los efectos corrosivos se muestran de diferentes formas dependiendo de las propiedades físicas del material y las circunstancias bajo las cuales ocurre. Cuando el porcentaje de corrosión es bajo y la velocidad del flujo líquido es alto, lo que ocurre es que se pulen las superficies afectadas.

En otros casos la erosión produce una superficie irregular con hoyos de diferentes tamaños los cuales cubren y cierran como si la superficie entera fuera corroida por una horda de pequeños insectos. Aún en otros casos, especialmente en materiales con composición no homogénea (como: hierro colado que consiste de hierro y partículas atrapadas de grafito que se encuentran

dispersas finamente a través del material), la corrosión puede arrancar el elemento más activo, causando que el resto se desintegre.

4.2.2. Abrasión y Desgaste

Para esta clase de daños corresponden las siguientes categorías:

Presencia de sólidos en el bombeo de líquidos. A menos de que las partes que están en contacto con el líquido estén hechas de materiales altamente resistentes a la abrasión; este efecto causará una reducción rápida en la sección transversal y en el espesor de las piezas afectadas y en última instancia conducirá a la fractura.

Una característica típica de este daño son las superficies pulidas como espejo de las partes rotatorias. En contraste, las partes estacionarias muestran dentados oblongos y elevaciones cubiertas con surcos y raspaduras que con frecuencia son modelos ondulados.

Remolinos, flujos secundarios, cavitación por el líquido que fluye. Los flujos secundarios pueden surgir en el líquido bombeado que conduce a la abrasión en ciertas zonas de la bomba. Estos efectos siempre ocurren cuando la bomba opera cerca del interruptor. Las zonas afectadas son: la junta de la voluta, el centro del impulsor, los hélices, los anillos de refuerzo en la salida del impulsor, en el lado de alta presión en los anillos de la cubierta y cerca de los hoyos de balanceo.

La abrasión debida a estos factores algunas veces dará lugar a

superficies con características semejantes a las superficies dañadas por sólidos. Sin embargo, en muchos casos, cuando se encuentran juntos todos estos efectos producirán cavitación, dando como resultado una superficie irregular cubierta con muchos hoyos de profundidades diferentes.

Desgaste mecánico. Esto siempre ocurre en los anillos sellantes y en el prensaestopas. En el prensaestopas esto se debe a que el empaque estacionario del eje rotatorio se desgasta en forma de pequeñas partículas de metal. El desgaste puede ser severo cuando el cuello del prensaestopas esta demasiado ajustado o hay un flujo de líquido inadecuado entre el eje y el empaque.

Se manifiesta en raspaduras en la periferia del eje, acompañada con frecuencia por una decoloración oscura de sobrecalentamiento. En casos extremos, el empaque puede corroer al eje de tal forma que conducirá a la fractura.

El desgaste en los anillos puede deberse a velocidades de flujo altas entre las caras selladas combinadas con la velocidad alta en la periferia de los anillos sellantes, o al contacto metálico entre las partes estacionarias y rotatorias. El desgaste debido a la acción combinada del flujo y a la velocidad relativa de las partes rotatorias se manifiesta como un aumento en el espacio libre.

El desgaste debido al contacto metálico se nota en las superficies raspadas de los anillos sellantes. Como en el prensaestopas, dichos daños van acompañados por decoloramiento oscuro debido al calor generado durante el desgaste.

4.2.3. Fracturas, Rupturas, Abolladuras y Extrusiones: estos daños siempre son resultado de tensión excesiva. (5)

4.3. CORROSION EN VENTILADORES

4.3.1. Fallas en Rueda y Aspas

Las fallas en la rueda y aspas caen dentro de tres grandes grupos: propiedades del material, control de calidad, y los problemas del diseño ingenieril.

Básicamente, las propiedades de los materiales que se emplean para los ventiladores deben ser resistentes a la erosión, a la corrosión, y a los efectos de expansión. Los problemas de control de calidad relacionan los defectos de soldadura, los procedimientos de soldado, y los materiales. Los problemas de diseño ingenieril tienen dos facetas: (1) las condiciones de régimen permanente y (2) la combinación del régimen permanente y las tensiones dinámicas o alternantes.

Los problemas de fatiga pueden dividirse en dos clases: la fatiga de ciclo bajo y la fatiga de ciclo alto. La fatiga de ciclo bajo es causada por la alta tensión centrífuga que existe en el diseño. Esto ocurre en un número relativamente pequeño de ciclos en la estructura y puede ocurrir en sistemas sujetos a un número raramente alto de arranques y paros.

La fatiga de ciclo alto ocurre cuando una tensión alta del régimen permanente (en o cerca del punto sometido del material) existe en combinación con una tensión vibratoria de baja amplitud. Porque estas vibraciones ocurren en frecuencias altas, hay experiencias de ruedas con varios millones de ciclos en un tiempo corto. Esto también puede ocurrir cuando la tensión del régimen

permanente es buena a rendimiento bajo pero las tensiones vibratorias tienen una amplitud grande.

4.3.2. Análisis de las Fallas de las Aspas

El análisis para las fallas de las aspas generalmente sigue el mismo acercamiento como para el sistema de vibración pero hay adiciones notables. El primer paso para determinar la causa de la falla de una rueda o aspas es ejecutar una prueba de medición. El propósito de la prueba es medir el régimen permanente y los valores de tensión oscilante en lugares discretos del impulsor.

Un instrumento de tensión convierte el parámetro mecánico en una señal eléctrica que es proporcional al esfuerzo en el metal y entonces se transmite a la grabadora o a un RTA. En los sistemas de ventilación esto va acompañado por el empleo de un radio miniatura FM que va montado en el elemento rotatorio (fig. 4.6). Estos transmiten una señal precisa a un receptor que la lleva a una grabadora. Los medidores de tensión se colocan en áreas de alta tensión normalmente donde ocurrió la fractura. Este procedimiento es un método exacto, particularmente por las presiones, las temperaturas, y el ambiente en general dentro del sistema de ventilación. La tensión se monitorea a través de un arrancador. La oscilación se observa como evidencia de la tensión dinámica (siempre hay picos dentro y fuera de la señal). Si estos se ven, el análisis para el contenido de la frecuencia se hace con RTA. Esta información permite un análisis preciso al costo mínimo y en el menor tiempo posible.

El siguiente paso es la prueba al impacto para encontrar su frecuencia natural. También se realizan las medidas de las formas.

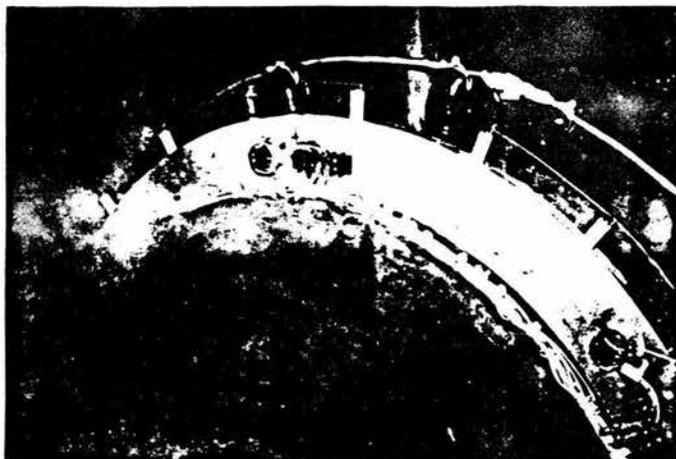


Figura 4.6. Transmisores miniatura FM empleados para mandar señales de tensión de un ventilador en operación. La antena de transmisión está detrás de la instalación del anillo.

ANALISIS DE LAS FALLAS DE LAS RUEDAS

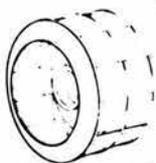
VENTILADOR DE ASPAS RADIALES



VENTILADOR DE PUNTAS RADIALES



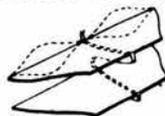
VENTILADOR DE DOBLE ENTRADA



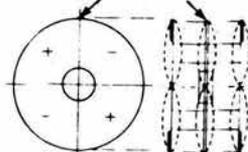
VIBRACION DE LAS ASPAS



VIBRACION DE LAS ASPAS



PLACA CENTRAL



VIBRACION TOTAL DE LA RUEDA

Figura 4.7. Varios modelos de las formas, observadas durante la prueba al impacto para la falla de las aspas y rueda, puede ocurrir en la primera y subsecuentes frecuencias naturales del componente. Los diferentes modelos de formas del mismo componente ocurrirán en frecuencias naturales diferentes.

Estas son las formas actuales de los componentes de la rueda que toman a sus frecuencias naturales. Estas formas ayudan a determinar las causas de las tensiones altas que han contribuido a la falla. La figura 4.7 representa varios modelos típicos de formas.

Estos modelos de formas se desarrollan montando acelerómetros en varios puntos de la aspa suficiente para representar su forma. Los desplazamientos relativos en cada uno de estos puntos, en respuesta a la fuerza puesta ya conocida a frecuencias de interés, se emplea para definir el modelo de las formas relativas a la forma original. (6)

4.4. CORROSION EN COMPRESORES

En el gas puede haber trazas de compuestos de azufre y cloruros que pueden causar corrosión. Aunque una corrosión pequeña puede producir falla de las partes tensionadas ciclicamente de cualquier tipo de compresor. En un compresor reciprocante, las partículas sólidas causarán costos altos de mantenimiento, por desgaste acelerado de las válvulas, pistones, cilindros, bielas del pistón, y el empaque. Los sólidos que pasan a través de los compresores centrífugos pueden corroer los impulsores y la envolvente severamente.

4.4.1. Fractura por Corrosión bajo Tensión

El problema predominante que ocurre en los compresores centrífugos es la fractura por sulfuro más que la corrosión bajo tensión. Las posibles razones para esto son:

1. Los pasos a seguir para eliminar la fractura bajo tensión

por sulfuro también puede eliminar la fractura por corrosión bajo tensión.

2. Las composiciones normales del gas generalmente no proveen los componentes necesarios.

3. El ataque corrosivo general puede eliminar la formación de hoyos dañinos.

Y se debe considerar la posible acumulación de contaminantes y la consecuente falla prematura de los componentes del compresor, mientras el compresor se para.

4.4.2. Fractura bajo Tensión por Sulfuro

Puede ocurrir la fractura bajo tensión por sulfuro en los impulsores del compresor centrífugo.

4.4.2.1. Efecto de la temperatura

Una fuerte relación entre la temperatura y la fractura por sulfuro con el tiempo la falla se incrementa marcadamente de 75 a 150°F. Casi todos los compresores centrífugos con sulfuro de hidrógeno en el gas operan a estas temperaturas o más, particularmente se toma en cuenta cuando la temperatura se eleva a través de la máquina.

4.4.3. Fragilización por Ambiente de Hidrógeno.

4.4.4. Operación a Baja Temperatura- Falla por Fragilidad.

Debe evitarse un sobrenfriamiento del cilindro a una temperatura abajo del punto de rocío del gas comprimido debe evitarse para prevenir que el cilindro se corroa. (7)

4.5. CORROSION EN FILTROS

Cuando se emplean filtros de hojas a presión se pueden presentar los siguientes problemas:

Las hojas de los filtros se pueden deformar bajo las condiciones de servicio.

Que los sistemas que se empleen para remover la torta presenten problemas de goteo.

Un diseño hidráulico pobre de la hoja puede causar una reconstrucción de la torta alrededor de la periferia de la hoja (fig. 4.8c). Cuando la torta llena el espacio entre dos hojas, la presión, P_1 (en la fig. 4.8c), se vuelve menor que P_2 . Una diferencia de presión de 25 psi en una placa pequeña (18 plg^2) ejercerá una carga sobre la hoja de cerca de 8,000 lb, la cual es suficiente para deformarla.

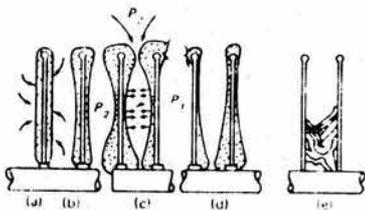
Como se muestra en la figura 4.8e y 4.8i, una torta caída que cuelga entre dos hojas puede ejercer una fuerza suficiente para dar forma cóncava o convexa en el centro de la hoja.

La figura 4.8 se aplica específicamente a hojas estacionarias, pero la misma es con cierta frecuencia para hojas con salidas en el centro (como en los filtros de hojas rotatorias, o filtros tubulares). Como regla, una hoja estacionaria deformada puede causar muchos más problemas que una hoja rotatoria o tubular deformada. Sin embargo, cualquiera que sea, resultará costoso el mantenimiento y el reemplazo de las partes dañadas.

En las aplicaciones corrosivas tales como salmueras saturadas con sustancias tales como cloruros, bromuros, boratos, carbonatos, etc. La experiencia indica que en tales casos, la coraza, el eje y el prensaestopas resultan dañados. Los sellos también se dañan y

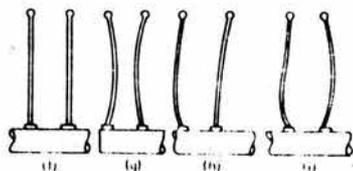
se produce goteo del líquido corrosivo entre el revestimiento y el metal que los soporta.

CAUSA



- (a) La hoja ideal y la distribución de la torta
- (b) La distribución normal de la torta (exagerada)
- (c) Raegos de una hoja con diseño hidráulico pobre
- (d) Filtro con hoja de hidráulica pobre y/o pobre distribución de flujo
- (e) Hoja con acanalamiento inadecuado

EFEECTO



- (f) Hoja recta rígida (se puede doblar con el tiempo)
- (g) Hoja doblada en corto tiempo
- (h) Hoja deformada en corto tiempo
- (i) Hoja deformada en corto tiempo

Figura 4.8. Efecto en las hojas de los filtros de hidráulica pobre

4.5.1. Causas por las que se desgastan las telas de los filtros

Los fabricantes de filtros con frecuencia los equipan con telas sintéticas para resolver los problemas de corrosión o la formación de incrustaciones. Tanto los departamentos de operación y mantenimiento deben entender que todas las telas de los filtros tienen que cambiarse algunas veces frecuentemente (figura 4.9).

1. A medida que las fibras plásticas se exponen a temperaturas altas de operación, aparece la degradación ocasionada por el calor.

2. Con el tiempo, el ataque químico ocurre en la superficie de la tela.

3. A la larga, las telas se cubren por el polvo de la torta.

4. A medida que las diferencias de presión cambian en un filtro, la tela se mueve hacia dentro o hacia afuera del soporte.

Este desgaste en la tela da como resultado hoyos.

5. La erosión de la tela del filtro con frecuencia ocurre en el área adyacente a las toberas de rociado, particularmente donde se empla el chorro directo y tierra diatomacea como ayuda en el filtrado.

6. Con frecuencia se retiene líquido en el interior de la hoja del filtro cuando la coraza está vacía. En algunos casos, si un filtro no se limpia adecuadamente, el peso de la torta filtrada acumulada ejerce una carga en la tela en la superficie de la hoja filtrante, lo que causará que la tela se desgaste (y, que con el tiempo se rompa).

7. La erosión normal dentro de la malla ocurre como resultado de un revestimiento con materiales abrasivos que fluyen a través de la malla durante el paso inicial del revestimiento.



Figura 4. D. El desgaste de la tela filtrante ocurre en estas áreas

8. Si un filtro se abre frecuentemente, la hoja quizá la hoja requiera ser surcada a través de la torta. O, la torta depositada puede forzar a la hoja para que entre en contacto con la coraza,

lo que da como resultado un desgaste.

9. En muchas plantas, el personal que opera no es suficientemente cuidadoso en la manera de instalar, inspeccionar o limpiar las hojas- este descuido frecuentemente da como resultado un daño mecánico. (8)

4.6. CORROSION EN INTERCAMBIADORES DE CALOR

Erosión-corrosión a la entrada de los tubos.- La evidencia de erosión-corrosión en la entrada de los tubos es la reducción en las terminales de los tubos, siempre en un sólo lado y se presenta por ranuras longitudinales. La causa puede ser una mala distribución o una turbulencia excesiva.

Ataque por choque.- Esta es una forma de erosión caracterizada por picaduras de forma definida con paredes lisas. Los hoyos pueden alargarse en la dirección del flujo. Siempre se concentran en la región de la entrada pero pueden extenderse por todos los tubos.

Daño por cavitación a la salida de los tubos.- Aparece como erosión y daña los extremos de los tubos y la placa tubular.

Erosión en la placa tubular.- Puede resultar de la mala distribución, partículas erosivas en el lado de los tubos a la entrada de la corriente, goteo en las áreas de paso, y del estiramiento que ocurre cuando hay goteo en las uniones tubo-placa tubular.

Goteo en las áreas de paso. - Las causas son: (1) doblamiento de las áreas de paso por la diferencia de presión; (2) un encorvamiento permanente en la placa tubular; (3) deflexión de la placa tubular bajo presión; (4) encorvamiento debido a la diferencia de temperatura entre el canal y la coraza; (5) cerrado insuficiente para sellar la junta en las varillas de paso.

Fractura del ligamento. - Las causas principales de la fractura del ligamento son el flujo excesivo de calor a través de la placa tubular, choque térmico (un caso extremo del flujo excesivo de calor), y la corrosión del lado de la coraza. El flujo de calor a través del espesor de la placa tubular es excesivo cuando las fuerzas inducidas térmicamente en los ligamentos se combinan con las fuerzas de presión para crear una condición de sobretensión.

Además, si la placa tubular es delgada, las temperaturas de los fluidos en contacto con las caras de la placa tubular están apartadas, y se encontrarán fracturas en los ligamentos, la fractura probablemente ha resultado de un flujo de calor alto. Si la temperatura de entrada en el paso de los tubos está muy lejos de la temperatura del paso de salida, y la fractura del ligamento están confinados al tubo en las orillas internas de los pasos, el flujo de calor entre los pasos es probablemente demasiado alto.

En las uniones verticales, los ligamentos en la parte superior de la placa tubular quizá se fracturen porque el lado inferior de la placa tubular no está lavada totalmente por el fluido del lado de la coraza. Una capa de gases no condensables, que pueden ser corrosivos, cubre la placa tubular. Como resultado, la temperatura

de la placa tubular puede exceder la temperatura la temperatura base de diseño.

La fractura del ligamento en el fondo de las placas tubulares se debe a la corrosión iniciada por la falla del sedimento derribado. Dicha falla en la placa tubular siempre va precedida por fallas en los tubos cerca del fondo. Sin embargo, si se encuentran fracturas en el fondo de la placa tubular de una unidad que se emplea para generar vapor, la causa probable es un choque térmico. Típicamente, esto resulta de no abastecer medios para asegurar que el fondo de la placa tubular siempre este inmersa en el fluido de la coraza. La alimentación fresca que cae en el fondo la enfría tan rápidamente que la placa tubular se choca.

Fatiga en el extremo de los tubos. - Se puede encontrar en las regiones laminadas de las uniones de los tubos que trabajan duro rápidamente. Cuando la vibración causa fatiga en los tubos, la ruptura siempre aparece donde los tubos emergen de la placa tubular. Si la unión está soldada sólo de frente, la vibración puede causar que la soldadura se fracture. La fractura de la soldadura siempre comienza al principio y se propaga desgarrando el tubo y la placa tubular, como se muestra en la figura 4.10.

Una falla similar de fatiga es el desgarre de las orillas de los tubos. Esto ocurre cuando con el instrumento de laminado se pule y endurece la orilla. Como el tubo se expande, la orilla se desgarra o sensibiliza al desgarre.

Corrosión por hendidura. - Causa falla en los tubos dentro de la

placa tubular.



Figura 4.10. Rasgaduras propagándose en la soldadura, tubo y placa tubular

Fractura por corrosión bajo tensión.- Tiene lugar en la transición entre las secciones de expansión y no expansión de los tubos, donde el tubo metálico está en tensión.

Corrosión en los extremos de los tubos.- Cuando la búsqueda revela que la causa del mezclado de corrientes es el goteo del tubo entre las placas tubulares y los deflectores adyacentes, es probable que los tubos estén corroidos porque hubo poca o nada de circulación en esa región. También se puede encontrar corrosión en la cara interna de la placa tubular detrás del paso de entrada, lo que indica que hay una aceleración de la corrosión debida a la temperatura más alta en la parte de la placa tubular.

Las causas principales de los puntos muertos son: (1) El montaje de los haces en las corazas de cabeza; y (2) la construcción en la cual la distancia entre las placas tubulares y los deflectores adyacentes es más grande que el arreglo de la placa en el cuerpo de la unión. (Esto se hace para acomodar las

toberas de entrada y salida más largas en diámetro que el arreglo del deflector deseado).

Retiro o expulsión de tubos.- El goteo entre el lado del intercambiador puede ocurrir si se retiran o se expulsan los tubos de la placa tubular. Las cargas altas de los tubos son tan aptas para tensar o colapsar los tubos a tal grado de sacarlos o expulsarlos de las placas tubulares.

Las fallas unidireccionales, localizadas aproximadamente en la región central, indican que ha sido aplicada una presión excesiva. Esto puede deberse a un mal funcionamiento de la válvula de presión, al almacenamiento de una unidad parada - llena con líquido y sellada- en el sol, o cayendo al drenaje de agua de una unidad parada cuando la temperatura está abajo del punto de congelación. La sobrepresión puede doblar las placas tubulares permanentemente. También, la sobrepresión que resulta de la expansión del fluido o por congelación, puede resquebrajar los tubos y dañar los deflectores.

Las fallas unidireccionales localizadas en mayor parte en la periferia del campo de los tubos de un intercambiador de placa tubular, construido sin una junta de expansión en la coraza, indica con una expansión diferencial que la unión tubo no es lo suficientemente para tensionar.

Cuando los tubos en el área de paso caliente de una unidad de pasos múltiples se expulsan, y los del paso frío se retiran, la causa es un intervalo de temperatura demasiado grande. Otras indicaciones son que el haz tubular adquiere la forma de un

platanos en unidades flotantes, y el pandeo de los tubos en el paso caliente.

La distribución al azar de los tubos retirados en intercambiadores gas aire indica que algunos tubos se ensucian más rápidamente que otros. El gas fluye dentro de los tubos; y por consiguiente, la temperatura del metal sucio es más cercana a la temperatura del aire frío que la temperatura de los tubos limpios, y se sueltan.

La duración de la tensión residual en una junta expandida es una función del comportamiento de deslizamiento del tubo y de la placa tubular durante el servicio. Cuando se relaja la tensión residual, después de un periodo substancial de operación exitosa, los tubos siempre gotean- antes de que la resistencia de la junta se reduzca seriamente.

Origen de la fractura en las uniones soldadas.- La falla encontrada después de que el intercambiador entro en servicio siempre se debe a la fabricación inadecuada, pero algunas veces puede deberse al diseño defectuoso de la unión. Los tipos de fallas que se esperan son porosidad y agujeros, abrasión a través de los tubos, y fractura en la raíz de la junta. Las fallas después de un período de servicio exitoso siempre están trazadas por la fractura de la junta y la propagación en las siguientes sitios, que se enlistan en orden de frecuencia: (1) a través de la soldadura; (2) a través de la soldadura y la pared del tubo; y (3) a través de la soldadura, la pared del tubo y la placa tubular, como se muestra en la figura 4.10.

✓ **Daño por erosión en la entrada de la coraza.** - Los síntomas de daño por erosión en la entrada de la coraza son picaduras, similares al ataque por choque del lado del tubo, y goteo en los tubos situados en la región de entrada de la coraza. Algunas causas son: (1) la falta o la inadecuada protección contra el choque; (2) condiciones imprevistas de flujo; (3) área de escape insuficiente alrededor de la placa chocada; y (4) insuficiente tramo tranquilo cuando hay un incremento del diámetro del tubo.

Cavitación a la salida de la coraza. - Puede ocurrir cuando la descarga de la coraza disminuye en forma repentina en un tubo vertical, y la presión reducida resultante induce la formación de burbujas de vapor en el fluido. En suma en la cavitación, siempre hay torbellinos.

Fallas en las juntas de expansión en la coraza. - Las juntas de expansión fallan por corrosión, fatiga, sobrepresión, que sean más largas que las deflexiones axiales diseñadas, deflexiones angulares no anticipadas y compensadas, alguna combinación de estas causas. Los elementos de las juntas de expansión inferiores son delgadas- 0.035 a 0.093 plg. (0.89 a 2.36 mm). Además, la mayoría de las configuraciones no pueden adaptarse con ventilas y desagües. Por lo tanto, los líquidos que fluyen a través de las corazas horizontales quedan atrapados en el fondo de la junta, y los no condensables en la superficie. Las direcciones de la presión y las tensiones de deflexión, y los fluidos del proceso atrapados, crean condiciones optimas para la fractura por

corrosión bajo tensión de los aceros austeníticos (cuyos fondos son fabricados ordinariamente). Los fluidos con alto contenido de cloruros causan fractura por corrosión bajo tensión. (9)

4.7. CORROSION EN EVAPORADORES

El ensuciamiento es la formación de deposiciones distintas de las sales o escamas y se puede deber a corrosión. La corrosión puede afectar también la selección del evaporador, puesto que las ventajas de los evaporadores con coeficientes altos de transferencia de calor resultan más evidentes cuando se recomiendan materiales de construcción costosos. La corrosión y la erosión suelen ser con frecuencia más importantes en los evaporadores que en otros tipos de equipos debido a las altas velocidades de líquido y vapor que se utilizan, y la presencia frecuente de sólidos en suspensión y las diferencias necesarias de concentración.

4.7.1. Localización de Daños en la Operación de Evaporadores

Los problemas encontrados en los evaporadores caen en cuatro categorías: operaciones en general, vacío, economía de vapor, y la relación entre el funcionamiento del evaporador y las otras partes de la planta.

Los problemas típicos de operación que pueden ocurrir involucran: la formación de escamas, vacío insuficiente, falla en los tubos del condensador, funcionamiento pobre de los concentradores o los efectos de circulación forzada, fallas mecánicas del interior del recipiente. Estas dificultades pueden

ser vestigio de una mala operación, de desgaste mecánico, o diseño inadecuado.

4.7.2. Escamas Causadas por Licores de Pulpa de Papel

La formación de escamas en la superficie de los tubos de los evaporadores de pulpa de papel, y en la mayoría de los evaporadores, a través del depósito del licor y sales solubles y no solubles en agua. La fibra en el licor de pulpa gastado intensifica el problema en las fábricas de papel. Para una gran extensión, el porcentaje de formación depende de la calidad del licor que está siendo procesado.

En los evaporadores de licor de papel, la lignina precipita principalmente en el primero y segundo efectos. En algunas fabricas de papel, los depósitos de lignina en la superficie externa del tubo del segundo efecto son vestigio del primer efecto. Normalmente la precipitación de lignina es causada por el bajo pH del licor negro. El pH debe mantenerse entre 11 y 12. En algunos casos, la pulpa de las maderas que no siempre son acidificadas dan como resultado licores con alto contenido de lignina. Ocasionalmente, la precipitación de lignina se detecta en la superficie de los tubos del condensador.

En los procesos de pulpa de papel, la eficiencia baja en la operación del sistema de preparación del licor blanco (recaustización) da como resultado una concentración excesiva de carbonato de sodio en el licor, que se depositará en el primer o segundo efecto, y posiblemente en el tercero. En suma, si el licor no es clarificado adecuadamente en el proceso de recaustización,

contendrá carbonato de calcio insoluble en agua, el cual puede depositarse en cualquier efecto, pero principalmente en el primero, segundo, y tercero.

Si la eficiencia de la caldera es baja en el proceso de la pulpa de papel, una cantidad en exceso de sulfato de sodio circulará a través del sistema y se depositará en el primer efecto. En una papelería, fue necesario suspender la operación del evaporador cada 16 o 24 h para remover los depósitos.

En la superficie externa de los tubos de acero al carbón que tienen los evaporadores de pulpa de papel se pueden formar depósitos de sulfuro de hierro, por la evolución del gas de sulfuro de hidrógeno en los efectos corriente arriba. Con frecuencia estos depósitos llevan a la falla del tubo.

La vibración causa la falla de los tubos del condensador.

Los tubos fallan prematuramente por exceso de vibración. Este problema normalmente es causado por un defecto en el diseño que permite un espacio insuficiente para la penetración del vapor en el haz de tubos. La condición resulta en una excesiva velocidad de vapor a través de unas cuantas hileras de tubos, creando vibración. Esto puede aliviarse un poco quitando una parte de los tubos en el área, para mejorar la penetración del vapor. sin embargo, el funcionamiento a largo tiempo no sería adecuado, ya que se tendría como resultado el tener que cambiar los tubos o el condensador.

4.7.3. Falla Mecánica de los interiores

Las fallas mecánicas en los evaporadores comúnmente ocurren en

las licoreras de calentamiento interno. Normalmente estas fallas resultan de un diseño inadecuado de la placas planas de la licorera o en los tornillos. Las fallas en la licorera dan como resultado goteo interno, que sobrecarga a las bombas que trasladan el licor, causando inundación del vapor y pérdida en la transferencia de calor.

El flujo en las licoreras varía constantemente, creando curvas del lado plano y en las placas de la licorera.

Los tornillos de la licorera que son demasiado pequeños o que están demasiado espaciados causan fallas en las juntas.

También es común la falla de los soportes del deflector. Cuando los deflectores se atornillan a los soportes, la vibración puede causar que las tuercas se caigan o que los tornillos se cizallen, y el deflector se desprenda de sus soportes.

Ocasionalmente, la placa contra choque a la entrada del vapor puede aflojarse y desprenderse. Esto puede causar la falla de los tubos. (10)

4.8. CORROSION EN CALDERAS

4.8.1. Posibilidades de Corrosión en el Funcionamiento de Calderas de Vapor

La corrosión en el funcionamiento de las calderas de vapor se presenta en:

1. Tuberías de agua bruta.
2. Tuberías de agua condensada.
3. Tuberías de agua para intercambio de bases.
4. Tuberías de agua preparada químicamente.

5. Bombas.
6. Desgasificadores mecánicos o químicos.
7. Tuberías de alimentación.
8. Accesorios, especialmente en válvulas de purga.
9. Economizadores.
10. Precalentadores de aire.
11. Calderas, transformadores y evaporadores, tubos de ebullición, tambores de calderas, bases de calderas, etc.
12. Sobrecalentadores de vapor.
13. Tuberías de vapor saturado y vapor sobrecalentado.
14. Partes de la instalación que funcionan con el vapor, como las propias máquinas de vapor, turbinas, condensadores, etc.
15. Hogares y chimeneas.
16. Partes externas de la instalación, expuestas al aire o enterradas.
17. Tuberías de gas protector.

Hay que distinguir entre la corrosión por el lado del agua y el vapor y corrosión por el lado de los humos. La corrosión por el agua y el vapor tiene, más o menos, las siguientes causas:

1. Aguas acidificadas por ácido húmico u otros ácidos orgánicos, tales como productos de descomposición de los hidratos de carbono, ácidos minerales como el sulfúrico, por ejemplo; particularmente en yacimientos de lignito, formado por oxidación de las piritas con el oxígeno del aire, o procedente de las aguas residuales de instalaciones de decapado, etc.

2. Gases disueltos en el agua, especialmente el oxígeno, pero también el ácido carbónico, de los que el último podría incluirse

en el punto 1. En estos últimos casos la corrosión puede producirse durante el funcionamiento, pero en la mayoría de los casos ocurre en los períodos de reposo, en los que el oxígeno que penetra se disuelve en las aguas condensadas que se enfrían, en restos de agua, en la condensada rezumada sobre las válvulas de seguridad, etc., y luego produce la citada corrosión durante el no funcionamiento de calderas y turbinas.

3. Aguas fosfatadas demasiado alcalinas que pueden atacar, por ejemplo; a las aleaciones de cobre que contienen cinc, particularmente en las bombas, por lo que es conveniente la sustitución por bronce fosforoso o aceros al cromo o al cromo-níquel. Además, tales aguas alcalinas pueden provocar la fragilidad cáustica bajo tensiones.

4. Aguas demasiado salinas en el caso de uniones de metales diferentes, que pueden provocar corrosión galvánica por contacto.

5. Elevado contenido de cloruros o nitratos en el agua de alimentación, especialmente como cloruro de magnesio.

6. Existencia de corrientes vagabundas, que en parte pueden presentarse en las máquinas, pero generalmente existen en el suelo y pueden provocar perforaciones totalmente localizadas aun en las tuberías más gruesas.

7. Formación de pilas locales por la presencia de orín y de oxígeno.

8. Formación de depósitos gruesos por endurecedores, silicatos y aceite en calderas, tuberías, tubos de llama y tambores, con el consiguiente sobrecalentamiento local, descomposición del cloruro de magnesio y del vapor, y en ciertas circunstancias tal

calentamiento de los tubos que puede producir el agrietamiento.

9. Flujo de calor, por ejemplo., en órganos de cierre no aislados y en cubiertas de las tuberías de agua caliente y vapor.

10. Presencia de determinados catalizadores, como las sales de cobre y manganeso, y otros orgánicos, como el ácido húmico.

11. Depositiones de cobre y presentación de la fragilidad de las soldaduras a base de cobre.

12. Proyección de agua y vapor. El agua y el vapor que forman torbellinos por excesiva velocidad de corriente y producen choques de gotas que originan corrosión por erosión (cavitación).

13. Existencia de grietas finas, mal trabajo del material, etc.

14. Solicitaciones mecánicas alternativas continuas y corrosión simultánea, especialmente para valores bajos de pH, y por ello presencia de rupturas debidas a la fatiga con corrosión trans o intercrystalina, por ejemplo; en tubos de ebullición y álabes de turbinas.

15. Existencia de tensiones internas en el material por haberse elaborado mal o apareciendo durante el funcionamiento por desigualdades en la distribución de las cargas térmicas, con lo que se da lugar a la corrosión bajo tensiones y la fragilidad cáustica.

16. Presencia de sulfuro de hidrógeno en el vapor, la mayoría de las veces formado por emplear en la alimentación aguas que contienen sulfitos. Acarrea la corrosión en las turbinas cuando el material de los álabes es un acero al níquel, y en la mayoría de los casos en la etapa en que el vapor sobrecalentado se convierte en vapor saturado.

17. Presencia de amoníaco en el vapor y presencia simultánea de pequeñas cantidades de oxígeno, con lo que peligran las aleaciones de cobre, especialmente los latones ordinarios en turbinas y condensadores. Debe pensarse en que el amoníaco, en forma de sales amónicas, es muy fácil que se encuentre en el agua de los ríos y también en el agua de alimentación después de la preparación. La alcalinidad originada en la caldera puede liberarlo y por ello pasar al vapor. Es cierto que a veces se añade amoníaco como medio protector en el circuito de circulación de las aguas de caldera, pero cuando hay posibilidad de contacto con aleaciones de cobre se debe evitar.

18. Descomposición del vapor, originada por el desdoblamiento térmico en hidrógeno y oxígeno como consecuencia de la suciedad de las calderas o de la insuficiente velocidad de paso por los sobrecalentadores.

19. Existencia de lodos en los llamados ángulos muertos y presencia simultánea de mínimas cantidades de oxígeno.

20. Procesos biológicos. También pueden causar perturbaciones; las llamadas bacterias del hierro y las algas producen corrosión.

Los humos pueden producir corrosión que, en su mayor parte, se debe a las siguientes causas:

1. Temperatura demasiado baja en la entrada del agua en la alimentación o en los economizadores, lo que puede hacer que no se llegue al punto de rocío.

2. Carbones muy húmedos y con mucho azufre y consiguiente elevación del punto de rocío.

3. Carbones con mucho azufre y a la vez mucho óxido de hierro,

con lo que se cataliza la formación de SO₃ a partir del SO₂ y se eleva mucho el punto de rocío de los gases.

4. Carbones con muchos cloruros.

Debemos recordar también la condensación del agua sobre las tuberías que conducen agua fría que se produce en los locales calientes saturados de vapor de agua y que da lugar a una corrosión muy fuerte si no se toman precauciones adecuadas (pinturas, etc.). (11)

4.8.2. Detección de Corrosión Interna, Ataque por Hidrógeno en Paredes de Agua

Durante el proceso de operación de una caldera, desafortunadamente pueden existir circunstancias que propician que se presente ataque por hidrógeno, éstas son:

a) La operación de una caldera con un bajo valor de pH en el agua del ciclo, resultante del ingreso de sustancias contaminantes ácidas, generalmente debido a fallas en tubos de condensador.

b) Contaminación por lavados químicos inadecuados.

c) Mal funcionamiento de los subsistemas de control químico del agua de caldera.

La concentración de impurezas en el agua de caldera y condiciones anormales de temperatura eventualmente conducen a un rompimiento de la capa protectora de magnetita (Fe_3O_4) de los tubos, volviéndola porosa; esto da lugar a corrosión acelerada.

A continuación se ofrece una breve explicación del mecanismo de ataque. Parte del hidrógeno generado en la formación de la magnetita se disocia en forma atómica y se difunde al interior del

metal, quedando atrapado en fronteras de grano, inclusiones, microcavidades y otras imperfecciones en la red. El hidrógeno reacciona con el carbón de la aleación, causando descarbonización interna para formar burbujas de metano (CH₄) de acuerdo con:



Diagrama de un generador de vapor, indicando zonas donde hay mayor incidencia de ataques por hidrógeno

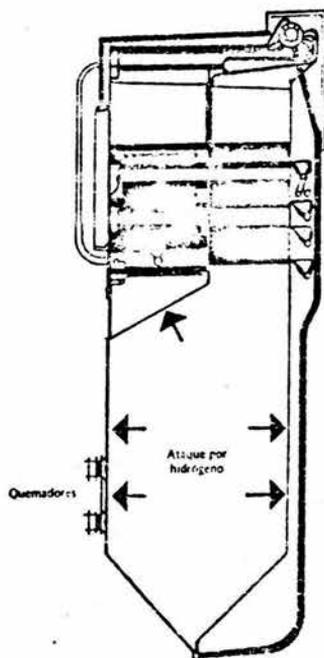


Figura 4.11.

La molécula de metano no puede difundir en la red cristalina.

Este hecho incrementa la presión interna y propicia la formación de microfisuras que da como resultado un fuerte debilitamiento de las paredes del tubo provocando la falla, cuya apariencia es una ventana abierta con labios (bordes) de fractura gruesos.

En una caldera, los lugares más comunes donde puede presentarse este tipo de ataque son:

- a) Las zonas expuestas a alto flujo térmico.
- b) Las tuberías horizontales o inclinadas.
- c) Las soldaduras que tengan protuberancias internas considerables, ya que éstas provocan perturbaciones en el flujo de agua.

En la figura 4.11 se muestra un corte longitudinal de un generador de vapor, donde se indican las zonas en las que preferencialmente se presenta ataque. (12)

4.9. CORROSION EN HORNOS

4.9.1. Evaluación del Daño Térmico en los Tubos

El sobrecalentamiento es la causa principal de falla de los tubos calentadores de proceso en las refinerías y plantas petroquímicas. El diseño del tubo siempre se basa en una vida de 100,000 h, pero comúnmente dan un servicio confiable de 20 años o más si no son sobrecalentados. La corrosión acelerada y la reducción de fuerza son las principales consecuencias del sobrecalentamiento que pueden conducir a la falla.

El choque de la flama debido a que los quemadores se ajustaron inadecuadamente puede sobrecalentar áreas localizadas de los tubos calentadores. El coque tiende a depositarse en la superficie

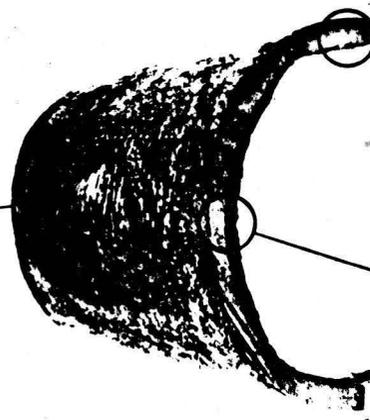
interna de los tubos en la región sobrecalentada, como se muestra en la figura 4.12, debido a la descomposición del fluido hidrocarbonado que fluye a través del tubo. La capa del coque aísla la pared del tubo del efecto de enfriamiento del fluido interno que causa que la temperatura se incremente más en la zona localizada. Los cambios en la microestructura del metal del tubo dan testimonio de una temperatura mayor. La microestructura original del acero 7Cr-1/2Mo recocido consiste de una relativa dispersión fina de las partículas de carburo-cromo en los granos ferríticos, y el resto permanece sin cambios en la superficie del tubo donde no hay depósito de coque. En contraste, las temperaturas considerablemente más elevadas en la parte de los tubos que da a la flama, donde hay un depósito delgado de coque, causan aglomeración del carburo-cromo en partículas gruesas. Alguna alteración de la microestructura casi siempre va acompañada de sobrecalentamiento suficiente para dañar a los tubos calentadores.

4.9.2 Corrosión Interna

La corrosión interna acelerada es la consecuencia más dañina del sobrecalentamiento. Los aceites crudos siempre contienen azufre como contaminante en concentración superior al 3%. Si el azufre se encuentra en compuestos hidrocarbonados inestables, como mercaptanos, puede ser muy corrosivo a los tubos calentadores a temperaturas más altas. Las aleaciones acero-cromo forman una capa protectora que da resistencia al ataque destructivo del azufre a temperaturas altas. Se requiere como mínimo 5% de cromo para



(a) Tubos Calentadores y Flama



(b) Sección Transversal del Tanque



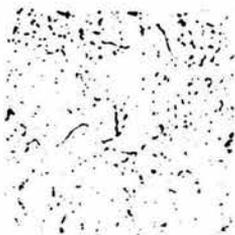
(c) Microestructura
300X

Fig. 4.12. Sobrecalentamiento de un tubo calentador de acero
7Cr-1/2 Mo

recubrir al acero al carbón, y en los calentadores de proceso de las refinerías comúnmente se emplean tubos de acero 5Cr-1/2Mo, 7Cr-1/2Mo, o 9Cr-1Mo para temperaturas arriba de 650°C (1200°F). Sin embargo, el sobrecalentamiento puede incrementar enormemente la corrosión y causar fallas en los tubos. La capa de coque da algo de protección contra el fluido hidrocarbonado, pero el coque contiene un porcentaje relativamente alto de azufre que puede iniciar el ataque corrosivo de los tubos en las áreas sobrecalentadas. Además, la capa de coque generalmente pierde su habilidad para proteger a los tubos en las áreas sobrecalentadas debido al desprendimiento térmico-mecánico, especialmente después de que un severo ataque de corrosión ha comenzado.

La figura 4.13 ilustra un tubo calentador de acero 5Cr-1/2Mo que falló por un ataque severo de corrosión interna con azufre. Más de la mitad del espesor original de la pared fue consumido por la corrosión del lado del fuego del tubo cerca de la falla. La diferente microestructura cerca de la falla verifica que la corrosión severa fue atribuible al sobrecalentamiento. Hay una fase de transformación de los originales granos ferríticos a martensita, en suma a la aglomeración de las partículas de cromo-carbón, indicando que la temperatura excedió 785°C (1450°F) en una área localizada. El ataque externo de oxidación fue algo más severo en el área sobrecalentada, pero esto solo fue una contribución secundaria a la falla. En comparación a la sección transversal de la pared del tubo donde hubo sobrecalentamiento a la sección transversal donde se mantuvieron temperaturas normales de operación se muestra claramente el efecto destructivo que puede

Microestructura
900X



Secciones
Transversales
25X



OD

ID



(a) Sobrecalentada

(b) Normal

Figura 4.19. Sulfuración interna de un tubo calentador de acero
5Cr-1/2Mo.

tenerse con un sobrecalentamiento. Virtualmente no hay un ataque interno o externo del lado de la pared del tubo donde no hay sobrecalentamiento. Los inspectores de refineries revisan el espesor de las paredes de los tubos calentadores con instrumento medidor de espesores ultrasónico durante los períodos de mantenimiento. Este procedimiento detectará la pérdida general uniforme de espesor debida a la corrosión, pero no puede dependerse de él para localizar la corrosión severa relacionada a localizar el sobrecalentamiento.

4.9.3. Corrosión Externa

Un ataque severo de oxidación externa relativo al sobrecalentamiento puede ser la causa principal de la falla de un tubo calentador como es evidente en la figura 4.14. La oxidación siempre va acompañada de algo de descarburación. Sin embargo, es más común que el ataque de azufre interno predomine a menos que hidrocarburos con bajo contenido de azufre sean procesados o el azufre se encuentre en compuestos térmicamente estables. La falla del tubo debida a la oxidación externa se distingue siempre por la formación de una capa de óxido pronunciada en la vecindad de la falla.

4.9.4. Reducción de la Fuerza

El incremento de la temperatura reduce la fuerza de los metales. Consecuentemente, el sobrecalentamiento puede causar que los tubos fallen en la ausencia de una corrosión severa interna o externa. La figura 4.15 representa un tubo calentador de acero

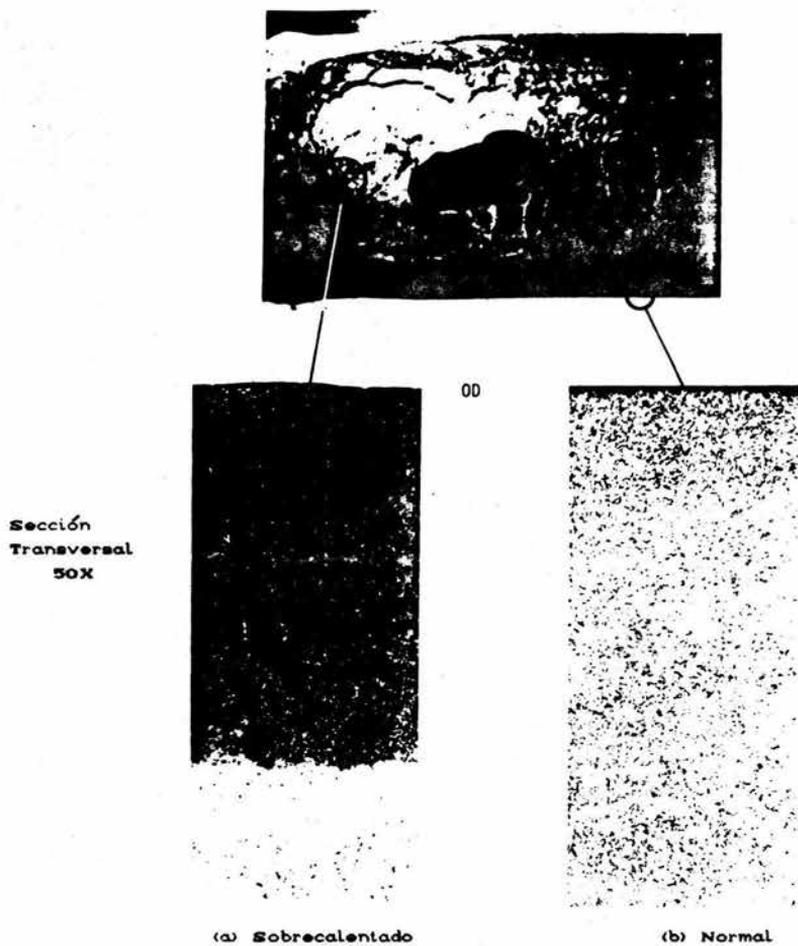


Figura 4.14. Corrosión externa de un tubo calentador de acero 5Cr-1/2 Mo.

Microestructuras
250X



Sección
Transversal
20X



(a) Normal



(b) Sobrecalentado

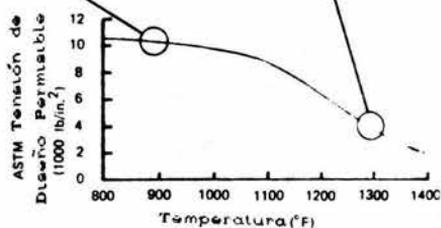


Figura 4.15. Tubo calentador de acero inoxidable Tipo 321 sobrecalentado

inoxidable Tipo 321 que muestra una pronunciada disminución de la pared del lado que da a la flama. No hubo un significativo ataque de corrosión, pero la microestructura revela una considerable deformación plástica de los granos austeníticos donde se redujo el espesor de la pared. Este tubo fue diseñado para operar a 480°C

(900°F). Se conservó una adecuada resistencia a la corrosión en la región sobrecalentada, pero la resistencia del Tipo 321 decreció marcadamente a temperaturas por encima de 565°C (1050°F). Por consiguiente, la resistencia del tubo fue insuficiente cuando se sobrecalentó para contener el fluido hidrocarburo bajo presión, y ocurrió una falla. Este tipo de falla normalmente está precedido por un pandeo pronunciado. Los inspectores de refinerías algunas veces pueden detectar el impulso inicial de los pandeos con una mirada cercana paralela al eje de los tubos combinada con la medida del diámetro. Sin embargo, los pandeos relacionados a localizar el sobrecalentamiento pueden ser difícil de ver mientras sean pequeños, y crecen demasiado rápido para fallar en la inspección de rutina durante los períodos de mantenimiento para prevenir de forma efectiva todas las fallas asociadas con el sobrecalentamiento. (13)

4.10. CORROSION EN TORRES DE ENFRIAMIENTO

Los problemas de corrosión en los sistemas de enfriamiento se deben a los sólidos disueltos, oxígeno disuelto, contaminantes, la ineffectividad de los inhibidores de corrosión o un control pobre de pH. Sin embargo, con frecuencia hay una corrosión rápida y severa que no puede detenerse, aún cuando se empleen inhibidores. Dicha corrosión es causada por organismos microbiológicos.

Los organismos que se encuentran en los sistemas de enfriamiento caen dentro de tres grandes grupos: hongos, algas, y bacterias.

Hongos

En los sistemas de enfriamiento, los hongos dan como resultado el fango y el deterioro de la madera. El crecimiento de hongos ocurre en la madera de las torres de enfriamiento.

Una especie de penicilares (un moho) causa decaimiento en la madera en las torres de enfriamiento. En la madera deteriorada, la celulosa en la madera es consumida por organismos hasta que pierde su fuerza.

El deterioro de la madera no se ve fácilmente. Puede podrirse profundamente (figura 4.16), en la cual la superficie de la madera parece no estar afectada mientras que en el interior tiene poca o nada de fuerza. Sin embargo, el decaimiento se ve fácilmente, y la madera suave puede romperse.



Figura 4.16. Superficie de madera afectada por hongos causando pudrición profunda

Algas

Comúnmente las algas causan depósitos de fango en las torres de enfriamiento donde la luz del sol y el agua están presentes. Los depósitos de algas muertas proveen de alimento a las bacterias y hongos, actúan como filtro para atrapar otros organismos. No se sabe que las algas causen corrosión directamente, excepto que de vez en cuando ocurre bajo sus depósitos.

Bacterias

Algunas clases de bacterias causan fango, corrosión, producción de gas y decaimiento de la madera.

El grupo de Thiobacillus, convierten los compuestos de azufre solubles en ácido sulfúrico. El sulfuro de hidrógeno puede ser la fuente de azufre empleada para producir las condiciones ácidas.



Figura 4.17. Ataque de sulfuro en acero templado producido por bacterias, a pesar de los inhibidores de corrosión

La figura 4.17 muestra el típico ataque de sulfuro en acero templado producido por bacterias en una torre de enfriamiento bien tratada (desde el punto de vista de inhibidores de corrosión). El

ataque fue severo a pesar de haber empleado un nivel alto de base de cromato inhibidor de corrosión (20 a 25 ppm de cromato) y un buen control de pH (6.5 a 7.5). La cloración periódica no empleaba otros tóxicos. La producción bacteriana de sulfuro causaba hoyos, y daba como resultado fallas en el equipo en un periodo de 60 a 70 días. (14)

4.11. CORROSION EN RECIPIENTES A PRESION Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO

4.11.1. Las Causas Básicas que Provocan Accidentes en los Recipientes a Presión

Dos recipientes nuevos contruidos para presiones y temperaturas iguales y para el mismo tipo de servicio pueden viajar de forma diferente a lugares distintos. En una planta, el mantenimiento mantendrá al recipiente en forma adecuada por medio de una lista sistemática de inspección y mantenimiento. En otra planta, un igual número de personal que con ignorancia, incompetencia o negligencia pueden producir la falla del recipiente en un tiempo comparativamente corto. Obviamente el personal competente es un factor clave en la longevidad y seguridad del recipiente a presión.

4.11.1.1. Fallas por Corrosión

La mayoría de los recipientes a presión están sujetos al deterioro por corrosión o erosión o ambas. El efecto de corrosión puede picar o crear ranuras sobre extensas áreas o localizadas. La corrosión sobre grandes áreas puede producir una reducción general

del espesor de la placa.

Algunas de las muchas causas de corrosión son inherentes en el proceso que está siendo empleado, pero otras son preventivas. Los recipientes que contienen sustancias corrosivas, por ejemplo, se deterioran más rápidamente si el contenido se conserva en movimiento por agitación o por la circulación de vapor o aire. Si la corrosión es local, no parecerá seria al principio; sin embargo, como el espesor del metal se reduce, el metal se vuelve más tensionado aún bajo presiones normales. Entre más tensión, el metal se corroe más rápidamente, alcanzando en última instancia el punto de ruptura repentina. La corrosión en el metal no tensionado es probablemente menor para causar tal falla repentinamente.

4.11.1.2. Fallas por Tensión

Muchos materiales no son del todo adecuados para los servicios en los que se requieren. Otros materiales son servibles en una condición donde no hay tensiones pero fallarán rápidamente en una condición tensionante. Para dar un ejemplo, una gran compañía química una vez que empleo botones de acero inoxidable para medir la corrosión en un recipiente de acero forjado. Cuando el recipiente de acero forjado tuvo que ser reemplazado, ordenaron un recipiente nuevo hecho del mismo acero inoxidable empleado para los botones por su probada resistencia. Sin embargo, después de unos cuantos días de servicio, el operador notó goteo a través de una coraza de 1 plg, inmediatamente redujo la presión, y cerro el recipiente. El exámen mostró que había muchas grietas en el acero inoxidable. La sustancia que estaba siendo procesada era altamente

corrosiva a los granos del metal cuando se encontraba bajo presión. Este hecho se verificó cuando el metal se evaluó en ambas condiciones bajo tensión y sin tensión en la misma solución. Las piezas tensionadas fallaron en un lapso de 100 h.

Cuando los metales se someten a repentinos esfuerzos excediendo sus límites, en última instancia fallarán por "fatiga". Toma miles de aplicaciones de esfuerzos para producir una falla, pero un recipiente como un tanque de aire en el cual hay rápidas fluctuaciones de presión pueden fallar en las juntas.

Los excesivos esfuerzos que pueden desarrollarse en recipientes que no son libres de expandirse y contraerse con los cambios de temperatura. Si se permite que estos esfuerzos ocurran frecuentemente se puede esperar que ocurra una falla por fatiga.

4.11.1.3. Otras Fallas

Con frecuencia los recipientes se instalan en posiciones que previenen la entrada a través de las aberturas de inspección para examinar las superficies internas. Cualquier propietario o usuario de un recipiente que esté interesado en su condición actual nunca debería dejar que esto suceda.

Si un recipiente se soporta en asientos de concreto, la diferencia en los coeficientes de expansión del concreto y el acero algunas veces causará que el concreto se fracture justamente abajo del tanque, permitiendo acumulaciones de humedad y polvo que causarán corrosión.

Las válvulas de seguridad o los mecanismos que atorán o de otra manera provocan la inoperación puede llevar a accidentes. Las

válvulas de seguridad fuertemente ajustadas para una presión permitida puede provocar que el recipiente falle si ocurre una sobrepresión.

El material defectuoso no visible a la hora de fabricación- tal como una junta pobremente ajustada o una soldadura mal hecha que puede parecer satisfactoria en la superficie pero sufre de falta de penetración, escoria, porosidad excesiva, o falta de ductibilidad también puede causar serios problemas. (15)

4.11.2. Corrosión en Tanques de Almacenamiento Subterráneos

Los problemas asociados con los sistemas de almacenamiento subterráneo son los goteos que resultan caros y peligrosos. El goteo de materiales volátiles e inflamables puede dar como consecuencia un incendio o una explosión peligrosa, puede contaminar el producto cercano a él o el agua de las líneas de tubería, y puede contaminar el suelo.

La corrosión es una de las causas de este goteo, resulta de la interacción entre el tanque y la tubería y sus alrededores, tanto interno como externo. El deterioro de los plásticos y otros materiales no metálicos, son susceptibles a ablandarse, fracturarse, hincharse, etc., es esencialmente su naturaleza química. La corrosión de los componentes no metálicos de los sistemas de almacenamiento pueden controlarse y eliminarse a través de la selección adecuada y cuidadosa de los materiales de construcción del tanque y la tubería.

Los mecanismos de corrosión son la corrosión electrolítica y la galvánica.

El deterioro del tanque o la tubería puede ocurrir en forma general o localizada. Los tipos de corrosión localizada pueden ser: corrosión por picadura, fractura por corrosión bajo tensión, corrosión por agrietamiento y corrosión intergranular.

4.11.2.1. Factores que influyen en la corrosión

Los numerosos factores que pueden influir en la presencia y en los porcentajes de corrosión tanto interna como externa en los tanques de almacenamiento colocados al exterior del suelo y subterráneos se listan a continuación:

Acidez electrolítica. La acidez del suelo con la que el material está en contacto puede tener un efecto substancial en la corrosión. Los suelos son ácidos, (bajo pH), como regla general, más corrosivo que el neutro (pH 7) o el alcalino (suelos de pH alto) en el caso del hierro y acero. Sin embargo, para los metales anfotéricos, como el aluminio y el zinc, los suelos altamente alcalinos pueden ser más corrosivos que los suelos ácidos.

Temperatura. El porcentaje de corrosión tiende a incrementarse conforme se eleva la temperatura.

Películas superficiales. Una vez que la corrosión ha comenzado, su progreso con frecuencia se controla por la naturaleza de la película que forma en el metal corroído. Algunos productos corrosivos pueden ser insolubles y completamente impermeables a la solución corrosiva, y por lo tanto, completamente protectores; o

pueden ser muy permeables y entonces permiten la corrosión localizada o general. En suma, las películas discontinuas o no uniformes inducen a la corrosión localizada en áreas particulares.

Acción Bacteriana. La actividad metabólica de ciertos microorganismos pueden directa o indirectamente afectar la corrosión de los metales. Tal actividad puede:

- * Producir un ambiente corrosivo.
- * Crear celdas de concentración electrolítica, llevando a la corrosión por hendiduras.
- * Alterar la resistencia de las películas superficiales.
- * Alterar la composición del ambiente metálico.
- * Influir en la rapidez de la reacción anódica o catódica.

Resistividad del Suelo. La resistividad del suelo es una medida de la resistencia del suelo al flujo de la corriente eléctrica, y es un factor muy importante en la determinación del potencial de la rapidez de corrosión de los tanques subterráneos. Entre más baja sea la resistividad del suelo, más grande es la probabilidad de corrosión.

Nivel de Humedad. La presencia del agua también puede promover la corrosión de los metales. La presencia de humedad en los suelos reduce la resistividad del suelo, por lo tanto se incrementa la velocidad de corrosión. La acumulación de agua del lado de los tanques es la causa principal de la corrosión interna.

Variaciones de Suelos. La corrosión de los tanques subterráneos puede ser influenciada por variaciones en las condiciones del suelo a lo largo de las superficies de los tanques.

Estructuras Metálicas Subterráneas Adyacentes. La corrosión de los tanques subterráneos también resulta en el caso de que nuevas estructuras que se instalen cerca de otros tanques o de otras estructuras metálicas subterráneas. Porque las estructuras viejas pueden estar oxidadas o pueden convertirse en un cátodo en relación al tanque nuevo, acelerando la corrosión en las estructuras nuevas.

Desvío de Corrientes Eléctricas. El desvío de corrientes subterráneas de fuentes cercanas que empleen corriente directa, como vías electrificadas, o sistemas de tránsito, fábricas, o tiendas, puede inducir la corrosión electrolítica en tanques subterráneos.

A continuación se ilustran en las figuras 4.18 a 4.21 los mecanismos de corrosión en tanques subterráneos. (16)



Figura 4.18. Actividad Bacteriana. La actividad metabólica de ciertos microorganismos puede crear ambientes corrosivos alrededor de una estructura subterránea



Figura 4.19. Humedad. La presencia de humedad puede causar diferencias en el potencial eléctrico lo que da como resultado la corrosión



Figura 4.20. Suelos Distintos. Las variaciones en el tipo de suelo o sus propiedades tales como acidez o resistividad puede llevar a la corrosión de una estructura de acero subterránea

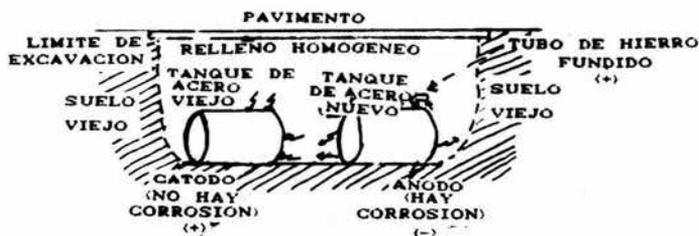


Figura 4.21. Metales Distintos. La exposición de metales distintos, como una conexión de un tanque con un tubo metálico de diferentes propiedades, o el entierro de un tanque nuevo cerca de un tanque viejo, puede llevar a la corrosión

4.12. BIBLIOGRAFIA

- (1) Tódt, Fritz, Corrosión y Protección, Ed. Aguilar, Madrid (1959).
- (2) Peabody, A.W., Control of Pipeline Corrosion National Association of Corrosion Engineers, Houston, Texas (1967).
- (3) Robinson, T.L., Equipment/Materials-6 Thermoplastic Valves are more Economical than Metal Ones, Chem. Eng. Progress; p.62. January (1983).
- (4) Warring, R.H., Handbook of Valves, Piping and Pipelines, Gulf Publishing Company, Texas (1982).
- (5) Yedidiah S., Centrifugal Pump Problems. Causes and Cures, Petroleum Publishing Company, Tulsa, Oklahoma (1980).
- (6) McKetta, John J., Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Vol.5, Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y. pp. 23-39, (1979).
- (7) McKetta, John J., op. cit. Vol. 10, pp.366-407.
- (8) Maloney, G.F., Selecting and Using Pressure Leaf Filters, Chem. Eng., Vol.79. No.11., May 15, p. 88. (1972).
- (9) Yokell, Stanley, Troubleshooting Shell-and-Tube Heat Exchangers, Chem. Eng., Vol.90. No.15., July 25, p. 57. (1983).
- (10) McKetta, John J., op. cit. Vol.20. pp.387-405.
- (11) Tódt, Fritz, op. cit.
- (12) Chacón, José G., Calva, Mauricio y otros., Detección y Monitoreo de Corrosión por Medio de Ultrasonido en Generadores de Vapor, Boletín iie, Noviembre/Diciembre de (1987).

- (13) McKetta John J., op. cit., Vol.24. pp.70-77.
- (14) Puckorius, Paul R., Controlling Corrosive Microorganisms in Cooling-Water Systems, Chem. Eng., Vol.85. No.23. October 23, p. 171. (1978).
- (15) Chuse, Robert, Pressure Vessels. The ASME Code Simplified, Fifth Edition, McGraw-Hill Company, USA (1977).
- (16) Woods, Paul H, Jr and Webster Dale E., Underground Storage Tanks: Problems, Technology, and Trends, Pollution Engineering, July (1984).

v

METODOS DE PREVENCIÓN Y ELIMINACIÓN DE LA CORROSIÓN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

5.1. SELECCION DE MATERIALES:

5.1.1. Metales y Aleaciones.

El método más común para prevenir la corrosión es la selección del metal o la aleación apropiada para el servicio corrosivo en que este va a operar. Uno de los conceptos que no está relacionado con la metalurgia o la ingeniería de la corrosión, se refiere al uso y las características del acero inoxidable. El acero inoxidable no es propiamente inoxidable, no es el material más resistente a la corrosión y no es tampoco una aleación específica. El acero inoxidable es un nombre genérico que se dá a una serie de más de 30 aleaciones diferentes, que contienen de 11.5 a 30% de cromo y de 0 a 22% de níquel junto con otros elementos aleantes. Los aceros inoxidables tienen un rango amplio de aplicaciones en las que se requiere resistencia a la corrosión, pero debe recordarse que no son resistentes a todos los agentes corrosivos que existen. De hecho, bajo ciertas condiciones, como medios que contienen cloruros o están expuestos a esfuerzos estructurales, los aceros inoxidables son menos resistentes que el acero estructural común. También son más susceptibles a la corrosión localizada, como la corrosión intergranular, la fractura por corrosión bajo tensión y la picadura, que el acero estructural común. En suma, un gran número de fallas por corrosión pueden atribuirse directamente a la selección indiscriminada, de aceros inoxidables para construcción, basada en la creencia de que son "los mejores materiales que existen". Los aceros inoxidables representan una clase de materiales altamente resistentes a la corrosión que tienen un costo relativamente bajo, pero que deben

utilizarse cuidadosamente.

En la selección de aleaciones, existen varias combinaciones "naturales" de metales y agentes corrosivos. Estas combinaciones de metal y agente corrosivo representan, por lo regular, la máxima cantidad de resistencia a la corrosión a precio bajo. Algunas de estas combinaciones naturales son las siguientes:

1. Acero inoxidable-ácido nítrico.
2. Níquel y aleaciones de níquel-caústicos.
3. Monel-ácido fluorhídrico.
4. Hastelloys (Chlorimets)-ácido clorhídrico caliente.
5. Plomo-ácido sulfúrico diluído.
6. Aluminio-exposición atmosférica.
7. Estaño-agua destilada.
8. Titanio-soluciones altamente oxidantes calientes.
9. Tantalio-utilizado en su última resistencia.
10. Acero-ácido sulfúrico concentrado.

La lista anterior representa sólo la combinación de metal y agente corrosivo. En muchos casos, se pueden conseguir materiales más baratos o más resistentes. Para servicios de ácido nítrico, se consideran primero los aceros inoxidables, ya que tienen una excelente resistencia a este medio en un amplio rango de condiciones. El estaño o los recubrimientos de estaño se seleccionan frecuentemente como material de construcción de recipientes o tuberías que estarán en contacto con agua destilada. Por muchos años, el tantalio ha sido considerado como el "último" recurso para medios altamente corrosivos. El tantalio es resistente a la mayoría de los ácidos a todas sus concentraciones

y temperaturas y se usa regularmente bajo condiciones en donde se requieren un mínimo de corrosión, como en implantaciones en el cuerpo humano. Un dato interesante del tantalio es que su resistencia a la corrosión es exactamente paralela a la del vidrio. Tanto el vidrio como el tantalio son virtualmente resistentes a todos los medios, excepto al ácido fluorhídrico y a las soluciones caústicas.

Existen algunas reglas de seguridad que pueden aplicarse a la resistencia de los metales y las aleaciones. Para ambientes reductores o no oxidantes, como los ácidos libres de aire y las soluciones acuosas, se emplean frecuentemente níquel, cobre y sus aleaciones. Para condiciones oxidantes, el titanio y sus aleaciones tienen una resistencia superior.

5.1.2. Purificación de Metales.

La resistencia a la corrosión de un metal puro es, por lo regular, mucho mejor que los que contienen impurezas o pequeñas cantidades de otros elementos. Sin embargo, los metales puros son caros y relativamente blandos y débiles. En general, esta categoría se usa, relativamente, en pocos casos, que son más o menos especiales.

El aluminio es un buen ejemplo, ya que no es caro en su estado puro +99.5%. El material, comercialmente puro, se utiliza para transportar peróxido de hidrógeno, en donde la presencia de otros elementos pueden ocasionar su descomposición debido a efectos catalíticos. En otro caso, puede ocurrir ataque localizado del equipo de aluminio, por la segregación de impurezas de hierro en

la aleación. La reducción máxima del contenido de hierro, durante la producción y el uso, elimina el ataque localizado y permite el desarrollo satisfactorio del equipo, sin costo adicional sobre el material.

Otro ejemplo es el zirconio fundido por arco, que es más resistente a la corrosión que el zirconio fundido por inducción, ya que este último tiene mayor cantidad de impurezas.

5.1.3. Materiales no Metálicos.

Esta categoría involucra a los materiales no metálicos integrales y a los sólidos no metálicos (principalmente autoportables) y también a las hojas revestidas o cubiertas de un espesor apreciable (para diferenciarlas de las pinturas recubrientes). Estas cinco clases generales de materiales no metálicos son (1) Caucho, natural y sintético, (2) plásticos, (3) materiales cerámicos, (4) carbón y grafito y (5) madera. Los cuales se describieron en el Cap. 3, junto con sus propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión.

En general, los cauchos y los plásticos, comparados con los metales y sus aleaciones, son mucho más débiles y blandos, más resistentes a los cloruros y al ácido clorhídrico, menos resistentes al ácido sulfúrico fuerte y a los ácidos oxidantes como el nítrico, menos resistentes a los solventes y tienen, relativamente, menos limitaciones de temperatura (de 170 a 200°F) para la mayoría). Los materiales cerámicos poseen una excelente resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas, pero tienen la desventaja de ser frágiles y de baja resistencia a la tensión.

Los carburos muestran una buena resistencia a la corrosión, junto con buena conductividad térmica y eléctrica, pero son frágiles. La madera es atacada por los ambientes agresivos.

5.2. ALTERACION DEL AMBIENTE:

5.2.1. Cambio del Medio.

La alteración del ambiente es un medio versátil para reducir la corrosión. Los cambios típicos en el medio, que se utilizan con mayor frecuencia son (1) Disminución de la temperatura, (2) disminución de la velocidad, (3) remoción de oxígeno o agentes oxidantes, y (4) cambio de la concentración. En muchos casos, estos cambios pueden reducir significativamente la corrosión, pero deben hacerse con mucha precaución. Los efectos producidos por estos cambios varían dependiendo del sistema al que se apliquen, como se discutió en el Cap. 2.

5.2.2. Disminución de la Temperatura.

Esto origina, por lo regular, una pronunciada disminución en la velocidad de corrosión. Sin embargo, bajo algunas condiciones, los cambios de temperatura tienen poco efecto sobre la velocidad de corrosión (ver Sec. 2.3.3.). En otros casos, el incremento de la temperatura disminuye el ataque. Este fenómeno ocurre con el agua dulce caliente o con el agua salada que es llevada a su punto de ebullición, lo que da como resultado la disminución de la solubilidad del oxígeno en ellas. Por lo tanto, el agua de mar en ebullición es menos corrosiva que el agua de mar caliente (150°F).

5.2.3. Disminución de la Velocidad.

Esto se utiliza frecuentemente como un método práctico para controlar la corrosión. Como se discutió en la Sec.2.3.2., la velocidad generalmente aumenta el ataque corrosivo, aunque existen algunas excepciones importantes. Los metales y las aleaciones pasivadas, como los aceros inoxidable, generalmente tienen una mayor resistencia a los medios fluyente que a las soluciones estancadas. Las altas velocidades deben evitarse, siempre que sea posible, debido a los efectos de erosión-corrosión que originan (Cap. 2).

5.2.4. Remoción de Oxígeno o Agentes Oxidantes.

Esta es una técnica muy antigua de control de corrosión. El agua alimentada a los calentadores era aereada al pasarla a través de una gran masa de pedazos de acero. En la práctica moderna esto se realiza por un tratamiento a vacío, por la esparción de gas inerte o através del uso de expulsores de oxígeno (ver Sec. 5.3.5.). El ácido clorhídrico que ha estado en contacto con acero durante su manufactura o almacenamiento, contienen impurezas de cloruro férrico, que es un agente oxidante. Este ácido impuro, llamado comercialmente ácido muriático, corróe rápidamente a las aleaciones de níquel-molibdeno (Hastalloy B, Chlorimet 2), mientras que estos materiales poseen una excelente resistencia al ácido clorhídrico puro. Sin embargo, aunque la desareación encuentra muchas aplicaciones, no se recomienda para los metales y las aleaciones activo-pasivas. Estos materiales requieren agentes oxidantes para formar y mantener sus películas protectoras y por

lo regular, poseen una pobre resistencia a los ambientes reductores o no oxidantes. Para una discusión adicional sobre los efectos de los oxidantes ver la sección 2.3.1.

5.2.5. Cambio de la Concentración.

Este método y los efectos que tiene sobre la corrosión se describieron en la Sec. 2.3.4. La disminución de la concentración del agente oxidante es, por lo regular, efectiva. En muchos procesos, la presencia de un agente corrosivo es accidental. Por ejemplo, la corrosión originada por el agua de enfriamiento en los reactores nucleares se reduce al eliminar los iones de cloro. Muchos ácidos como el sulfúrico y el fosfórico son casi inertes a concentraciones altas y a altas temperaturas. En estos casos, la corrosión puede reducirse por el aumento de concentración del ácido.

La discusión del control de la corrosión no quedaría completa, si no mencionamos los "dispositivos mágicos" o los "artículos condicionadores del agua" que han sido y continúan siendo vendidos, con el objeto de controlar la corrosión del agua. Estos artículos se promueven en la base de que "detienen la corrosión", "previenen la incrustación", "destruyen las bacterias", "mejoran el sabor y el olor" o "reducen la dureza del agua". En muchos casos, el dispositivo basado en algunos principios pseudocientíficos, es de construcción simple, bastante caro y totalmente inservible. Muchos de ellos consisten sólo de un par de tubos que son idénticos a los que se pueden conseguir en cualquier ferretería. Sorpresivamente, gran cantidad de estos artículos son

instalados cada año en los procesos de ingeniería.

Los dispositivos mágicos no deben confundirse con los ablandadores de agua, los aparatos para tratar el agua y de protección catódica y los sistemas vendidos por marcas de reconocido prestigio. Estos dispositivos están sujetos a las siguientes reglas: (1) Se basan en un nuevo principio cuestionable o "secreto". (2) Las indicaciones son muy extensas (por lo regular para personas no calificadas). (3) Los fabricantes no mencionan ningunas limitaciones -el dispositivo puede trabajar en cualquier tipo de agua y para proteger sistemas de cualquier tamaño. (4) Los dispositivos se venden siempre con una garantía completa. (1)

5.3. INHIBIDORES:

5.3.1. Definición de Inhibidores de la Corrosión.

Un inhibidor es una sustancia que retarda o disminuye una reacción química. Por lo que, un inhibidor de la corrosión, es una sustancia que se adiciona a un ambiente, para disminuir la velocidad de ataque por el ambiente al metal. Los inhibidores se adicionan comúnmente en pequeñas cantidades a los ácidos, agua de enfriamiento, vapor, y otros ambientes, tanto para prevenir problemas de corrosión continuos como intermitentes.

Es difícil incluir el mecanismo, por el cual se lleva a cabo la inhibición, debido a que esta se realiza por uno o más mecanismos. Algunos inhibidores retardan la corrosión por absorción de unas pocas moléculas densas, en una película delgada; otros por la formación de precipitados voluminosos que recubren el metal y lo protegen del ataque. En algunos otros se combinan

la absorción y los productos de corrosión para formar una película pasivante.

Podemos incluir en la definición de estas sustancias, que cuando se adicionan a un ambiente, retardan la corrosión pero no interactúan directamente con la superficie del metal. Este tipo de inhibidores originan condiciones en el ambiente que hacen más favorable la formación de precipitados protectores o la remoción de constituyentes agresivos.

Los inhibidores de la corrosión pueden ser analizados desde cuatro puntos de vista:

1. Por sus efectos en los procesos de corrosión.
2. Por su interacción con diferentes ambientes agresivos.
3. Por sus propiedades inhibidoras.
4. Por sus posibles efectos de inhibición, sobre una operación unitaria.

En nuestro caso enfatizaremos la protección del acero, aunque sabemos que otros materiales, como el aluminio, el cobre, el latón y el zinc pueden ser protegidos con los inhibidores apropiados. En las referencias bibliográficas se dan fuentes de información específica.

5.3.2. Tipos Básicos de Inhibidores y su Forma de Trabajo.

La naturaleza electroquímica de la corrosión se explicó en el segundo capítulo, en este, explicaremos la relación entre los inhibidores de la corrosión y la polarización anódica y catódica.

De los cuatro componentes de una celda de corrosión (ánodo, cátodo, electrolito y conductor electrónico), sólo tres de ellos

pueden ser afectados, para retardar la corrosión, por un inhibidor. Dicho inhibidor, puede causar:

a) Incremento en la polarización del ánodo (inhibición anódica).

b) Incremento en la polarización del cátodo (inhibición catódica), o

c) Incremento en la resistencia eléctrica del circuito, que origina la formación de un depósito denso sobre la superficie del metal.

Sin embargo, la formación de películas muy densas o voluminosas también restringen la difusión de sustancias despolarizantes (como oxígeno disuelto) hacia la superficie del metal, por lo que llegan a tener un doble papel. La resistencia del conductor electrónico, al conectarse al ánodo y al cátodo (por lo regular, esta es la resistencia del metal), es muy baja y no puede ser cambiada por los inhibidores.

Los efectos que tienen los inhibidores sobre una celda de corrosión, se pueden determinar adecuadamente, por la polarización de un metal corroído sumergido en un electrolito apropiado y variando la cantidad de corriente, con ayuda de una fuente externa. En la figura 5.1, se muestra un aparato sencillo de laboratorio que sirve para hacer medidas de polarización. La fuerza que debe ser aplicada para estimular las reacciones anódicas o catódicas, es medida por la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. En el electrodo de referencia no se aplica corriente, por lo que, se usa como un estándar contra el que se mide el potencial del electrodo

de trabajo. Una gráfica de corriente vs potencial en ausencia y presencia de un inhibidor, muestra los efectos que este tiene sobre la polarización característica del acero. En la figura 5.2. se muestran curvas características de polarización.

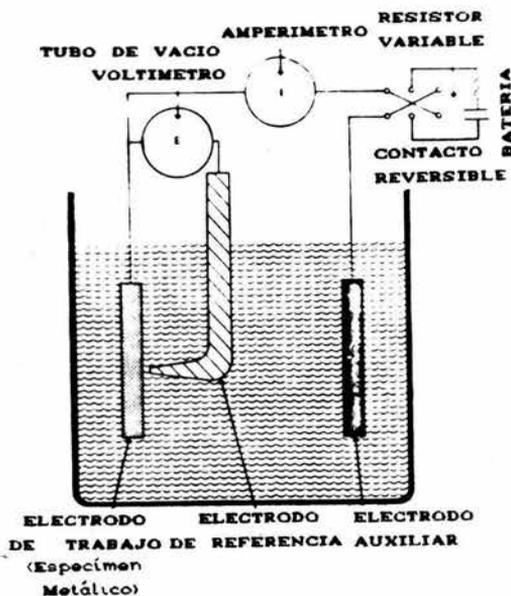


Figura 5.1. Aparato de Laboratorio para medir la polarización.

Cuando no se aplica corriente sobre un electrodo de trabajo, y este se conserva en estado estable, el potencial medido, es el potencial de corrosión E_c , del material de dicho electrodo. El potencial de corrosión es el potencial mezclado al cual los ánodos y cátodos son polarizados por la reacción de corrosión. Y es también, un indicador de los efectos que sobre ella tienen los inhibidores.

5.3.3. Tipos de Inhibidores.

Existen seis clases de inhibidores: (1) pasivantes (anódicos), (2) catódicos, (3) químicos, (4) orgánicos, (5) inductores de la precipitación e (6) inhibidores en fase vapor.

5.3.4. Inhibidores Pasivantes Anódicos.

Los inhibidores anódicos son aquellos que ocasionan un incremento en la polarización (de un pequeño flujo de corriente resulta un gran cambio de potencial), del ánodo cuando se encuentran presentes, como se muestra en la figura 5.3. La adición del inhibidor origina el cambio del potencial de corrosión hacia la dirección catódica, de E_c a E_t .

Los inhibidores anódicos que originan un gran cambio en el potencial de corrosión se llaman inhibidores pasivantes. Algunas

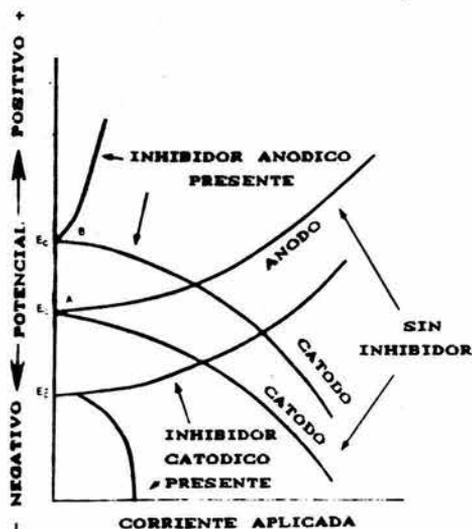


Figura 5.2. Efectos de los inhibidores sobre las curvas de polarización.

veces son llamados también inhibidores peligrosos, debido a que si se usan en concentraciones insuficientes, pueden causar picadura y aumentar a veces la velocidad de corrosión. Existen dos tipos de inhibidores pasivantes: aniones oxidantes como los cromatos, nitritos y nitratos, que pueden pasivar el acero en ausencia de oxígeno; y los iones no oxidantes como los fosfatos, tungstenatos y molibdatos que requieren de la presencia de oxígeno para pasivar el acero. Con un control adecuado se pueden utilizar este tipo de inhibidores, que en cantidad suficiente son muy efectivos.

Los inhibidores pasivantes como el cromato de sodio (Na_2CrO_4) y el nitrito de sodio (NaNO_2) no requieren de oxígeno para ser efectivos, aumentan la velocidad de la pasivación anódica hasta el punto en que los ánodos son polarizados con un potencial pasivo (o Potencial Flade), indicado por E_f en la figura 5.3. El cátodo se

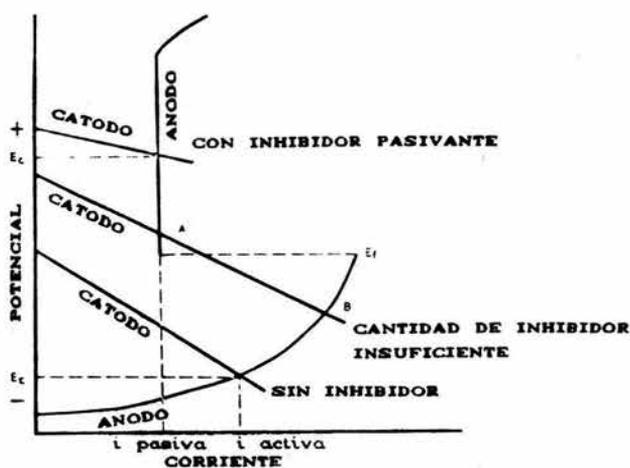


Figura 5.3. Efectos de los inhibidores pasivantes sobre la corrosión del Hierro.

despolarizará, como se indica con las líneas catódicas en la figura 5.3. La curva de despolarización catódica interseca a la curva anódica en la región pasiva a E_c . La adsorción del inhibidor por áreas catódicas también juega una parte importante en el proceso, debido a que esto disminuye la corriente (o la velocidad de corrosión) requerida por el ánodo para alcanzar el potencial crítico pasivo (E_f).

Note que cuando se usa una cantidad insuficiente de inhibidor, la curva catódica intersectará la curva anódica en una región activa o tanto en una región activa como en una pasiva, indicadas por A y B en la figura 5.3. En el primer caso, la corrosión tendrá lugar a una alta velocidad; mientras que en el último, la pasividad será inestable y el potencial de corrosión oscilará entre A y B, dando como resultado la picadura del metal.

La pasivación por inhibidores es más difícil a altas temperaturas, a concentraciones altas de sales, a pH bajo y a concentraciones bajas de oxígeno disuelto.

Mecanismo. El mecanismo por el cual el acero es pasivado por el cromato ha sido estudiado ampliamente y se ha encontrado que esta protección es proporcionada por una combinación de adsorción y la formación de óxido sobre la superficie del metal. La adsorción ayuda a polarizar el ánodo a un potencial que permite la formación de una película finísima de óxido férrico hidratado, que protege al acero. La película de óxido es una mezcla de óxido férrico y de óxido crómico, que se repara por la adsorción y la oxidación de pequeñas cantidades de metal, mientras haya suficiente cromato en

solución.

Este mecanismo propuesto para el cromato, puede aplicarse también a los nitritos y a los nitratos.

Los pasivadores no oxidantes como el benzoato de sodio, el polifosfato y el cianamato de sodio requieren de la presencia de oxígeno para originar la pasivación. Aparentemente funcionan por promoción de la adsorción del oxígeno sobre los ánodos, y es por ello que originan la polarización dentro de la región pasiva. Al igual que los inhibidores oxidantes, son peligrosos cuando se usan en cantidades insuficientes, ya que el oxígeno requerido para la pasivación es un buen despolarizador catódico.

5.3.5. Inhibidores Catódicos.

Los inhibidores catódicos, incrementan la resistencia del circuito y restringen la difusión de especies reducible a los cátodos, tanto bajo la reacción catódica de ellos mismos como cuando precipitan selectivamente sobre las áreas catódicas. Los efectos que tienen sobre la polarización catódica se muestran en la figura 5.2. En este caso, en donde no se afecta la polarización anódica, el potencial de corrosión cambia a valores más negativos de E_c a E_c' .

La reacción catódica es con frecuencia la reducción de los iones de hidrógeno para formar hidrógeno gaseoso. Algunos inhibidores catódicos dificultan la descarga del hidrógeno gaseoso y se dice que aumentan el sobrevoltaje de hidrógeno. Los compuestos de arsénico y antimonio son ejemplos de este tipo de inhibidores, que se utilizan con frecuencia en ácidos o en sistemas en donde no hay oxígeno. Otra posible reacción catódica

es la reducción del oxígeno. Los inhibidores para esta reacción catódica son diferentes a los utilizados en los sistemas ácidos.

Otros inhibidores catódicos utilizan el aumento de alcalinidad en los lugares catódicos para precipitar compuestos insolubles sobre la superficie del metal. La reacción catódica, el ion hidrógeno y/o la reducción de oxígeno, ocasionan que el ambiente adyacente a los cátodos se vuelva alcalino; por lo que los iones como el calcio, el zinc o el magnesio pueden precipitarse como óxidos, que forman una película protectora sobre el metal. Muchas aguas naturales son auto-inhedoras debido a que las sales que se encuentran en ellas, precipitan de forma natural sobre los metales.

La inhibición por polarización de la reacción catódica puede llevarse a cabo de muchas formas. Las tres categorías importantes de inhibidores que afectan la reacción catódica son; los venenos catódicos, los precipitadores catódicos y los expulsores de oxígeno.

5.3.5.1. VENENOS CATÓDICOS.

Los venenos catódicos son sustancias que interfieren con la reacción de reducción catódica, como la formación del hidrógeno atómico y la evolución del hidrógeno gaseoso. La velocidad de la reacción catódica disminuye; y como las reacciones anódicas y catódicas deben llevarse a cabo a la misma velocidad, todos los procesos de corrosión disminuyen.

Mientras que algunos venenos catódicos como los sulfuros y seleniuros son adsorbidos por la superficie metálica, los

compuestos de arsénico, bismuto y antimonio son reducidos en el cátodo, depositándose y formando una película del metal respectivo. Los sulfuros y los seleniuros generalmente no se utilizan como inhibidores, ya que no son muy solubles en las soluciones ácidas. Los arseniatos se usan para inhibir la corrosión en ácidos fuertes, pero en años recientes, se ha optado por utilizar los inhibidores orgánicos en estos medios, debido a la alta toxicidad del arsénico.

Una seria desventaja en el uso de los venenos catódicos, es que en algunas ocasiones suelen originar daño por hidrógeno en el acero y aumentar la susceptibilidad de este, a la fragilización por hidrógeno. Ya que la recombinación de los átomos de oxígeno se inhibe, la concentración superficial de los átomos de hidrógeno aumenta y una mayor fracción del hidrógeno producido, por la reacción de corrosión, es absorbido por el acero. Note que el hidrógeno es absorbido por la superficie, pero parte de este es absorbido por el acero.

Los átomos de hidrógeno que penetran en el acero pueden pasar y difundirse de uno a otro lado si este no es corroído por el hidrógeno producido. Las burbujas se forman cuando los átomos de hidrógeno se combinan para formar hidrógeno molecular (H_2) dentro del acero. El hidrógeno molecular no se difunde a través del acero; por lo tanto se colecta provocando defectos o vacíos que crean presiones que pueden alcanzar un millón de psi o más.

La figura 5.4. muestra el aumento en la fracción de hidrógeno producido que penetra en el acero cuando se incrementa la concentración de sulfuro o arsénico. Se requiere sólo una pequeña

cantidad de sulfuro o arsénico para incrementar la cantidad de hidrógeno que penetre al acero, que se considera por la frecuencia con que se presenta el daño y la fragilización por hidrógeno, en presencia de estos venenos.

Se ha sugerido que la absorción del hidrógeno por el acero, puede ser utilizada en forma ventajosa, en la absorción sellada que se lleva a cabo en las máquinas de refrigeración. La corrosión ocurre muy lentamente en estos sistemas. El uso de un inhibidor, como un compuesto de antimonio, puede ocasionar el paso del hidrógeno a través de una tubería de acero y recipientes sin necesidad de utilizar un sistema de bombeo. En este tipo de aplicaciones, es importante usar un acero que no sea susceptible al daño o a la fragilización por hidrógeno.

5.3.5.2. PRECIPITADORES CATÓDICOS.

El tipo de precipitadores catódicos, más ampliamente utilizado son el carbonato de calcio y de magnesio debido a que ellos se encuentran presentes en las aguas naturales y se usan como inhibidores cuando sólo se requiere ajustar el pH. El sulfato de zinc ($ZnSO_4$) precipita como hidróxido de zinc $Zn(OH)_2$ sobre las áreas catódicas por lo que se considera como un inhibidor de este tipo. Los fosfatos y los silicatos no son inhibidores distintivamente anódicos o catódicos, pero pueden actuar con una combinación de ambos tipos.

Muchas aguas naturales y de suministro municipal contienen carbonato de calcio (cal, $CaCO_3$), en solución. Al disolverse la cal en el agua, se forma el bicarbonato de sodio $[Ca(HCO_3)_2]$ que

es soluble. La cal puede ocasionar, otra vez, la precipitación formando una suspensión lechosa que hace que la solución de bicarbonato de sodio se vuelva más alcalina. Por lo regular, la cal se adiciona tanto para alcalinizar como para originar la precipitación.

El objetivo de los inhibidores de corrosión, en el tratamiento

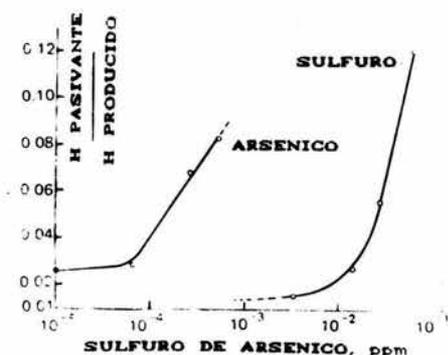


Figura 5.4. Efecto del sulfuro y el arsénico sobre la fracción que entra en el acero, del hidrógeno producto de la corrosión.

de agua, es el de incrementar la alcalinidad del agua a un pH cercano al cual pueda ocurrir la precipitación del CaCO₃. Si se excede el valor del pH apropiado, el CaCO₃ precipita formando un depósito poroso y fangoso que no provee una protección contra la corrosión sino que por el contrario la puede aumentar por que crea celdas de concentración en las que se encuentra presente el oxígeno. Al pH correcto se forma un depósito bastante duro y liso, que es muy similar a la cáscara de huevo. Una vez formado el depósito protector, el pH del agua puede mantenerse a un nivel de equilibrio, debido a que si no se mantiene en estas condiciones se volverá ácido, pudiendo por este motivo redisolverse el depósito.

Una forma conveniente para expresar la condición de un agua con respecto a su tendencia de depositar CaCO_3 es el Índice de Langelier, que es la diferencia entre el pH del agua y el pH requerido para que precipite el CaCO_3 .

Aunque muchos iones metálicos que forman hidróxidos forman iones insolubles, pocos pueden ser utilizados como inhibidores de la corrosión. El sulfato de zinc, que es un buen ejemplo, cuando se adiciona al agua neutra, causa polarización de la reacción catódica por la precipitación del hidróxido de zinc.

5.3.5.3. EXPULSORES DE OXIGENO.

La corrosión del acero en aguas con un pH mayor a 6.0 se debe a la presencia de oxígeno disuelto que despolariza la reacción catódica y aumenta la corrosión. El agua natural con bajo contenido de sal en equilibrio con aire a 21°C (70°F) contendrá cerca de 8 ppm de oxígeno disuelto. La concentración de oxígeno disminuye cuando aumenta la concentración de sal y la temperatura. Sólo se requiere 0.1 ppm de oxígeno disuelto para incrementar en forma apreciable, la velocidad de corrosión de un sistema dinámico. En los sistemas estáticos, se requieren altas concentraciones de oxígeno para que suceda lo anterior, debido a que la reacción de corrosión disminuye rápidamente el suministro de oxígeno en las vecindades del metal.

Los expulsos de oxígeno ayudan a inhibir la corrosión, previniendo la despolarización originada por la presencia de oxígeno. Los expulsos de oxígeno se adicionan al agua, ya sea sólo o con un inhibidor de corrosión, para retardar la

corrosión. Los inhibidores orgánicos, agregados individualmente, en salmueras aireadas disminuyen la corrosión general, pero no siempre previenen el ataque por picadura. Los expulsores de oxígeno más comúnmente utilizados en agua a temperatura ambiente son el sulfato de sodio (Na_2SO_4) y el dióxido de azufre (SO_2). A temperaturas elevadas, se utiliza la hidrazinas para remover el oxígeno.

La velocidad de reacción del sulfato con el oxígeno a temperaturas bajas es pequeña, por lo que, para aumentarla se agrega por lo regular un catalizador. El cobalto, el manganeso y las sales de cobre son los mejores catalizadores, para este propósito. El cobre no debe adicionarse al agua que este en contacto con acero o aluminio, porque en presencia de ellos baja el sobrevoltaje del hidrógeno y aumenta la velocidad de corrosión. Es por esto, que se prefiere el cobalto y el manganeso como segunda opción.

La hidrazina reacciona muy lentamente con el oxígeno que se encuentra en agua a bajas temperaturas, cuando no se encuentra presente un catalizador, es por ello que no se recomienda el uso de esta sustancia a estas temperaturas. Los peligros de la hidrazina son importantes, especialmente cuando es utilizada por personal inexperto. En los calentadores a alta presión, se recomienda utilizar la hidrazina como expulsor de oxígeno.

5.3.6. Inhibidores Ohmicos.

Los inhibidores que aumentan la resistencia óhmica del circuito electrolítico han sido considerados en la discusión de los

inhibidores anódicos y catódicos que forman películas protectoras. Ya que es impráctico para incrementar la resistencia del volúmen del electrolito, se necesita de la formación de una película para incrementar dicha resistencia, que tenga un espesor de una micropulgada o más y que se deposite sobre la superficie del metal. Si la película se deposita selectivamente sobre las áreas anódicas, el potencial de corrosión cambia a valores más positivos; pero si se deposita sobre las áreas catódicas, el cambio es hacia valores más negativos; y si la película cubre tanto áreas catódicas como áreas anódicas, existe sólo un ligero cambio en ambas direcciones.

5.3.7. Inhibidores Orgánicos.

Los compuestos orgánicos constituyen una clase extensa de inhibidores de la corrosión, que no pueden ser designados específicamente como inhibidores anódicos, catódicos u óhmicos. Los efectos anódicos o catódicos, se observan sólo algunas veces, en presencia de los inhibidores orgánicos, pero como regla general, los inhibidores orgánicos afectan toda la superficie de un metal corroído cuando se encuentran presentes a una concentración adecuada. Tanto las áreas anódicas como las catódicas tienen probabilidad de ser inhibidas, pero en diferente grado, dependiendo del potencial del metal, de la estructura química de la molécula del inhibidor y del tamaño de la molécula.

En la figura 5.5. se muestra el aumento típico que tiene la inhibición de la corrosión al variar la concentración del inhibidor, lo que nos sugiere que la inhibición es el resultado de

la adsorción del inhibidor sobre la superficie del metal. La película formada por la adsorción del inhibidor orgánico soluble está formada por unas cuantas moléculas densas y es visible.

Los inhibidores orgánicos son adsorbidos de acuerdo a la carga iónica del inhibidor y a la carga iónica de la superficie metálica.

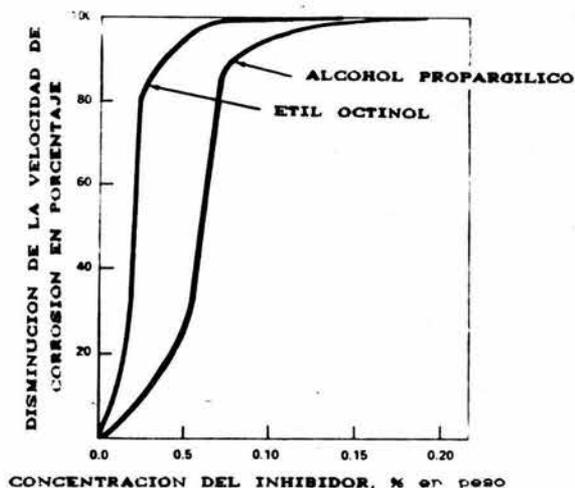


Figura 5.5. Efectos de la concentración de un inhibidor orgánico sobre la velocidad de corrosión.

Los inhibidores catiónicos (carga positiva, +) como las aminas o los inhibidores aniónicos (carga negativa, -), como los sulfonatos son adsorbidos en forma preferente, dependiendo de si el metal está cargado negativa o positivamente (caso que cumple con la atracción entre cargas opuestas). El potencial intermedio al que ninguna molécula catiónica o aniónica es adsorbida en forma

preferente se conoce como punto de carga cero o ZPC (siglas en inglés). Por lo que, la combinanci3n de la protecci3n cat3dica con un inhibidor que es adsorbido m3s fuertemente a potenciales negativos da una mayor inhibici3n que cuando se aplica la protecci3n cat3dica o un inhibidor.

5.3.7.1. Sinergismo con Iones de Hal3genos.

La eficiencia de las aminas org3nicas, como inhibidores se ve mejorada cuando ciertos iones de hal3genos se encuentran presentes. Los iones de hal3genos s3lo inhiben la corrosi3n cuando se encuentran en soluciones 3cidas. El ion yoduro (I^-) es el m3s efectivo, seguido del bromuro (Br^-) y el cloruro (Cl^-). El fluoruro (F^-) no tiene propiedades significativas como inhibidor. Por ejemplo, los iones cloruros, disminuyen la velocidad de ataque al acero por el 3cido sulf3rico. La combinaci3n de amina y yoduro puede inhibir m3s que un s3lo aditivo. Los dos aditivos son sin3rgicos.

La figura 5.6. muestra la comparaci3n de las velocidades de corrosi3n de un acero dulce (o templado) en 3cido fosf3rico (H_3PO_4) 3.0 M en presencia de n-decilamina, el ion yoduro y una combinaci3n de n-decilamina y ion yoduro. Una explicaci3n del sinergismo es que el acero adsorbe los iones yoduro cuya carga cambia el potencial de la superficie en direcci3n negativa, y es por eso que aumenta la adsorci3n de la amina cati3nica.

5.3.7.2. Efectos de la Estructura Molecular.

La forma en que influye el tama1o de las mol3culas org3nicas en

su eficiencia como inhibidores de la corrosión ha sido investigada muchas veces. Sin embargo los resultados no son suficientemente consistentes para formular una regla general, que nos permita predecir los efectos que tendrá el incremento del peso molecular sobre la inhibición de la corrosión.

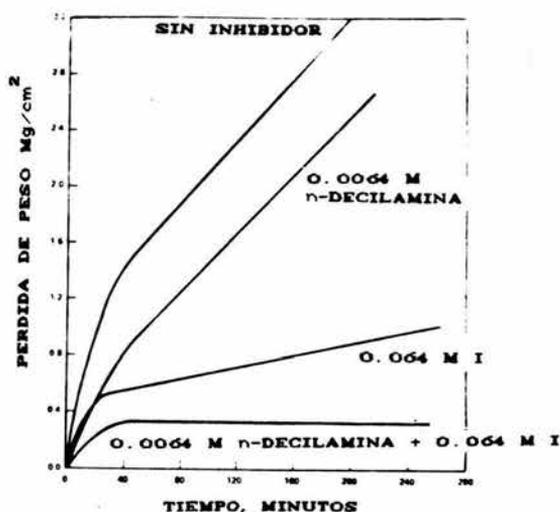


Figura 5.6. Corrosión de un acero dulce en una solución de ácido fosfórico 5M (90%), en donde se muestra el efecto sinérgico de la n-decilamina y el ion yoduro.

En la figura 5.7. se dan las estructuras de algunos inhibidores orgánicos. Las aminas primarias como la n-decilamina se convierten en inhibidores más eficientes cuando se aumenta la longitud de su cadena, pero en contraste con ellas, los mercaptanos alifáticos primarios como el n-butil mercaptano y algunos aldehídos, disminuyen su eficiencia cuando aumenta la

longitud de su cadena. Estos resultados se deben probablemente a

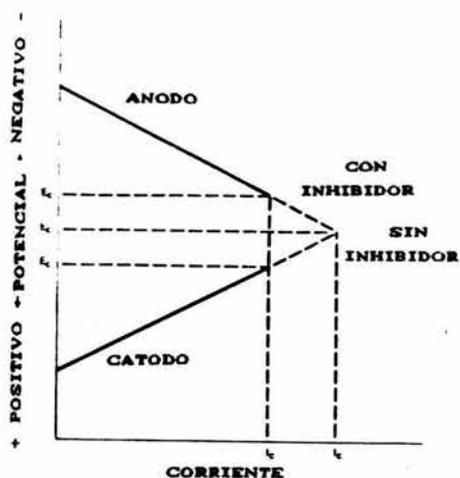


Figura 5.7. Estructura de algunos inhibidores orgánicos.

la interacción de varios factores que influyen en la resistencia del enlace de adsorción, en la compactación de la película adsorbida y en la tendencia a adsorber moléculas eslabonadas o que interactúan de otra forma con las moléculas vecinas.

Existe una pequeña duda respecto a si el enlace de las aminas y el metal es a través de el átomo de nitrógeno. Por ejemplo, en la serie de iminas cíclicas saturadas la eficiencia de inhibición aumenta, como se muestra en la figura 5.8., cuando el número de átomos de carbón amuenta al menos hasta 10.

5.3.7.3. Adsorción.

Las observaciones dadas anteriormente indican que en los

inhibidores orgánicos solubles, la resistencia de el enlace de absorción es un factor determinante. La adsorción de un inhibidor de la solución, establece el siguiente equilibrio:

$$(5.1) \quad I_{\text{solución}} \rightleftharpoons I_{\text{superficie}}$$

donde I es la concentración del inhibidor orgánico.

Es característico en un equilibrio que si se cambia la concentración de una de las especies, la concentración de las especies involucradas en el balance cambiarán en la misma dirección para conservar el equilibrio. De la ecuación (5.1), se puede saber que la cantidad de inhibidor sobre la superficie aumenta por el aumento de $I_{\text{solución}}$. La eficiencia del inhibidor aumenta con la concentración hasta que la superficie se satura, es decir, hasta que hayan sido adsorbidas las moléculas del inhibidor en todos los lugares disponibles. De ahí, la fuerza del enlace de adsorción, y la baja concentración del inhibidor para llegar a cubrir la superficie.

Los inhibidores orgánicos solubles forman una capa protectora con unas cuantas moléculas densas, pero si se adiciona un inhibidor orgánico insoluble en forma de gotitas dispersas, esta capa seguirá creciendo llegando a tener un espesor de varias milésimas de pulgada. De tal forma que las películas muestran una buena persistencia, es decir, que continúan inhibiendo la corrosión cierto tiempo, aun cuando la cantidad de inhibidor adicionada al ambiente no haya sido muy grande. La persistencia es una propiedad importante cuando se tiene que adicionar o inyectar un inhibidor sólo en trozos de metal.

5.3.8. Inhibidores Inductores de la Precipitación.

Los inhibidores inductores de la precipitación son compuestos formadores de películas que tienen una acción general sobre la superficie del metal y que por lo tanto, interfieren indirectamente tanto con los ánodos como con los cátodos. Los inhibidores de esta clase, más comunes, son los silicatos y los

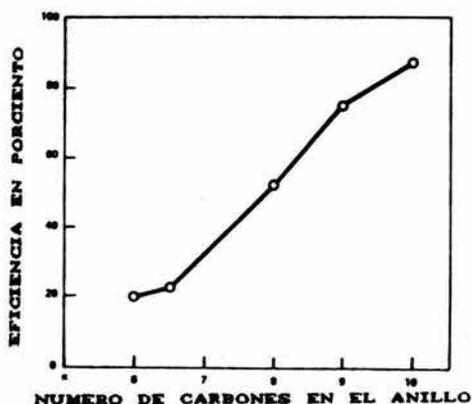


Figura 5.8. Eficiencia de las iminas saturadas cíclicas, para inhibir la corrosión del acero en ácido clorhídrico 0.1 M (22%).

fosfatos.

En aguas con un pH cercano a 7.0, con concentraciones bajas de cloruros, los silicatos y los fosfatos originan la pasivación del acero cuando se encuentra el oxígeno presente; de aquí que se diga que se comportan como inhibidores anódicos. Otra característica anódica es que se presenta la corrosión localizada en forma de picadura cuando se agregan cantidades insuficientes de silicatos o

fosfatos a el agua salina. Sin embargo, tanto los silicatos como los fosfatos forman depósitos sobre el acero que aumentan la polarización catódica. De tal forma que su acción parece ser un mezcla, es decir, una combinanci3n tanto de efectos an3dicos como cat3dicos.

Los silicatos se usan con mayor frecuencia en aguas poco saladas que contienen oxígeno. Tienen la rara propiedad de inhibir la corrosi3n del acero cuando este ya presenta incrustaci3n con herrumbre. Mientras que la concentraci3n de silicato requerida para la protecci3n depende de la salinidad del agua, para la mayoría de los suministros de agua de la ciudad se requieren inicialmente de 5 a 10 ppm, seguida de una reducci3n gradual de 2 a 3 ppm despu3s de que se forman los dep3sitos protectores. Las altas concentraciones de calcio y magnesio interfieren con la inhibici3n producida por los silicatos, pero este problema puede ser superado, adici3nando de 2 a 3 ppm de polifosfatos adem3s de los silicatos.

El silicato de calcio se usa en muchas aguas suavizadas para prevenir la aparici3n del "agua roja" o "herrumbre del agua" originada por el hidr3xido de hierro suspendido. Los silicatos remueven el hierro por precipitaci3n, por lo que no se recomienda su uso en donde la incrustaci3n no pueda ser tolerada.

En los sistemas de agua caliente aereada, el silicato de sodio protege al acero, al cobre y al lat3n. Sin embargo, la protecci3n no siempre es confiable, ya que depende del pH y la composici3n del agua. El mejor procedimiento es ajustar el índice de saturaci3n para facilitar la formaci3n de la película protectora

de silicatos.

Los fosfatos, al igual que los silicatos, requieren de la presencia de oxígeno para una inhibición efectiva. Una concentración de 10 ppm de hexametáfosfato de sodio, un polifosfato típico, mejora la inhibición de la corrosión en agua aerada, si el agua se encuentra en movimiento. En áreas estancadas, la corrosión puede aumentar debido a la presencia de celdas de concentración de oxígeno.

Aunado al movimiento, la presencia de iones de calcio, es esencial en la inhibición. Los fosfatos inhiben la deposición de CaCO_3 ; por lo que, la concentración de fosfato y calcio debe estar perfectamente balanceada para obtener una inhibición efectiva. De forma empírica, se sabe que la concentración de fosfato no debe exceder de dos veces la concentración del calcio. Por lo tanto, si el agua contiene 10 ppm de carbonato de calcio, podrán utilizarse 20 ppm de fosfato para la inhibición. Si el agua es excesivamente blanda, el contenido de calcio puede incrementarse agregando cal.

Si no puede utilizarse cromato, ya sea por su pérdida de resistencia o por problemas originados por la deposición debido a su toxicidad, las torres industriales de enfriamiento pueden ser inhibidas con cerca de 50 ppm de hexametáfosfato de sodio. Con frecuencia la adición de sales solubles de zinc mejoran la inhibición que proporcionan los polifosfatos. La picadura y la formación excesiva de incrustaciones se previenen manteniendo el pH del agua en un rango de 6 a 7.

Los silicatos y los fosfatos no proporcionan el grado de protección que puede ser obtenido con el uso de cromatos y

nitritos; sin embargo son muy utilizados en situaciones en donde se requieren aditivos no tóxicos. Su principal desventaja es su dependencia de la composición del agua y el cuidadoso control que se requiere para llevar a cabo la inhibición a un punto máximo.

5.3.9. Inhibidores en Fase Vapor.

Los inhibidores en fase vapor (VPI), también llamados inhibidores volátiles de la corrosión (VCI), son compuestos que se transportan en sistemas cerrados al lugar en donde se localiza la corrosión, por la volatilización de una fuente. En los calentadores, los compuestos volátiles básicos, como la morfolina o la octadecilamina se transportan con vapor para prevenir la corrosión en los tubos condensadores, que se presenta por la neutralización del dióxido de carbono ácido. Los compuestos de este tipo inhiben la corrosión al alcalinizar el ambiente corrosivo. En los espacios cerrados que contienen vapor, como los contenedores de los buques, se utilizan los sólidos volátiles como las sales de nitrito, carbonato y de benzoato de dicitlohexilamina, ciclohexilamina y hexametileno-imina. El mecanismo de inhibición para estos compuestos no es completamente claro, pero parece ser que la parte orgánica de la molécula sólo mejora la volatilidad.

Al estar en contacto con la superficie del metal, el vapor del inhibidor se condensa y se hidroliza por la presencia de cualquier cantidad de humedad, liberando iones de nitrito, benzoato y bicarbonato, según sea el caso. Ya que se encuentra presente una gran cantidad de oxígeno, los iones de nitrito y benzoato, son

capturados por el acero pasivado, al igual que si fuera una solución acuosa. El mecanismo para el carbonato, probablemente no sea el mismo, en este caso la parte orgánica de la amina del (VPI) sirve quizás para ayudar a la inhibición por adsorción y para proveer alcalidad.

Es deseable que un VPI proporcione una inhibición rápida y que tenga un efecto permanente. Por lo que el compuesto debe tener una alta volatilidad para saturar toda la cantidad de vapor que se encuentre presente, tan rápido como sea posible, pero al mismo tiempo no debe ser volátil, ya que podría perderse rápidamente a través de cualquier fuga que tenga el recipiente en que se este utilizando. La presión de vapor óptima del VPI, puede ajustarse después, para mantener la misma concentración del inhibidor sobre toda la superficie del metal expuesta a la corrosión.

La presión de vapor y otras propiedades de algunos inhibidores en fase vapor, se dan en la tabla 5.1. Note que la presión de vapor del carbonato de ciclohexilamina es 2000 veces más alta que la del nitrito de dicitclohexilamina, lo que lo hace mejor para ser aplicado en contenedores que son abiertos ocasionalmente, ya que proporciona una rápida restauración del espacio de vapor.

El uso de nitrito de dicitclohexilamina en los recipientes cerrados, es ventajoso, ya que este puede ser almacenado por grandes períodos. La cantidad requerida de inhibidor en fase vapor, depende de las condiciones en las que se va aplicar, pero se ha sugerido utilizar 2.2 Kg de nitrito de dicitclohexilamina por cada 100 m^2 de superficie (1 lb por cada 500 ft^2) y 2.2 Kg de carbonato de ciclohexilamina por cada 30 m^3 (1lb por cada 500 ft^3).

Los inhibidores en fase vapor atacan, en diferente grado, a los metales no ferrosos por lo que se sugiere hacer pruebas de los diferentes tipos comerciales recomendados para una determinada aplicación. La compatibilidad de las aminas y los nitritos con las aleaciones de cobre debe considerarse en forma especial. (2)

TABLA 5.1. PROPIEDADES DE LOS INHIBIDORES EN FASE VAPOR.

COMPUESTO	PRESION DE VAPOR EN mmHg. A 25°C	OBSERVACIONES
Nitrato de Diciclohexilamina	0.0002	Protege al acero, al aluminio y recubrimientos de estaño. Incrementa la corrosión del zinc, el magnesio, el cadmio, el plomo y el cobre. Decolora algunos plásticos.
Carbonato de Ciclohexilamina	0.4	Protege al acero, al aluminio, soldaduras, estaño y zinc. No afecta al cadmio. Incrementa la corrosión del cobre, el latón, y magnesio.

5.4. METODOS ELECTROQUIMICOS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION.

Los mecanismos de protección dependen de la acción de los elementos catódicos que generan una corriente externa polarizante en las celdas locales, sobre el potencial del circuito abierto de los ánodos.²² La superficie se hace equipotencial (es decir, que el potencial del ánodo y el del cátodo tienen el mismo valor) y las

²² R. Meares and R. Brown, Trans. Electrochem. Soc. 74, 519 (1928);
 ibid., 81, 455 (1942); T. Hoar, J. Electrodepositors Tech. Soc., 14, 29 (1938).

corrientes corrosivas no fluyen por más tiempo. Visto de otra forma, a un valor alto de densidad de corriente, entra una corriente netamente positiva a todas las regiones de la superficie del metal (incluyendo las áreas anódicas) y por lo tanto no existe la tendencia de los iones a entrar en solución. (3)

5.4.1. Diagramas de Evans.

Los procesos de corrosión se pueden estudiar mediante las curvas de polarización. En general, se emplean gráficos, denominados *diagramas de Evans*, donde están superpuestas las curvas anódica y catódica. Se representan en ordenadas los valores crecientes del potencial y en abscisas las intensidades de las corrientes de oxidación y de reducción, sin tener en cuenta su signo. También es frecuente representar el potencial en función del logaritmo de la intensidad de la corriente, con lo que en general se obtienen líneas rectas.

Considérese el proceso de oxidación de un metal M, caracterizado por una corriente de canje $I_{0,A}$, una pendiente de Tafel determinada y un potencial de equilibrio $E_{A,e}$, al que corresponde la curva de polarización de la figura 5.9.a. Los electrones suministrados por el metal pasan a una especie oxidada O, presente en la disolución, la cual se reduce a través de un proceso determinado por una corriente de intercambio $I_{0,c}$, una pendiente de Tafel dada y un potencial de equilibrio $E_{c,e}$, cuya curva de polarización está representada en el diagrama de la figura. Ambos procesos vienen indicados también en la figura 5.9.b., donde el potencial está expresado en función del logaritmo

de la intensidad de corriente. El punto de intersección de las dos curvas de polarización, en el que la intensidad de corriente de la oxidación es igual a la de la reducción, determina el potencial y

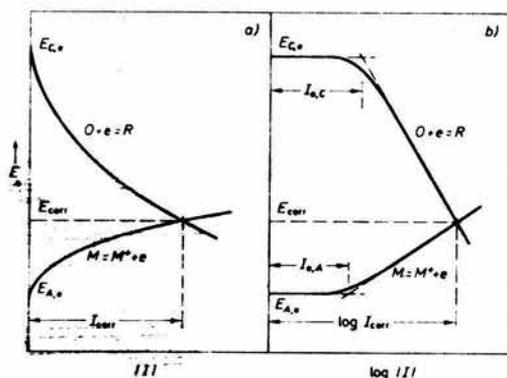


Figura 5.1. Diagrama de Evans: a) potencial vs. intensidad de corriente, b) potencial vs. logaritmo de la intensidad de corriente. El punto de intersección de las curvas define el potencial de corrosión y la corriente de corrosión.

la corriente de corrosión.

La forma que presenta el diagrama de Evans depende de las características cinéticas de cada proceso y permite analizar el comportamiento del sistema, tal como se puede observar en la figura 5.10. El diagrama a) muestra la influencia de la corriente de intercambio, donde se ve que un incremento de la corriente de intercambio del proceso anódico conduce a un desplazamiento del potencial de corrosión, con un aumento de la corriente de corrosión. De forma análoga pueden analizarse los efectos de la variación de la pendiente, en el diagrama b); y la variación del potencial de equilibrio, en el diagrama c).

Mediante los diagramas de Evans es posible determinar el control de la corrosión. Como indica la figura 5.10, cuando el

potencial de corrosión (E_{corr}), está desplazado hacia el potencial

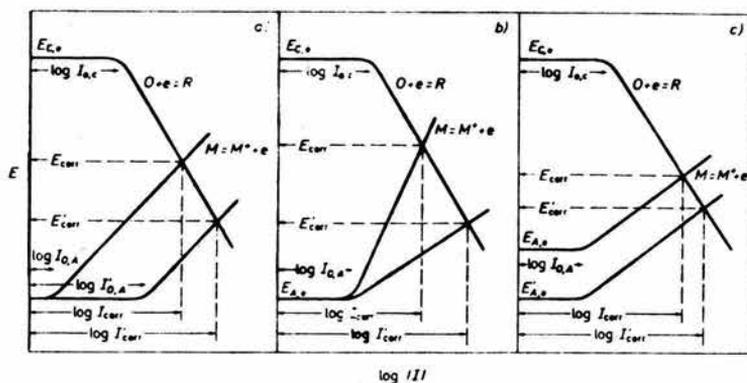
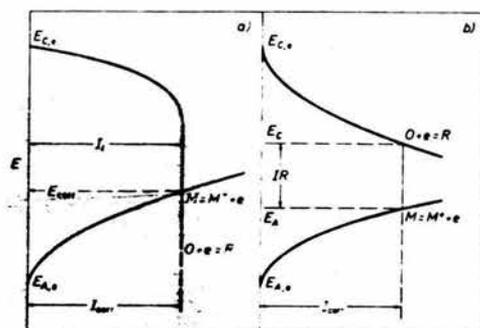


Figura 5.10. Efecto de: a) la corriente de intercambio; b) el coeficiente de transferencia, y c) el potencial de equilibrio sobre la velocidad de corrosión de los metales.

de equilibrio del proceso catódico, la corriente de intercambio anódica es baja, la pendiente anódica es grande o el potencial anódico de equilibrio se aproxima al catódico, la corriente de corrosión depende ampliamente de la curva anódica, y se dice que el sistema está bajo *control anódico*. Si el potencial de corrosión está próximo al potencial anódico de equilibrio, la corriente de intercambio anódica es grande, la pendiente de Tafel anódica es baja o el potencial anódico de equilibrio está alejado del catódico, se cumplen las condiciones opuestas, de modo que la corriente de corrosión depende prácticamente de la curva catódica y el sistema está bajo *control catódico*. En el caso en que el potencial de corrosión equidista de los potenciales de equilibrio

de los dos procesos, el sistema está bajo *control mixto*, pues la corriente de corrosión depende en la misma extensión de la cinética de ambos procesos.



111

Figura 5.11. Diagramas de corrosión cuando el proceso está bajo: a) control de difusión y b) control de resistencia.

También pueden presentarse otros tipos de control. Así, cuando el proceso de reducción depende del transporte de materia se obtiene una curva de polarización con corriente límite de difusión que corta a la curva anódica tal como se muestra en la figura 5.11.a. Como la corriente de corrosión está gobernada por la corriente límite se dice que el sistema está bajo *control de difusión*. Si el proceso tiene lugar en una disolución de baja conductividad el diagrama toma la forma indicada en la figura 5.11.b., donde la corriente de corrosión es la máxima que permite la conductividad de la disolución por lo que el sistema está bajo *control de resistencia*. En este caso los potenciales de las zonas anódica y catódica son muy distintos y la corriente de corrosión viene determinada casi exclusivamente por la resistencia de la

disolución. (4)

5.4.2. Protección Catódica.

La protección catódica es quizás el más importante medio de control de la corrosión. En ella, la corrosión es virtualmente reducida a cero, por medio de la aplicación de una corriente eléctrica externa.

La protección catódica puede aplicarse en la práctica para proteger metales como el acero, el cobre, el plomo y el latón contra la corrosión de todos los tipos de suelos y de casi todos los medios acuosos. La corrosión por picadura (Sección 2.5.4.1.) puede prevenirse, con este método, en los metales pasivados como los aceros inoxidable o el aluminio. También puede utilizarse efectivamente para eliminar la fractura por corrosión bajo tensión (Sección 2.5.4.8.) del latón, el acero templado, los aceros inoxidable, el magnesio y el aluminio; la corrosión-fatiga (Sección 2.5.4.10.) de las mayoría de los metales, pero no la fatiga; la corrosión intergranular del Duralumin y del acero inoxidable 18-8 ó la dezincificación del latón. (5)

5.4.2.1. Forma de Aplicación.

La protección catódica requiere de una fuente de corriente directa y de un electrodo auxiliar (ánodo), comúnmente de hierro o grafito, localizado a cierta distancia de la estructura que se va a proteger. La terminal positiva de la fuente de corriente directa se conecta al electrodo auxiliar, mientras que la terminal negativa se conecta a la estructura; de esta forma la corriente

fluye desde el electrodo hasta el electrolito a través de la estructura. El voltaje que se aplica no es crítico, ya que se necesita sólomente una cantidad que proporcione una densidad de corriente adecuada a todas las partes de la estructura. En suelos y aguas con alta resistividad, el voltaje aplicado debe ser más alto que el que se aplica en ambientes de baja resistividad. O cuando se vayan a proteger los extremos de una tubería muy larga con un sólo ánodo, el voltaje aplicado deberá aumentarse. La figura 5.12 muestra la protección catódica de una tubería.

5.4.2.2. Anodos de Sacrificio.

Si el ánodo auxiliar está compuesto por un material más activo, en la Serie Galvánica, que el metal que se va a proteger, se forma una celda galvánica cuya corriente sigue la dirección que se

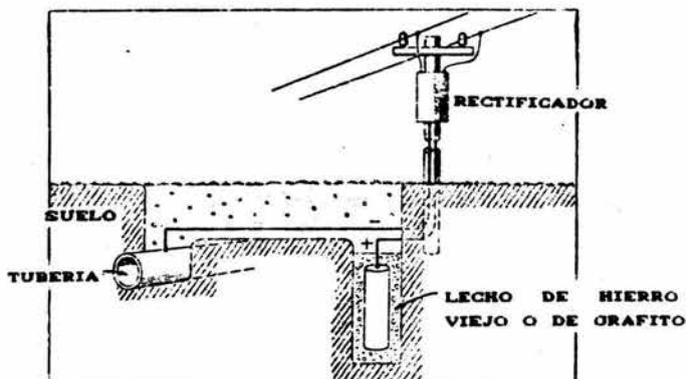


Figura 5.12. Esquema de la protección catódica de una tubería con el ánodo auxiliar y el rectificador.

describió anteriormente. En este caso la fuente de corriente

impresa (el rectificador) puede omitirse y el electrodo recibe el nombre de ánodo de sacrificio (figura 5.13.). Los metales de sacrificio usados en la protección catódica consisten básicamente en aleaciones comunes de magnesio y aluminio, y en menor extensión, el zinc. Los ánodos de sacrificio sirven esencialmente como fuentes portátiles de energía eléctrica, por lo que se usan particularmente cuando no se requiere fuerza eléctrica o en situaciones en las que no es conveniente o económico instalar líneas de fuerza para tal propósito.

5.4.2.3. Uso Combinado con Recubrimientos.

La distribución de corriente en una protección catódica de un tanque de acero que contenga agua no es ideal, ni la corriente que



Figura 5.13. Protección catódica de una tubería utilizando un ánodo de sacrificio.

fluye en exceso por los lados y que no es suficiente para la tapa

y el fondo. La mejor distribución es la que se obtiene al combinar la protección catódica con un recubrimiento aislante (recubrimiento orgánico para temperaturas normales o recubrimiento de vidrio para temperaturas elevadas). Se requiere que el recubrimiento no sea poroso, ya que la corriente protectora fluye preferentemente sobre las áreas metálicas expuestas, localizadas en cualquier lugar, que son las áreas precisas en las que se necesita protección. Aunque la corriente total requerida es menor que para un tanque sin recubrir, el ánodo de magnesio dura más.

En aguas duras, se puede formar un recubrimiento parcialmente protector sobre el acero que consiste en un precipitado de CaCO_3 generado por álcalis como producto de reacción en la superficie del cátodo. Un recubrimiento similar se forma gradualmente sobre las superficies protegidas catódicamente expuestas al agua de mar (más rápidamente a altas densidades de corriente). Por lo que los recubrimientos, sobre todo adherentes, se usan también en la distribución de la corriente protectora y en la reducción de los requerimientos totales de corriente.

En la aplicación general de la protección catódica se usa tanto la corriente impresa como los ánodos de sacrificio y es conveniente usar un recubrimiento aislante de algún tipo. (6)

5.4.3. Protección Anódica.

En contraste con la protección catódica, la protección anódica es relativamente nueva, fue sugerida en 1954 por Edeleanu. Esta técnica se desarrolló utilizando los principios cinéticos de

electrodo y es un poco difícil de describir sin introducir conceptos avanzados de la teoría electroquímica. De forma simple, la protección anódica se basa en la formación de una película protectora sobre la superficie metálica al aplicarse una corriente anódica. Considerando las siguientes ecuaciones:



parece ser que la aplicación de la corriente anódica a la estructura tiende a incrementar la velocidad de disolución del metal y disminuir la velocidad de evolución del hidrógeno. Esto ocurre por lo regular, excepto, para los metales que tienen transición activo-pasiva como el níquel, el hierro, el cromo, el titanio y sus aleaciones. Si se aplica una corriente anódica cuidadosamente controlada a estos materiales, se pasivan y la velocidad de disolución del metal disminuye. En la protección anódica de una estructura, se requiere un dispositivo llamado potencioestático. Un potencioestático es un dispositivo electrónico que mantiene a un metal a un potencial constante con respecto al electrodo de referencia. En la figura 5.14 se ilustra la protección anódica de un tanque que contiene ácido sulfúrico. El potencioestático tiene tres terminales; una se conecta a el tanque, otra a un cátodo auxiliar (un electrodo de platino o revestido de platino) y el tercero a un electrodo de referencia (a una celda de calomel). Al momento de operar, el potencioestático mantiene constante el potencial entre el tanque y el electrodo de referencia. El potencial óptimo para la protección se determina por medidas electroquímicas.

La protección anódica puede disminuir la corrosión de forma substancial. La tabla 5.2. lista las velocidades de corrosión de

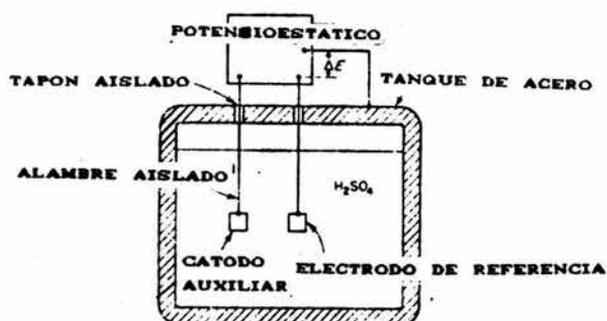


Figura 5.14. Protección anódica de un tanque de acero que contiene ácido sulfúrico.

un acero inoxidable austenítico en soluciones de ácido sulfúrico que contienen iones cloruro con y sin protección anódica. Aunque la protección anódica se limita a los metales y las aleaciones pasivadas, la mayoría de los materiales estructurales de la tecnología moderna contiene este tipo de elementos, por lo que la restricción no es tan importante como pudiera parecer a primera vista. La tabla 5.3. lista varios sistemas en donde la protección anódica ha sido aplicada con éxito. Las principales ventajas de la protección anódica es su aplicabilidad a ambientes extremadamente corrosivos y su bajo requerimiento de corriente.

Para ilustrar los principios de la protección anódica considere el sistema ilustrado en la figura 5.15. Un metal activo-pasivado M es corroído en su estado activo a una velocidad igual a $i_{corr(activo)}$. En este sistema particular, sólo el estado activo

es estable y el metal no puede pasar a su estado pasivo, espontáneamente sin la aplicación de una corriente externa. Si

TABLA 5.2. PROTECCION ANODICA DE UN ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO A 80°F
(Protegido a 0.500 volta vs un Electrodo de Calomel Saturado)

TIPO DE ALEACION	AMBIENTE (EXPUESTO AL AIRE)	VELOCIDAD DE CORROSION, mpy	
		SIN PROTEGER	CON PROTECCION ANODICA
304 (19Cr-9Ni)	N H ₂ SO ₄ + 10 ⁻⁵ M NaCl	14	0.025
	N H ₂ SO ₄ + 10 ⁻³ M NaCl	2.9	0.045
	N H ₂ SO ₄ + 10 ⁻¹ M NaCl	9.2	0.20
	10N H ₂ SO ₄ + 10 ⁻⁵ M NaCl	1990	0.016
	10N H ₂ SO ₄ + 10 ⁻³ M NaCl	1125	0.04
	10N H ₂ SO ₄ + 10 ⁻¹ M NaCl	77	0.21

FUENTE: S. J. Acello y N. D. Greene, Corrosion, 18:286t (1962).

este metal estuviera en su estado pasivo, su velocidad de corrosión podría reducirse a $i_{corr(pasivo)}$. El rango de potencial, en el cual puede realizarse la protección catódica, se llama rango de protección y corresponde a la región pasiva. El potencial óptimo para la protección anódica se encuentra en medio de la región pasiva, ya que así permite ligeras variaciones en el control del potencial sin provocar efectos dañinos sobre la velocidad de corrosión. Como dijimos anteriormente, el potencial de un electrodo o una estructura puede permanecer constante por medio de un dispositivo de potencial constante llamada

potencioestático.

Consideremos la secuencia de los eventos involucrados en la protección anódica como se ilustra en la figura 5.16. Como el

TABLA 5.9. CORRIENTE REQUERIDA PARA LA PROTECCION ANODICA.

FLUIDO Y CONCENTRA- CION	TEMPERA- TURA °F	METAL	DENSIDAD DE CORRIENTE ma/ft ²	
			PARA PASIVAR	PARA MANTENER
H2SO4				
1 molar	75	316SS	2100	11
15%	75	304	390	67
30%	75	304	500	22
45%	150	304	165,000	890
67%	75	304	4700	3.6
67%	75	316	470	0.09
67%	75	Carpenter 20	400	0.08
93%	75	Acero Dulce	260	21
Oleum	75	Acero Dulce	4400	11
H3PO4				
75%	75	Acero Dulce	38,000	19,000
115%	180	304SS	0.03	0.00014
NaOH				
20%	75	304SS	4400	9.4

FUENTE: C. E. Locke et al., Chem. Eng. Progr., 56:50 (1960).

potencial mezclado teórico, requiere de la conservación de cargas, la densidad de corriente anódica aplicada es igual a la diferencia entre la velocidad total de oxidación y la velocidad total de reducción del sistema. Por lo tanto:

$$(5.4) \quad i_{\text{aplicada(anodica)}} = i_{\text{oxid}} - i_{\text{red}}$$

donde $i_{\text{aplicada(anodica)}}$ es la densidad de corriente anódica aplicada. La figura 5.16 muestra las densidades de corriente aplicadas para que el potencial del sistema cambie del potencial

de corrosión al potencial óptimo de corrosión E_4 . A el potencial de corrosión, la densidad de corriente anódica aplicada es cero ya



Figura 5.15. Diagrama esquemático que muestra el rango de protección y el potencial óptimo para la protección anódica de un metal activo-pasivado.

que $i_{ox} = i_{red}$ y la velocidad de corrosión es $100 \mu\text{a}/\text{cm}^2$. Si el potencial se incrementa a E_1 con un potencioestático, es necesario aplicar una densidad de corriente de $1000 - 10$ ó $990 \mu\text{a}/\text{cm}^2$. A E_2 , que es el máximo de la curva activo-pasivada, es necesario aplicar una corriente anódica de aproximadamente $10,000 \mu\text{a}/\text{cm}^2$ para mantener este potencial, mientras que a E_3 , la corriente aplicada disminuye a $0.9 \mu\text{a}/\text{cm}^2$. Al potencial óptimo E_4 , la corriente anódica aplicada es aproximadamente de $1 \mu\text{a}/\text{cm}^2$, que es igual a la velocidad de corrosión a este potencial.

El sistema ilustrado en la figura 5.16 puede protegerse catódicamente aplicando corriente. La densidad de corriente catódica aplicada es igual a la diferencia entre la velocidad

total de reducción y la velocidad total de oxidación:

$$(5.5) \quad i_{\text{aplicada(catódica)}} = i_{\text{red}} - i_{\text{oxid}}$$

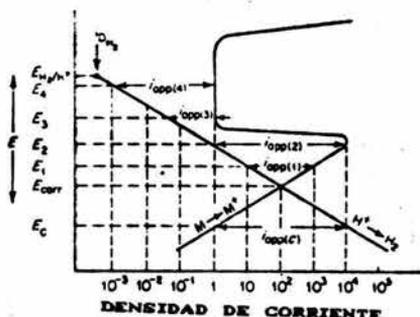


Figura 5.16. Efecto de la aplicación de corriente anódica y corriente catódica en el comportamiento del sistema activo-pasivo.

en donde $i_{\text{aplicada(catódica)}}$ es la densidad de corriente catódica aplicada. La ecuación (5.5.) es similar a la (5.4.) y resulta del principio de conservación de cargas de la teoría del potencial mezclado. Aplicando la ecuación (5.5.) al sistema que se muestra en la figura 5.16, es aparente que si el potencial cambia a E_c , es necesario aplicar una densidad de corriente catódica de $10,000 - 1$ o aproximadamente $10,000 \mu\text{a}/\text{cm}^2$. La velocidad de corrosión de M a E_c es de $1 \mu\text{a}/\text{cm}^2$. Por lo que, $10,000 \mu\text{a}/\text{cm}^2$ de corriente catódica, ó $1 \mu\text{a}/\text{cm}^2$ de corriente anódica producen la misma reducción en la velocidad de corrosión. Este ejemplo demuestra que la protección anódica es mucho más eficiente que la protección catódica en soluciones ácidas.

5.4.4. Comparación entre la Protección Anódica y la Protección Catódica.

Algunas de las diferencias importantes entre la protección anódica y la catódica se listan en la tabla 5.4. Cada método tiene ventajas y desventajas, por lo que ambas protecciones tienden a complementarse entre sí. La protección anódica puede utilizarse en un rango de ambientes que va desde ligeramente corrosivos hasta muy corrosivos, mientras que la protección catódica se restringe a condiciones moderadamente corrosivas debido a su alto requerimiento de corriente, que aumenta cuando la corrosividad del ambiente aumenta. Por lo que no es práctica la protección catódica de los metales en medios muy agresivos. La protección anódica, por lo contrario, utiliza pequeñas cantidades de corriente y puede utilizarse en medios altamente corrosivos.

La instalación de un sistema de protección catódica es relativamente cara, ya que los componentes son de instalación rápida y fácil. La protección anódica requiere una instrumentación compleja que incluye el potencioestático y un electrodo de referencia, por lo que su costo de instalación es alto. Los costos de operación de los dos sistemas difieren debido a la cantidad de corriente requerida. El recorrido de la fuerza o la uniformidad de la distribución de la densidad de corriente, varía en los dos tipos de protección. El recorrido de la fuerza en la protección catódica es generalmente menor, por lo que se requieren numerosos electrodos espaciados para realizar una protección uniforme. Los sistemas de protección anódica tienen un gran recorrido de fuerza, por lo que pueden utilizar un solo cátodo auxiliar para proteger

grandes longitudes de tubería.

La protección anódica posee dos únicas ventajas. La primera es que la corriente aplicada para proteger al sistema, es igual a la

TABLA 5.4. COMPARACION ENTRE LA PROTECCION ANODICA Y LA PROTECCION CATODICA.

	PROTECCION ANODICA	PROTECCION CATODICA
APLICABILIDAD		
Metales	Solo para metales activo-pasivos	A todos los metales
Agentes Corrosivos	De débiles a agresivos	De débiles a moderadamente agresivos
COSTOS RELATIVOS		
Instalación	Alto	Bajo
Operación	Muy Bajo	De Medio a Alto
Fuerza Impulsora	Muy Alto	Bajo
Significado de la Corriente aplicada	Es con frecuencia, una medida directa de la velocidad de corrosión	Complejo-No indica la velocidad de corrosión
Condiciones de Operación	Pueden determinarse rapidamente y con gran seguridad por mediciones electroquímicas	Por lo regular se -- determinan por -- pruebas empíricas

velocidad de corrosión. Por lo que, la protección anódica no sólo protege al sistema, sino que ofrece un medio de monitorear instantáneamente la velocidad de corrosión. Y segunda, las condiciones de operación, de este tipo de protección, pueden establecerse de forma precisa por medidas de polarización hechas en el laboratorio. En contraste, los límites de operación de la

protección catódica se establecen, por lo regular, de forma empírica por datos de prueba y error. Sin embargo, se han sugerido varios métodos, de evaluación rápida, para estimar la corriente requerida para la protección catódica, la mayoría de los cuales han funcionado en mayor o menor grado, por lo que la selección final se basa, por lo regular, en experiencias anteriores. (7)

5.5. RECUBRIMIENTOS:

Uno de los métodos más utilizados para el control de la corrosión, es la aplicación de recubrimientos sobre la superficie que se requiere proteger.

Muchas veces se confunde a las pinturas con los recubrimientos y éstas a su vez con los revestimientos. Al ver una pintura envasada, no podemos saber si es una pintura, un recubrimiento o un revestimiento, ya que no está en función de la presentación, sino del espesor al cual se va aplicar. Así tenemos la siguiente clasificación.

Pinturas	Espesor menor de 50 micrómetros
Recubrimientos	Espesor entre 50 y 1000 μ
Revestimientos	Espesor mayor de 1000 μ

Las pinturas se utilizan para tintes estéticos, y por tal motivo no es importante la preparación de la superficie ni el espesor, pero sí el color.

Los recubrimientos y revestimientos se usan para dar protección anticorrosiva principalmente al acero, y por consiguiente es importante la preparación de la superficie, los espesores, el número de capas y tipo de recubrimientos.

Un recubrimiento consta de dos componentes fundamentales: el vehículo y el pigmento.

El vehículo es la parte líquida del recubrimiento y éste a su vez está formado por la resina, aditivos y solventes.

El pigmento es la parte sólida finamente molida del recubrimiento y se puede dividir en pigmentos coloridos, pigmentos inertes y reforzantes.

La parte que queda del recubrimiento después de su secado son la resina con sus aditivos y el pigmento perdiéndose por evaporación el solvente.

De esto se deriva que un recubrimiento que tenga 60% de sólidos en volumen, indica que el 40% del volumen es solvente y el 60% del volumen lo ocupa la resina y el pigmento.

5.5.1. Clasificación de los Recubrimientos.

Los recubrimientos los podemos clasificar en función del tipo de secado o de su composición química.

Dentro de la clasificación por tipo de secado tenemos a los esmaltes, lacas, catalizados y de horneo. La tabla 5.5. da las características de esta clasificación.

En la clasificación de recubrimientos por su composición química se dividen en orgánicos, inorgánicos y metálicos. La tabla 5.6. muestra esta clasificación.

Al presentarse la necesidad de recubrimientos, se debe seleccionar un "sistema de recubrimientos anticorrosivos", que consiste de lo siguiente:

- Preparación de la superficie

- Primario
- Intermedio o enlace (cuando se requiera) y
- Acabado (B)

TABLA 5.5. CLASIFICACION DE LOS RECUBRIMIENTOS POR EL TIPO DE SECADO.

CLASIFICACION DEL RECUBRIMIENTO	TIPO DE SECADO	EJEMPLOS
ESMALTES	Evaporación del solvente y auto oxidación del vehículo.	Alquidáticos
LACAS	Evaporación del solvente.	Vinílicos Hules, Clorados, Acrílicos.
CATALIZADOS	Reacción química y evaporación del solvente.	Epóxicos, Poliuretanos, Inorgánicos de Zinc
HORNEO	Polimerización por acción del calor y evaporación del solvente.	Silicón, Fenólicos

Los recubrimientos primarios es la primera capa que se aplica a la superficie.

Los recubrimientos secundarios o intermedios sólo se requiere para alguna formulación especial.

Y los recubrimientos finales o sobretodos se seleccionan de acuerdo a la resistencia que se necesita para un ambiente específico y debe ser compatible con el primero y el segundo.

Los recubrimientos se aplican para producir los siguientes efectos:

1. Provee de densidad y de una barrera para aislar el material

del medio.

TABLA 5.6. CLASIFICACION DE RECUBRIMIENTOS POR SU COMPOSICION QUIMICA.

CLASIFICACION DEL RECUBRIMIENTO	SUBCLASIFICACION	EJEMPLOS
Orgánicos	Naturales	Aceites Alquitrán de Hulla Asfaltos
	Sintéticos	Alquidáticos Vinílicos Epóxicos Fenólicos Acrílicos Poliuretanos Poliétileno Poliésteres
Inorgánicos	De Zinc Autocurantes	Base solvente Base acuosa
	De Zinc Foscurados	Base acuosa de dos componentes
	De Zinc con Resina Orgánica	Un componente Dos componentes
Metálicos	Aislamiento	Estaño Cobre Cromo Níquel
	De sacrificio (Dan protección catódica)	Zinc Aluminio Cadmio

2. Provee buena adhesión a la superficie metálica para la aplicación de otros materiales.

3. Resistencia a la abrasión.

4. Cubre el sustrato mientras permite el escape de los gases.

5. Por razones estéticas.

6. Para alisar la superficie y disminuir la fricción de la superficie.

7. Para prevenir el efecto catalítico de una superficie sobre un producto en contacto ella.

8. Para proveer superficies que son más fáciles de limpiar.

9. Para prevenir la contaminación del producto.

10. Para proteger las superficies de la oxidación a altas velocidades.

Los productos sólidos, pueden ser preparados como una resina (polímeros) o se pueden formar sobre la superficie después de ser aplicados. Este material resinoso, más los pigmentos y los rellenos, comprenden los sólidos del recubrimiento. Estos son portados en un vehículo (solvente líquido o medio dispersante) cuya viscosidad puede ser variada por la adición de thinner.

Sólo los sólidos permanecen sobre la superficie después de que se forma el recubrimiento. Sin embargo, una parte o todo el vehículo puede reaccionar con la resina (100% los sólidos del recubrimiento) para producir la película final. Los pigmentos se adicionan para dar color o como inhibidores del recubrimiento primario. Los rellenos se seleccionan para incrementar el volumen del recubrimiento, mejorar la densidad, incrementar la resistencia a la abrasión e incrementar la opacidad de la película. Una mala selección del relleno o la adición de un exceso de este puede degradar el recubrimiento, por el incremento de la permeabilidad y disminuye la cohesión en la película.

Las lacas son los recubrimientos que se forman por la evaporación del vehículo del polímero (la resina alquitranada

disuelta en un hidrocarburo deja lacas finísimas), mientras que un esmalte se describe normalmente como un recubrimiento pigmentado de gran espesor y dureza que puede formarse a partir de una resina completamente "curada" por horneado o la oxidación atmosférica. El curado indica la última reacción a la que fue sometida la película, sea por efectos atmosféricos, catálisis u horneado. El proceso se asocia normalmente con el eslabonamiento de las cadenas de polímeros de las resinas de los recubrimientos.

5.5.2. Asfaltos.

El asfalto natural es el recubrimiento más antiguamente conocido. Estos productos se usan solos o mezclados con otros materiales. Los asfaltos y el alquitrán de hulla, actuales, se derivan del petróleo y el carbón. Cuando no son expuestos a la luz solar, estos materiales son estables, no caros, pesados y protectivos.

Al igual que otros materiales recubridores, no existen en forma simple. Los recubrimientos de asfalto se formulan de un número natural de lechos de betún o a partir de los residuos petroleros. El alquitrán de hulla se recubre de una mezcla de moléculas que permiten la producción de recubrimientos con diferentes propiedades. Estos se pueden aplicar en forma fundida o diluida con solventes de hidrocarburos y tienen una gran resistencia a la humedad por unidad de espesor.

Estos productos son ampliamente utilizados para recubrir acero y las estructuras enterradas aun cuando se exponen a atmósferas severamente ácidas. Los recubrimientos de asfalto pesados se

recubren algunas veces con fibra de vidrio u otros materiales que mejoran su resistencia.

5.5.3. Aceites.

Por muchos años, la formulación de las pinturas protectivas oleosas se basó en los "aceites" naturales (ácidos insaturados de cadena larga y moléculas de ésteres) y aceites como el de linaza, pino, castor, pescado y otros los cuales proveían una película resinosa cuando el oxígeno del aire reaccionaba con la molécula dando como resultado una película dura y producía algunos eslabonamientos. El proceso de secado atmosférico es lento, por lo que tiene grandes desventajas.

Sin embargo cada material tiene su lugar de uso y una formulación adecuada puede producir un material curado que es duro, dúctil, denso, continuo y muy protectorio del acero expuesto a ambientes rurales o poco agresivos.

5.5.4. Fenólicos.

Es posible sintetizar una gran diversidad de resinas fenólicas, por lo que es mejor describirlas con base en su forma de uso, que dando sus combinaciones químicas específicas.

Primero, existen un gran grupo de fenoles sustituidos que se adicionan a los recubrimientos aceitosos, alquidálicos y otros para aumentar su resistencia al agua. Por lo que un recubrimiento puede fortificarse con productos fenólicos, pero no por esto se considera como recubrimiento fenólico.

Segundo, la preparación de las resinas fenólicas aceitosas y

solubles permiten la preparación de un grupo verdadero de recubrimientos fenólicos que pueden ser utilizados para aplicaciones atmosféricas y para sumergirse en agua dulce. Estos son ésteres fenólicos combinados con aceites, esencias o resinas sintéticas.

Por último, existe una clase de resinas fenólicas que se aplican como lacas y se hornean a alta temperatura (150°C o mayor) para darles propiedades de resistencia química incomparables, como son una excelente resistencia a los ácidos y a los solventes. Los ambientes alcalinos y los oxidantes fuertes son esencialmente los únicos en los que no son estables estos productos. Los recubrimientos se usan con mucha frecuencia en el interior de latas, tambores, carros-tanque y recipientes de almacenamiento para prevenir la contaminación por hierro, de su contenido.

5.5.5. Alquidálicos.

Las resinas alquidálicas (poliésteres) remplazaron en su mayor parte a los aceites, a principios de los años 20's debido a su fácil aplicación y a su bajo costo. Este tipo de resinas se pueden formular para aplicaciones muy diversas, bajo cualquier condición, incluyendo ciclos de horneado. El esmalte que se obtiene tiene buena estabilidad de color con un pequeño trazo en la atmósfera. Las excelentes películas que se obtienen pueden emplearse en ambientes industriales poco agresivos y muchas otras atmósferas, pero se debe evitar su exposición a ácidos fuertes, álcalis o solventes.

Este tipo de recubrimiento debe considerarse siempre que se

desea evaluar la facilidad de aplicación, en un trabajo dado.

5.5.6. Vinílicos.

Los recubrimientos vinílicos son uno de los sistemas de resinas, más utilizados para pintar en ambientes industriales severos, regiones costeras y en muchas aplicaciones de inmersión en agua. Esto se puede atribuir a la alta densidad de la película, al carácter hidrofóbico de la resina, a su excelente resistencia a la oxidación y a la película tipo laca que se forma rápidamente después de ser aplicada. Las películas vinílicas son resistentes a los ácidos, a los álcalis y a los oxidantes, pero no a los solventes, excepto los hidrocarburos de cadena sencilla y a los alcoholes.

La resina del recubrimiento vinílico es una mezcla de cloruro de vinilo y moléculas de éster. La formulación original de este tipo de recubrimiento tiene un bajo contenido de sólidos y se aplica como un recubrimiento múltiple para obtener un espesor adecuado. Los recubrimientos primarios, intermedios y totales se obtienen a partir de diferentes bases de resina. Los viníles de alto desarrollo se han preparado eventualmente para superar este problema, sin embargo, estos materiales no tiene la densidad y la estabilidad de las lacas con bajo contenido de sólidos. Por lo que, en general, los sistemas vinílicos de recubrimiento utilizados para servicios de inmersión no se utilizan como pinturas para mantenimiento, y por su puesto tampoco se da el caso contrario.

Otro grupo único de recubrimientos son los plastisoles y los

organosoles, estos son pesados, duros y se aplican en artículos como bandejas de máquinas lavaplatos y otros artículos de la misma línea.

5.5.7. Epóxicos.

La molécula epóxica fue preparada en Alemania en 1800, pero no fue sino hasta 1940 que el uso de las resinas basadas en dicha molécula se hizo comercial. Su popularidad se incremento rápidamente debido a la excelente adhesión de la resina y al amplio espectro de resistencia química inherente a la mayoría de las formulaciones.

La molécula epóxica se combinó con aceites para producir los ésteres epóxicos, a menor costo, de fácil aplicación y con menos resistencia química, este tipo de recubrimiento no debe ser confundido con los epóxicos catalizados.

Los epóxidos de dos paquetes (catalizados,activados) ofrecen algunas de las mejores propiedades, que se puedan conseguir de cualquier material de recubrimiento, una vez que se ha aplicado. Sin embargo, su aplicación debe realizarse con mucho cuidado. Las películas pesadas con una buena adhesión, necesarias para limpiar un metal, pueden realizarse con dos recubrimientos. Esta película es resistente a los ácidos, a los álcalis y a la mayoría de los solventes, pero no a los oxidantes fuertes. Más bien, puede presentarse un trazo pesado de la superficie, dependiendo de la formulación escogida, de la resistencia química de la película y de que si la película se puede recubrir o no, después de un tiempo debido al curado continuo de la misma.

Los epóxidos amino curados se usan extensamente para revestimientos internos de recipientes de almacenamiento, tolvas de carros y estructuras de concreto. Una capa adicional de recubrimiento epóxico reforzado con fibra de vidrio dá un recubrimiento excepcionalmente pesado que puede utilizarse en servicios de inmersión.

La combinación de resina epóxica con un polímero de alquitrán de hulla produce un recubrimiento menos caro que tiene propiedades adecuadas para su uso en el interior y el exterior de tuberías y muchos otros equipos expuestos a condiciones severas.

5.5.8. Uretanos.

El polímero de uretano es muy familiar en forma de plástico, elastómeros, espumas y recubrimientos. Obviamente, las diferentes resinas de uretano deben ser capaces de combinarse con muchos otros tipos de moléculas con la finalidad de producir esta variedad de productos finales. Como resultado de ello, la ASTM ha dividido a esta categoría en seis tipos. En cada uno de ellos, se tiene un rango de propiedades para recubrimientos, dependiendo de la química del sistema. En este grupo se encuentran los recubrimientos elásticos, los recubrimientos duros, los recubrimientos con poca estabilidad a la luz ultravioleta, los recubrimientos con excelente estabilidad a la luz ultravioleta, los recubrimientos difíciles de pigmentar, los recubrimientos pigmentados con aditivos comunes, los recubrimientos con una resistencia química no mayor a la de un recubrimiento alquidálico o recubrimientos con muy buena resistencia química.

La propiedad más importante de esta categoría de recubrimientos es la excelente resistencia a la abrasión de los materiales sometidos a curado húmedo. Ningún otro material orgánico con una dureza y un acabado brillante puede compararse, en su resistencia a la abrasión, con el uretano Tipo II.

Los materiales se utilizan ampliamente para pisos y otros acabados de madera, revestimientos de tolvas y como recubrimientos para mantenimiento. La adhesión de las resinas básicas de uretano al metal no es buena y deben ser aplicadas sobre recubrimientos primarios de otras resinas como las epóxicas.

5.5.9. Preservadores Temporales.

Una gran área de recubrimientos utilizados son los preservadores temporales. El término temporal puede significar intervalos de tiempo que va desde horas a meses o años. La protección de un metal durante un período de días o meses, depende de si la exposición es en el interior o en el exterior. Los materiales recubrientes pueden dividirse en los siguientes grupos.

Aceites, Grasas y Ceras Microcristalinas. Los materiales como los aceites, las grasas y ceras microcristalinas se identifican y dividen en varios tipos de acuerdo con las especificaciones militares (MIL). El rango comprende desde las delgadas capas de aceites aplicadas a las hojas de acero o aluminio, hasta las pesadas películas de grasas cohesivas o ceras que proporcionan unas cubiertas, relativamente permanentes, al substrato del metal. Estos materiales son frecuentemente denominados como compuestos

grasos debido a que se aplican por inmersión, con brocha o por aspersión. Muchos de ellos incluyen en su fórmula un inhibidor que sirve para estabilizar la superficie del metal.

Tales materiales pueden usarse para preservar a los metales entre períodos de procesamiento, para la protección de las superficies precisas durante su transporte o almacenamiento, o para mantener el interior del equipo durante el almacenamiento o para prevenir la corrosión de las superficies de acero que se encuentran en contacto con agua estancada, (por ejemplo en el tanque de agua contra incendio).

Grasas. La tela impregnada con una pesada e inhibida grasa, se recomienda para las exposiciones atmosféricas. Aunque, también se recomienda comúnmente para áreas donde existe tráfico de personal, estos materiales proporcionan una cubierta excepcionalmente pesada, estable y que no afecta al metal sobre el cual se pone.

Recubrimientos Superponibles. Los polímeros sintéticos pueden utilizarse como "cubiertas" de equipo para prevenir el intercambio de humedad de este con la atmósfera.

5.5.10. Recubrimientos Antiobstruyentes.

Ya que los procesos de vida de los organismos vivos, con frecuencia, inducen o aceleran el deterioro de los recubrimientos, existe un amplio rango de aditivos diseñados para matar o reducir la actividad de bacterias y otra vida micro o macroscópica.

Como el acero es anódico con respecto a los óxidos de cobre en agua salada, los recubrimientos de botes o fondos de barcos que contienen cobre requieren de un recubrimiento eléctrico aislante sobre el acero. Los compuestos de cobre no deben utilizarse sobre el aluminio, ya que la diferencia galvánica es siempre mayor para el acero.

Los biocidas incluyen varias sales de metales, como arsénico, estaño, plomo y zinc, así como venenos orgánicos. Los fungicidas incluyen muchos de los listados anteriormente, además de compuestos como el clorometil oxetano, compuestos de clorofenil, sulforil/sulfonil piridina y muchos otros. Dichos compuestos previenen el ataque o el crecimiento de los organismos.

Los recubrimientos antiobstruyentes han sido utilizados por siglos en los fondos de barcos y algunas formulaciones de cobre desarrolladas desde hace mucho tiempo aún se siguen utilizando. Los nuevos compuestos incluyen las variaciones de ésteres orgánicos con estaño. Los desarrollos recientes de la formulación en las que las sales del metal son unidas a un control de la molécula orgánica y su velocidad de disolución en agua aumentada, mejora los niveles de concentración en la superficie vs tiempo, prolongando así la vida del recubrimiento.

Los fungicidas se emplean ampliamente en recubrimientos orgánicos con base acuosa para controlar el ataque bacteriano en contenedores, después de que el recubrimiento ha sido aplicado.

5.5.11. Recubrimientos Compuestos o Multifásicos.

Varias combinaciones de recubrimientos primarios,

recubrimientos de polímeros sintéticos, de fabricación inorgánica y recubrimientos de película densa se usan para dar protección contra los fluidos y gases corrosivos, por lo regular a tanques y recipientes. Una membrana de material polimérico puede ser puesta sobre las superficies interiores de un tanque de acero que ha sido alineado con ladrillo ácido, como el que se usa para resistir el calor y el impacto en los tanques desoxidados de acero dulce. La figura 5.17 muestra detalladamente un revestimiento de multicapas que ha sido puesto en el interior de una torre lavadora de gas.

Los recubrimientos compuestos son típicos para sistemas de tuberías.

5.5.12. Materiales Ricos en Zinc.

Debido a sus singulares méritos en el control de la corrosión en muchos ambientes y su uso a nivel mundial, se necesita una atención especial para los materiales orgánicos e inorgánicos

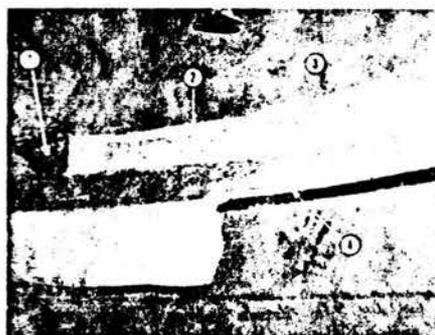


Figura 5.17. Detalles de un recubrimiento instalado dentro de una torre lavadora de gas. Las capas son: (1) recubrimiento epóxico con fluoruro de silicio, (2) fibra de vidrio, (3) fibra de vidrio saturada con recubrimiento epóxico y (4) material envolvente y sellante.

que contienen zinc. Estos materiales exhiben una excelente protección del acero cuando se usan como recubrimientos primarios y en muchos casos, como sistemas totales de recubrimientos.

El zinc funciona como material anódico para dar protección catódica al acero en las áreas en donde la humedad ha penetrado al recubrimiento (poros, rayadura, etc.). Para realizar esto, las partículas del zinc deben estar en contacto eléctrico unas con otras y con el sustrato para dar la trayectoria metálica de la celda. Por esto, la carga o el contenido metálico del recubrimiento debe ser muy alto. El espesor del recubrimiento metálico debe ser de alrededor de $70\mu\text{m}$ (3 mils).

El aglutinante de las pequeñas esferas de zinc puede ser de tres tipos:

1. Silicato inorgánico producido por la evaporación de agua,
2. Silicato inorgánico producido por la reacción con agua, o
3. Resina orgánica resultado de la pérdida del solvente.

El recubrimiento original, de este tipo, usa un silicato de sodio acuoso como vehículo (Tipo 1, de los mencionados arriba) con un enjuague final de ácido fosfórico. Tal procedimiento no es tan sencillo de utilizar, como el mezclado simple, la aplicación y el secado del recubrimiento estándar de paquete doble (zinc y vehículo). Sin embargo, el recubrimiento tiene ciertas características que no han podido ser duplicadas por el producto final.

Los sistemas de paquete doble del primer tipo, secados por la evaporación del agua contenida en el vehículo, deja el silicato aglutinante el cual conserva las partículas de zinc en su lugar.

El Tipo 2, producido con paquete doble contiene etil silicato y etanol como vehículo. El etil silicato reacciona con la humedad del aire, una vez que el recubrimiento ha sido aplicado. El etanol se forma por la reacción y se evapora rápidamente dejando el silicato aglutinante. Este producto tolera más la humedad que el Tipo 1, pero no debe utilizarse en donde la humedad relativa es muy baja.

La tercera categoría de recubrimientos ricos en zinc utiliza comúnmente polímeros orgánicos como vehículos, los cuales se secan por la evaporación del solvente. En ellos se usan acrílico, caucho clorado y resinas epóxicas catalizadas.

Como indicación, estos materiales sirven muy bien como recubrimientos primarios, para recubrimientos orgánicos totales. La corrosión por envejecimiento por deslizamiento se reduce en los lugares en que el sustrato es expuesto a los elementos. Debe tenerse mucho cuidado en la selección y aplicación de los recubrimientos totales, para asegurar que la resina es compatible con el zinc, cuando hay humedad y que la adhesión sea adecuada, es decir que se lleve a cabo con una buena continuidad.

Todos los recubrimientos ricos en zinc requieren de una buena preparación de la superficie. Los materiales son los mejores recubrimientos primarios que se usan sobre metales galvanizados.

Los recubrimientos ricos en zinc son particularmente buenos en ambientes clorados (áreas marinas, etc.) en donde los productos de corrosión forman una película dura y densa sobre el zinc. Estos recubrimientos no deben utilizarse en atmósferas sulfurosas con o sin recubrimientos totales.

En muchos casos, los recubrimientos ricos en zinc tienen una resistencia suficiente para ser utilizados sin recubrimiento total o para que la aplicación de este último pueda aplazarse por un período de tiempo apreciable.

5.5.13. Recubrimientos Inorgánicos (No Metálicos).

Los recubrimientos inorgánicos incluyen numerosas clases de materiales, entre ellas podemos citar a los concretos hidráulicos (cementos), cerámicas, arcillas, vidrio, carbón, silicatos y otros. Sobre bases volumétricas, podemos decir que de ellos los más utilizados son los concretos hidráulicos, pero como son tan comunes, que frecuentemente no se identifican como recubrimientos.

5.5.13.1. Concreto Hidráulico.

Los concretos se usan para recubrir el interior y el exterior de tubos, especialmente si se van a utilizar en construcciones o se van a sumergir, como las líneas de agua o de alcantarillado. Los tubos de hierro fundido, de hierro dúctil o de acero pueden protegerse con un proceso durante el cual el tubo es girado sobre el centro de su eje longitudinal mientras se le rocía una mezcla molida sobre su superficie interna, formandose sobre ella una película densa y uniforme. Después del curado apropiado, el tubo se transporta cuidadosamente, este recubrimiento puede proteger el interior del tubo contra el ataque de agua y muchos otros líquidos y gases corrosivos.

El recubrimiento de concreto se puede obtener solo en el exterior o en ambos lados de un tubo delgado de acero (tubo

cilíndrico).

El concreto se aplica a las superficies externas de los tubos para protegerlos del suelo o el agua, en los cuales serán sumergidos. En el caso de las tuberías enterradas para transportar gas o hidrocarburos líquidos, por ejemplo, el concreto puede mezclarse con baritinas u otros materiales pesados para conferirle una flotabilidad negativa. También puede mezclarse con materiales orgánicos para mantener un pH anticorrosivo sobre las superficies de acero.

5.5.13.1. Cerámicas.

Las cerámicas también pueden utilizarse en las mismas aplicaciones que los concretos hidráulicos, pero por lo regular se usan para dar resistencia contra el calor y/o contra el ataque de gases calientes o con alta velocidad. Por lo que se usan en tubos de escapes, que emiten gases calientes, como las boquillas de cohetes, revestimientos de hornos y aplicaciones similares.

Dentro de este grupo podemos considerar a los concretos especiales, derivados de los cementos resistentes al ácido. Estos morteros pueden aplicarse al acero o al concreto para mejorar notablemente su resistencia a los ácidos, a los álcalis y al calor. Pueden ser reforzados con malla de alambre para sostener el pesado espesor, que normalmente se aplica. Pueden utilizarse como pisos, interiores de tanques, en secadores y otros equipos de proceso.

5.5.13.3. Vidrio.

El vidrio, un material que se ha comenzado a producir con una variedad de formulaciones nuevas e interesantes, es fácil de limpiar pero difícil de reparar.

Los tubos de vidrio o recubiertos de vidrio, así como las válvulas, las bombas y los recipientes de todos los tipos se utilizan ampliamente en las industrias química, farmacéutica y alimentaria.

Los recubrimientos de vidrio se pueden conseguir, básicamente en dos tipos y con varios grados de integridad. Como de la base del vidrio borosilicato se derivan los recubrimientos, estos materiales pueden usarse arriba de 175°C en la mayoría de las mezclas de ácidos.

Los recubrimientos de porcelana se usan extensivamente por su excelente estabilidad atmosférica, pero no se utilizan normalmente para servicios de inmersión de ningún tipo. (9)

5.5.14. Tratamientos de Superficies Metálicas.

Los tratamientos de superficies metálicas, convierten la superficie del metal base en una superficie nueva, uniforme y normalmente más resistente a la corrosión. Algunos se usan como preparados, pero muchos otros sirven como base para tratamientos químicos subsecuentes o como sobre recubrimiento. Los tratamientos de superficies más comunes son los siguientes.

5.5.14.1. Anodizado.

El aluminio siempre es encajonado en una película delgada de óxido que le proporciona al metal su propia protección. La

película puede ser fortalecida o se le puede incrementar su espesor, al convertir el metal en un ánodo en un baño de ácido y descargando corriente a partir de él.

El aluminio conectado al polo positivo de una fuente de corriente e inmerso en una solución electrolítica con un cátodo de plomo o grafito se reviste con alúmina de acuerdo a la reacción



este revestimiento está formado por una capa límite de aproximadamente 8 a 13 Amp. por volt, la cual no es porosa, pero se cubre por una capa porosa de alúmina anhidra (el diámetro de los poros es de 100 a 400 Å). El espesor del revestimiento depende no solo de la cantidad de electricidad (coulombios) empleada en la operación, sino también de la naturaleza del electrolito y, por consiguiente, de la habilidad de éste para redissolver el depósito formado; también depende de la temperatura, además controlando las condiciones de la electrólisis, es posible obtener revestimientos de espesor y dureza predeterminados.

Si el trabajo de oxidación se deja en agua a 100°C por unos cuantos minutos, el anhídrido de aluminio formado se transforma en boemita (alúmina hidratada), los poros se sellan y por eso pierde su porosidad.

El electrolito, generalmente, más empleado para esta electrólisis es una solución de 15-20% de H₂SO₄ (teniendo una gravedad específica de 98% H₂SO₄). La densidad de la corriente es aproximadamente de 1 a 2 amp/dm². Bajo estas condiciones, a 20°C, una capa de 12 a 15 micrones de espesor se deposita en 30 minutos. Esta capa es incolora pero puede teñirse antes de ser sellada,

mediante baños de colorantes, inorgánicos u orgánicos. Este recubrimiento proporciona una excelente protección para medios corrosivos con un pH entre 4.5 y 8.5.

Como nos podemos dar cuenta, el ambiente del ánodo es altamente oxidante. Esta condición de anodizado produce una muy pesada película de óxido sobre el metal. Los espesores nominales de la película de óxido van de 1 a 25 μ m (0.04 a 1 mil). Las películas deben ser coloreadas durante su formación o tratadas después de ello, para incrementar su estabilidad. Estas películas pesadas producen una gran resistencia a la permeación de los iones contenidos sobre la superficie. Muchos materiales de construcción de aluminio, partes de coches y otras estructuras son tratadas de esta forma. (10)

Otros metales, como el titanio, el zirconio y los aceros inoxidable pueden, también, ser "anodizados", pero el término se reserva normalmente para el tratamiento del aluminio.

5.5.14.2. Fosfatizado.

El tratamiento más exitoso del acero, se hizo por fosfatizado. El acero es desoxidado o limpiado de alguna otra forma e inmediatamente puesto en un baño de ácido fosfórico caliente que contiene zinc y algunas veces sales de manganeso, más otros aditivos selectos. Formándose así un recubrimiento de fosfatos de hierro y zinc. Después de esto el acero se retira del baño, se lava y se seca. La película resultante tiene un espesor de 1 a 10 μ m (0.04 a 0.5 mil), pero presenta poca resistencia a la corrosión, por lo que se le debe dar un tratamiento de cromado con

la finalidad de que dicha resistencia mejore. (11)

El fosfatizado es un tratamiento de superficie metálica que provee un recubrimiento metálico insoluble de cristales de fosfatos, que se adhieren fuertemente al material base. Por lo que este recubrimiento afecta la apariencia, la dureza de la superficie y las propiedades eléctricas del metal al que se aplique. Provee sólo un poco de resistencia a la corrosión, pero no la suficiente para ser empleado como recubrimiento final, en la mayoría de las atmósferas corrosivas.

El proceso de fosfatizado comenzó en Inglaterra, a principios de los años veintes, con el uso de soluciones de ácido fosfórico para producir películas sobre el acero. Después se utilizó una reacción menos violenta y que proporcionaba un mejor recubrimiento, que constaba de una solución de ácido fosfórico con fosfato diácido ferroso, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Finalmente se desarrolló un proceso que incluía el uso de soluciones de ácido fosfórico con fosfato diácido de zinc (II), $\text{Zn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y fosfato diácido de manganeso (II), que depositaban cristales de fosfato de zinc y manganeso, respectivamente.

Actualmente las soluciones de fosfatizado contienen uno o más de los fosfatos de hierro, manganeso o zinc diluidos en ácido fosfórico. Algunas veces, contienen fosfatos de los metales alcalinos o alcalinotérreos y aceleradores. El tiempo de proceso consta, por lo regular, de uno o varios minutos.

Formación del Recubrimiento. Los procesos comerciales de fosfatizado son complejos y con patente, por lo que es difícil

clasificar con precisión las reacciones que tienen lugar durante la deposición del fosfato que forma el recubrimiento. Sin embargo, se pueden utilizar ecuaciones simplificadas, para ilustrar las bases químicas. Cuando una superficie ferrosa es tratada con una solución fosfatizante, se ve atacada por el ácido fosfórico libre:



El hidrógeno se libera y el hierro se introduce en la solución como un fosfato ferroso primario. Los fosfatos primarios de zinc, manganeso o hierro, que se encuentran presentes como constituyentes del baño, se hidrolizan rápidamente en la solución acuosa y producen los fosfatos metálicos secundarios y terciarios menos solubles, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

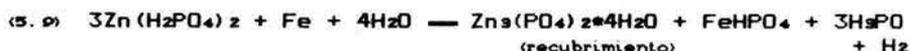


donde M = zinc, manganeso o hierro.

El ácido fosfórico que se produce en estas reacciones se consume en la disolución del hierro de la parte tratada. El equilibrio cambia de izquierda a derecha debido a la precipitación de los fosfatos secundarios y terciarios, poco solubles. En este proceso, el ácido fosfórico se consume en primer lugar, por la superficie metálica, en donde ocurren los disturbios concomitantes del equilibrio. Los fosfatos metálicos insolubles precipitan sobre la superficie del hierro formando una capa cristalina, completamente adherente y altamente entrelazada.

Inicialmente, el baño de fosfatizado contiene sólo los fosfatos primarios de zinc o manganeso. Sin embargo, como el acero es

procesado, entra a la solución el hierro como fosfato ferroso primario. Inevitablemente, el fosfato ferroso precipita, durante el proceso, junto con los fosfatos de zinc o de manganeso. Una ecuación que represente la formación de un recubrimiento de fosfato de zinc sobre una superficie de hierro, puede expresarse de la siguiente manera:



Los fosfatos de hierro, zinc, zinc-calcio y manganeso, son los que se aplican con mayor frecuencia, como recubrimientos fosfatados, cada uno de ellos tiene distintas características y áreas de aplicación. Los aceleradores se incluyen en el proceso para producir recubrimientos de mayor calidad, para reducir el tiempo de proceso, y para prolongar la vida efectiva del baño, por varios meses.

La película porosa de fosfato se puede selladar con aceites para resistir la corrosión o servir como una base excelente para algún recubrimiento.

También puede producirse el fosfatizado del zinc, el cadmio y el aluminio. (12)

5.5.14.3. Cromado.

La oxidación de una superficie metálica limpia incrementa enormemente la resistencia a la corrosión de la superficie, si se forma un óxido metálico doble, delgado y continuo. El método más satisfactorio para producir esta película es el tratamiento de lavado con ácido crómico de un tipo u otro. El aluminio, el zinc y

el cadmio son tratados frecuentemente en esta forma y el color dorado que se obtiene se observa en artículos comerciales. (13)

Al igual que el fosfatizado, la película producida sirve como una excelente base para recubrimiento. Ya que, resulta difícil adherir la mayoría de los recubrimientos poliméricos a superficies que no se les ha dado un tratamiento previo. Las películas delgadas de cromo o del sustrato del óxido metálico son de espesores de sólo 0.01 a 0.2 μm y pueden ser removidas por abrasión.

Los baños para tratamientos de cromado tienen dos ingredientes comunes, por ejemplo, el cromo hexavalente y un ácido mineral. Algunos contienen sustancias orgánicas o inorgánicas como activadores. Durante la inmersión, el metal reacciona con el ácido mineral, por lo regular ácido sulfúrico, dando como resultado un incremento del pH de la solución que se encuentra inmediatamente adyacente a la superficie. Al mismo tiempo, el cromo hexavalente se reduce a la forma trivalente. A un pH adecuado, el cromo trivalente y algo del cromo hexavalente precipitan sobre la superficie del metal como un complejo de cromato de cromo.

Se tiene una gran variedad de procesos para producir películas protectoras, con un rango de colores que van desde el amarillo iridescente hasta el café, verde olivo y negro. Cuando, en contacto con agua, la parte de la película correspondiente al cromo hexavalente se desprende lentamente, forma una fuente local de cromato disuelto que inhibe la corrosión de las superficies metálicas. La parte de la película de cromo trivalente insoluble da una protección general por exclusión, a una gran extensión, a

la humedad de las superficie metálica.

La conversión de recubrimientos del tipo de los cromatos se produce, en primer lugar, por un proceso simple de inmersión. Las películas recién formadas, por el proceso de inmersión son frágiles, blandas y susceptibles al daño por abrasión y trasportación. Se requiere de un período de 12 a 24 horas, para que la película alcance la suficiente dureza que le permita ser transportada normalmente al almacén. Los recubrimientos de cromatos pueden ser secados u horneados a 66°C y deshidratados por disecación en presencia de sílica gel o cloruro de calcio. Un calentamiento excesivo, arriba de los 66°C, reduce el valor protectivo del recubrimiento. La película de cromatos es porosa y absorbente, cuando está recién hecha, por lo que puede colorearse.

Existe una gran cantidad de patentes relacionadas con el tratamiento de cromado del zinc y del cadmio, muchas de las cuales se llevan a cabo por inmersión. Las soluciones de los tratamientos pueden contener ácido crómico; uno o dos ácidos minerales, como sulfúrico y nítrico y con frecuencia un agente activante. El espesor y el color de la película depende de la composición de la solución, de la temperatura, del pH y del tamaño de la parte tratada. Generalmente las soluciones preparadas a 21-38°C y un pH de 1.5 o menor, producen un recubrimiento de claro lustroso a amarillo iridescente, que tiene una moderada resistencia a la corrosión. Las soluciones preparadas a bajas concentraciones, a 16-32°C, y que operan a un pH de 1.0-3.5 producen un medio que dá películas densas con un rango de color que va del amarillo

iridescente a café o negro, y que tienen una mayor resistencia a la corrosión.

El tratamiento de cromado para el aluminio produce un recubrimiento amorfo con un rango de color de amarillo oro a ligeramente bronceado. Este recubrimiento es conductor de la electricidad, da una mejor resistencia a la corrosión y contribuye a la mejor adhesión de la pintura. Este tipo de recubrimiento puede aplicarse por aspersión, inmersión, brocha o rodillo. Se usa por lo regular en componentes de aviones, uniones, herramientas, ventanas, defensas y componentes electrónicos.

Los recubrimientos primarios lavables son un tipo especial de solución de cromato, utilizada para producir la conversión del recubrimiento. Una solución de ácido fosfórico que contiene sales de cromato y pequeñas cantidades de resina de vinil butiral se rocía sobre la superficie del metal limpio (acero, aluminio, etc.) y reacciona con la aleación de la forma anteriormente descrita. Aunque el tratamiento no sirve como un recubrimiento primario, la película que se forma es una base excelente para la mayoría de los recubrimientos. (14)

5.5.14.4. Oxidos Metálicos.

El afil del acero ha sido utilizado como un proceso para producir un óxido capaz de proteger el acero. Cuando se engrasa o se le dá mantenimiento, la película delgada de óxido previene la herrumbre del acero provocada por la atmósfera. Por lo que los recubrimientos compuestos de óxido pueden producirse por la exposición de una superficie de acero limpia a un vapor seco, a

los álcalis fuertes, a los cianuros o a un gran número de otros químicos. Las películas deben ser muy delgadas y continuas para tener las propiedades mecánicas y físicas deseadas.

Los recubrimientos compuestos de óxido se han utilizado para proteger cobre, níquel, estaño y oro.

5.5.14.5. Recubrimiento Reforzante (Difusión).

Ciertos materiales pueden difundirse a través de la superficie de un metal y producir un producto superficial completamente diferente al metal original. Los materiales resistentes de carbón, aluminio, las sales de cromo, boruros o siliciuros se empaquetan, alrededor del objeto, dentro de un contenedor. La masa se calienta a una temperatura apropiada, por cierto tiempo de acuerdo con el material empleado, para el carbón, aluminio, cromo o boro, con la finalidad de que este se difunda a través de la superficie del metal, y forme una superficie dura, resistente a la abrasión y a la erosión, que tiene por lo regular un espesor de 20 a 50 μm (1 a 2 mils). Estos recubrimientos se usan para dar resistencia a la abrasión y/o resistencia a las temperaturas elevadas a las cuchillas y a las paletas de las turbinas de gas, además de ser utilizados en otros usos similares. Los recubrimientos de aluminio se usan frecuentemente sobre las superficies, de los intercambiadores de calor, expuestas al ataque por gases sulfurosos (H_2S , SO_2 y SO_3).

5.5.15. Recubrimientos Metálicos.

Para muchos servicios accidentados, se prefiere el uso de

recubrimientos metálicos. Estos deben considerarse en servicios en donde el impacto severo, la abrasión o las altas temperaturas sean parte de los elementos empleados en la selección de materiales.

Aunque se sabe que los recubrimientos metálicos, sobre un sustrato metálico, tienen que ser electroquímicamente anódicos, catódicos o neutros, esto no tiene importancia si se realiza y se mantiene una cubierta completa. Sin embargo, si algún electrolito entra en contacto con los dos elementos (recubrimiento y metal), la corrosión puede acentuarse o acelerarse dependiendo de las condiciones existentes (figura 5.18).

5.5.15.1. Revestimiento (Electrodeposición).

Para este caso puede utilizarse con buenos resultados, una de las cinco reacciones catódicas básicas, (deposición de un metal).

La parte que se va a recubrir es sumergida como cátodo, en una solución de iones metálicos para ser revestida. La corriente se lleva a través de un ánodo apropiado dentro del electrolito, mientras que el metal soluble reviste al cátodo. La densidad de corriente es alta, por lo que el proceso de revestimiento se realiza rápidamente. Los revestimientos metálicos más comunes son el cromo, el níquel, el cobre, el cadmio y el zinc.

El revestimiento de cromo, que se usa en partes de automóviles y otros artículos que requieren protección bajo condiciones difíciles, es un recubrimiento de tres capas. Esto es, primero se aplica de forma casi instantánea una capa de cobre, seguida de un recubrimiento de níquel que comprende la mayor parte del espesor final y por último se aplica una capa delgada y dura del brillante

chromo, obteniéndose un espesor total de 25 a 50 μm (1 a 2 mils).

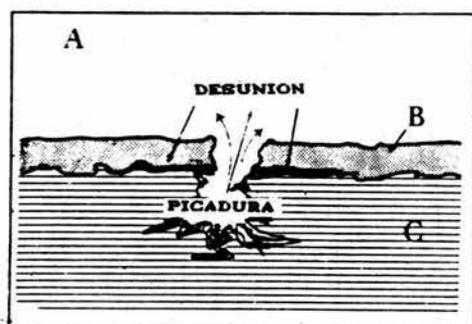


Figura 5.18. Esquema de un hoyo en un recubrimiento catódico, provocado por la picadura en la base del metal. Se muestra, aproximadamente las regiones en donde los iones dejan la base del metal: (A) electrolito; (B) capa catódica y (C) metal. La desunión que se indica puede o no, ocurrir.

Cuando la cubierta es perforada, puede ocurrir la aceleración de la corrosión del sustrato de acero, ya que este es anódico con respecto al cromo. También puede ocurrir un ataque severo, debido a los efectos adversos que tiene el área del electrodo sobre la celdad de corrosión (Capítulo 2).

Los recubrimientos electroplateados fallan normalmente por fractura, provocada por la expansión y la contracción repetida o por el impacto.

Uno de los problemas asociados con los revestimientos es la presencia de una gran cantidad de hidrógeno sobre la superficie

catódica. Algo de este hidrógeno puede entrar al sustrato metálico (normalmente acero). Para los aceros con baja resistencia (dureza R_c22), rara vez resulta un problema la presencia de hidrógeno, pero los aceros con alta resistencia pueden fragilizarse gravemente y fallar de forma prematura. Cuando se encuentran presentes en el baño de inmersión los venenos para la desaminarilización del hidrógeno (S, CN, As, Cd, etc.), la cantidad de hidrógeno absorbido puede ser muy alta. Si se notan daños inmediatos, las partes pueden ser horneadas a temperaturas cercanas a 200°C (400°F), con la finalidad de desalojar del metal la mayor cantidad posible de hidrógeno.

Para formas pequeñas e intrincadas como tornillos y pernos, el revestimiento metálico debe aplicarse por revestido en barril. Un barril rotatorio que contiene las partes que se desean revestir es girado lentamente dentro del electrolito, mientras se descarga corriente sobre sus partes internas móviles.

El revestido con cepillo o brocha, se realiza también, particularmente para cubrir superficies pequeñas. En este caso, una almohadilla absorbente que conserva el electrolito se envuelve al rededor del ánodo y el cepillo se mueve sobre la superficie catódica.

Hoy en día, el revestimiento de cromo se aplica también sobre los materiales plásticos (principalmente en los ABS) en usos en donde se requiere una superficie brillante.

Las películas electroplateadas de oro, platino y plata se usan en contactos eléctricos y equipo electrónico. Ya que el oro y platino resiste la oxidación, son importantes en contactos en

donde pasan pequeñas corrientes que pasan a través de conexiones e interruptores.

Los recubrimientos de platino en la protección catódica con ánodos de corriente impresa, permite el uso de voltajes y densidades de corriente más altos que los que se pudieran utilizar con otros metales. Los recubrimientos reflectantes de plata tienen que ser protegidos con películas transparentes contra la oxidación y la sulfidación. El oro, el rodio y el osmio se utilizan ampliamente como recubrimientos para partes pequeñas de equipo industrial, como medidores y válvulas.

La lamina de oro, no electroplateada, se usa para señalamientos industriales y como recubrimiento de techos, especialmente de edificios gubernamentales, ya que tiene una excelente resistencia al ataque atmosférico.

5.5.15.2. Recubrimiento por Inmersión.

El galvanizado, el estañado y el aluminizado se utilizan para limpiar el acero y sumergirlo en un baño controlado de metal fundido para recubrirlo. El recubrimiento de zinc, producido actualmente, es aleado al acero como se indica en la figura 5.19.

Debido a que el zinc es el metal más catódico o anódico, que puede electrodepositarse en solución acuosa, se utiliza para recubrir metales ferrosos. Tiene la ventaja de ser relativamente barato y poder ser aplicado a sustratos ferrosos por muchos métodos de electroplateado. (15)

El zinc protege al acero por acción de "sacrificio". En el par zinc-hierro (par galvánico), el zinc se corroe mientras que el

hierro o el acero permanece catódico y por lo tanto no se



Figura 5.19. Zonas en las que ha sido recubierto un acero por tratamiento térmico galvanizado: capa exterior, esencialmente zinc puro; capa interior, aleación de zinc-hierro.

disuelve. La protección que ofrece un recubrimiento de zinc no depende de que este sea continuo, por lo regular si existen poros u otras discontinuidades, la protección se da a lo largo de la superficie, si el zinc se encuentra inmediatamente a la izquierda del defecto. El término "inmediatamente" es algo vago, por lo que es más preciso decir, que la protección se da si el zinc se encuentra a uno o dos milímetros de la parte dañada por la herrumbre.

Como se dijo anteriormente, el zinc puede electrodeponerse, por muchos tipos de inmersión o baños, entre ellos se encuentran las soluciones de cianuro, sulfato y fluorborato. Dentro de estas la más antigua, y muy probablemente, la que con mayor frecuencia se utiliza, es la de cianuro. Esta solución se emplea para formas irregulares. Los recubrimientos con "brillo de espejo" se producen tanto con baños de ácido como por baños de cianuro, con el uso de agentes adecuados. La tabla 5.7 muestra la solución con la que se

pueden conseguir recubrimientos semibrillantes o mates.

El control de la relación total de cianuro de sodio y el zinc que se va a disolver, es importante en la producción de los recubrimientos semibrillantes y crítica para mantener una eficiencia uniforme de cátodo. Puede utilizarse una relación baja para temperaturas comprendidas entre 85 y 93°F, las relaciones altas se pueden utilizar a temperaturas elevadas. Resisten densidades de corriente mayores a 75 amp./ft². un incremento en la concentración de cianuro de sodio, al igual que un incremento en la densidad de corriente del cátodo, puede disminuir la eficiencia de éste. Un incremento en la concentración del cianuro de zinc o en la temperatura, aumentará la eficiencia del cátodo. La concentración del hidróxido de sodio no es crítica, pero si este no se encuentra presente o se encuentra pero en una cantidad no adecuada, puede hacer que disminuya la eficiencia del cátodo. Las altas concentraciones de hidróxido de sodio mejoran la conductividad y tienden a mejorar la distribución del recubrimiento. Los carbonatos, sulfatos y cloruros disminuyen la eficiencia del cátodo. El sulfito ácido de sodio y el sulfuro de sodio, que se utilizan para remover las impurezas metálicas, también disminuyen la eficiencia del cátodo, especialmente cuando se usan en exceso.

Para obtener recubrimientos semibrillantes es necesario mantener la solución pura. El plomo, el estaño, el cadmio o el cobre, ~~obscurecen~~ y opacan al recubrimiento, el efecto dañino de estos agentes, puede eliminarse adicionando una solución concentrada de sulfuro de sodio. Los efectos que causa una gran

concentración de estos agentes, especialmente de cobre, requieren de un tratamiento de purificación con polvo de zinc y filtración, para ser eliminados.

Los recubrimientos completamente brillantes, se obtienen al adicionar agentes como ácidos fenolsulfónicos, metil-etil cetona, óxido molibdénico y piperona.

El baño de sulfato, también se utiliza ampliamente. En la tabla 5.8 se muestran las sustancias que componen la solución de un baño de sulfato. Los límites de la composición no son críticos, excepto para la concentración de los agentes que se adicionan para dar ciertos efectos.

Sustancias como glucosa, dextrina, gelatina, melaza, β -naftol, cresoles sulfonados, sulfato ácido de sodio, silicio, cafeína y glicerina, se han utilizado como agentes para inhibir la picadura. La adición de estos agentes se controla mediante una inspección regular de la solución.

Muchas de las impurezas metálicas se depositan sobre los ánodos por desplazamiento, cuando no se trabaja, por lo que es necesario limpiarlos de forma periódica. No se debe adicionar nitratos, ya que disminuyen la eficiencia del cátodo.

El baño de flourborato no es tan utilizado como el de sulfato, pero se caracteriza porque permite el uso de densidades de corriente anódica y catódica muy altas. La adición de agentes especiales se hace cuando se desea un recubrimiento fuerte o de grano fino. Los componentes de este tipo de baño se dan en la tabla 5.9. (16)

El aluminio se aplica sobre hojas delgadas o carretes

almacenados, sólo sobre superficies pulidas. El recubrimiento es continuo y muy estables en atmósferas marinas y a temperaturas muy altas. El aluminio no debe ser considerado como un recubrimiento anódico (de sacrificio) del acero.

TABLA 5.7. BAÑO DE CIANURO, (RECUBRIMIENTO DE ZINC).

	RECUBRIMIEN- TO MATE	RECUBRIMIEN- TO SEMIBRI-- LLANTE SOLU- CION PARA -- TANQUE.	RECUBRIMIEN- TO SEMIBRI-- LLANTE SOLU- CION PARA -- BARRIL.
Cianuro de zinc Oz/gal	8	10	11
Cianuro de sodio oz/gal	3.5	7	10
Hidróxido de sodio oz/gal	7	10	13
Zinc metálico oz/gal	4.5	5.5	6
Cianuro total oz/gal	9	15	18
Sulfuro de sodio oz/gal	0	0.025	0.025
Relación de NaCN y Zn	2.0-2.5	2.5-3.0	2.7-3.2
Temperatura, °F	85-100	85-100	85-100
Densida de corriente catódica, amp/ft ²	10-20	10-75	5-75
Anodos	Zinc de alta pu- reza	Zinc de alta pu- reza	Zinc de alta pu- reza
Densida de corriente anódica, amp/ft ²	10-20	10-100	85-100
Eficiencia de corriente anódica (Zn ⁺⁺), %	100	100	100
Eficiencia de corriente catódica (Zn ⁻⁻), %	80-90	65-90	60-85
Velocidad de deposición, in/hr	0.0006-0.0012	0.0006-0.005	0.0003-0.003

5.5.15.3. Revestimiento.

La películas metálicas de diferentes espesores pueden ser aplicadas sobre otros metales con los siguientes métodos. Estos

TABLA 5.8. BAÑO DE SULFATO DE ZINC.

	RECUBRIMIEN- TO MATE	RECUBRIMIEN- TO SEMIBRI-- LLANTE SOLU- CION PARA -- TANQUE.	RECUBRIMIEN- TO SEMIBRI-- LLANTE SOLU- CION PARA -- BARRILL.
Sulfato de Zinc oz/gal	32	48	32
Cloruro de amonio oz/gal	2	4	0
Acetato de sodio oz/gal	0	2	2
Sulfato de aluminio oz/gal	4	0	4
Regaliz, oz/gal	0.1	0	0.1
Glucosa, oz/gal	0	16	0
pH	3.5-4.5	3.5-4.5	3.5-4.5
Temperatura, °F	75-95	75-95	75-95
Densidad de corriente catódica, amp/ft ²	10-100	10-100	10-100
Agitación (requerida para una densidad de corriente mayor a 30 amp/ft ²)	si	si	si
Anodos (empaquetados)	Intermedios o de alta - pureza	Intermedios o de alta - pureza	Intermedios o de alta - pureza
Eficiencias del ánodo y del cátodo (Zn ⁺⁺), %	99-100	99-100	99-100
Velocidad de deposición, in/hr	0.00075-0.0075	0.00075-0.0075	0.00075-0.0075

procedimientos han sido diseñados para obtener una mejor resistencia a la corrosión.

Soldadura de Gas o de Arco. En la soldadura de arco o de gas, se depositan capas relativamente densas de soldadura sobre las

superficies, tanto por métodos manuales como por métodos

TABLA 5.9. BAÑO DE FLUORBORATO DE ZINC.

Flourborato de zinc.....	40 oz/gal.
Cloruro de amonio.....	3.5 oz/gal.
Flourborato de amonio.....	5 oz/gal.
Regaliz o jarabe de maíz.....	0.1 oz/gal.
pH (Colorimétrico).....	3.5-4.0
Temperatura.....	80-100°F.
Densidad de corriente catódica.....	25-800 amp/ft ² .
Agitación.....	Si.
Anodos (Empacados con fibra de vidrio, si se desea).....	Zinc puro, fundido.
Relación de Anodo/Catodo.....	1:1 o 2:1
Eficiencias del ánodo y del cátodo (Zn++).....	100%.
Velocidad de deposición.....	0.0015-0.060 in/hr.

mecánicos. El interior de los digestores de pulpa u otros recipientes a presión requieren una aleación compuesta para resistir las condiciones químicas para las que han sido construidos.

Laminado por Deposición. En el laminado por deposición, las capas de dos metales son acopladas por pesados rodillos después de que las superficies han sido completamente limpiadas y tratadas. El revestimiento tiene un espesor que del 5 al 10% del espesor del acero común. En este método pueden presentarse algunas áreas sin deposición.

Deposición por Explosión. En la deposición por explosión, se

conectan un metal común y un recubrimiento metálico, para dar lugar a un cierre apropiado con el material recubriente arriba.

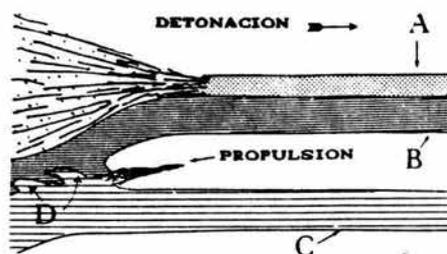


Figura 5.20. Forma en que se une por explosión una capa de metal recubierto a un metal sin recubrir. (A) explosivo, (B) metal recubierto, (C) metal sin recubrir y (D) vista de la forma en que la explosión tiende a unir la capa de revestimiento al metal sin recubrir.

Se coloca una capa de explosivo sobre el recubrimiento metálico. Cuando la explosión es activada, resulta del impacto una onda que mezcla los dos materiales, como se muestra en la figura 5.20. (17)

Para obtener una unión metalúrgica entre dos metales, los átomos de cada metal deben estar limpios y lo suficientemente cerca para que sus fuerzas normales de interacción y atracción atómicas formen dicha unión. Las superficies de los metales y de las aleaciones no deben estar cubiertas con películas de óxidos, nitruros o de gases absorbentes. Cuando se encuentran presentes estas películas, las superficies metálicas no pueden unirse satisfactoriamente.

En el soldado por fusión, las superficies de los dos metales

son fundidas por calentamiento y las capas superficiales contaminadas son limpiadas y unidas a la superficie fundida. Sin embargo, los procesos de soldado por presión no involucran la fusión para remover las superficies contaminadas. En vez de esto, las piezas de trabajo sufren una deformación plástica, por lo regular, después de que han sido calentadas a una temperatura apropiada, lo cual rompe las películas superficiales y crea nuevas áreas no contaminadas en donde puede realizarse la unión. El soldado por presión en frío, el soldado inercial y el soldado ultrasónico son variaciones de este proceso. (18)

La unión por explosión es un proceso de soldado por presión en frío en el que la película superficial contaminada es expulsada, en forma de plástico, del metal de origen como resultado de la alta presión de la colisión de los dos metales. Se forma una onda entre las dos placas metálicas, si el ángulo y la velocidad de colisión se encuentran en el rango requerido para la unión. Las películas superficiales contaminantes son dañinas para el establecimiento de una unión metalúrgica, ya que son extendidas por todo el trayecto que sigue la explosión. Las placas metálicas, que son limpiadas de cualquier película superficial por la acción de la explosión, se unen en un punto interno, debido a la alta presión que se genera cerca del punto de colisión.

Angulo Necesario para Realizar la Unión por Explosión. Los arreglos que se muestran en las figuras 5.21 y 5.22 ilustran los principios de operación para el revestimiento por explosión. La figura 5.21 muestra el ángulo utilizado para revestir piezas

pequeñas. Las placas que serán revestidas en áreas grandes, no pueden utilizar este tipo de arreglo, ya que la colisión que ocurre en este tipo de placas las mantiene muy apartadas, provocando que la colisión sea a mayor velocidad, y por lo tanto

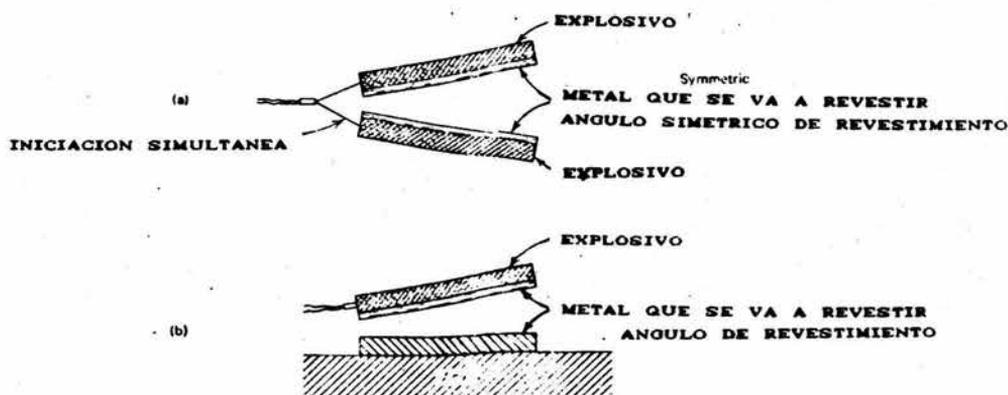


Figura 5.21. Angulo necesario para producir un revestimiento por explosión.

más violenta por lo que el metal puede agrietarse, astillarse y ocurrir la fractura. Los arreglos utilizados en la figura 5.22 son los más fáciles, por consiguiente, los más ampliamente utilizados.

Reacción. Una capa de explosivos es puesta en contacto con una placa de metal primario, la cual se mantiene a una distancia constante y paralela del metal que se va a revestir, como se muestra en la figura 5.22.a. El explosivo es detonado, y como la detonación se mueve a través de la placa, el metal primario se

deflecta y acelera la velocidad de la placa V_p ; de tal forma que se establece un ángulo entre las dos placas. La región de colisión

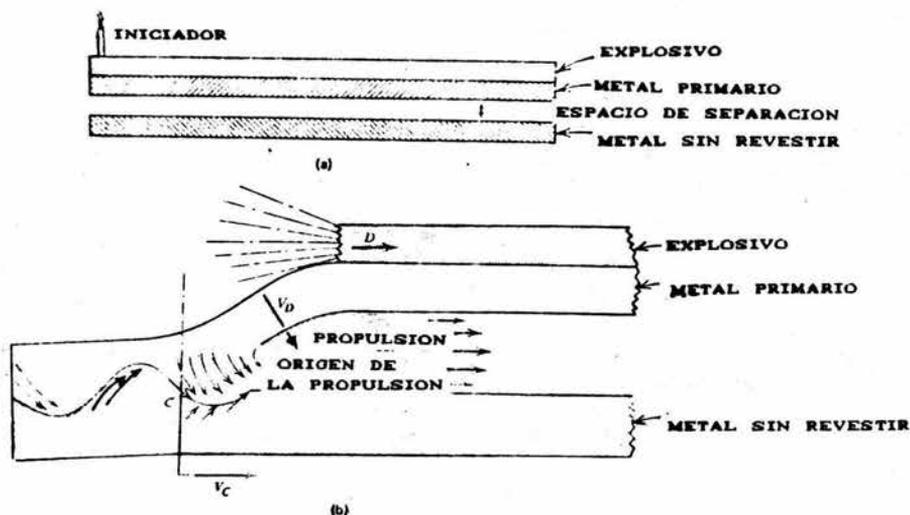


Figura 5.22. Arreglo en paralelo para el revestimiento por explosión y la colisión subsecuente entre el metal primario y el metal que se va a revestir, que carga y forma una zona de unión ondeada.

resultante progresa a través de la placa a una velocidad igual a la velocidad de detonación D . Cuando la velocidad de colisión V_c y el ángulo se controlan con ciertos límites, se genera un gradiente alto de presión en la región de colisión en cada placa, ocasionando que las superficies metálicas fluyan hidrodinámicamente, como un rociado de metal desde el vértice del ángulo de colisión. La propulsión es el proceso de flujo y expulsión de la superficie metálica.

Ventajas y Limitaciones. El proceso de revestimiento o deposición por explosión tiene las siguientes ventajas sobre otros procesos de unión de metales.

(1) Metalúrgicamente, pueden formarse uniones de alta calidad entre metales iguales o distintos, que son incompatibles con los procesos de unión por fusión o difusión. Los compuestos intermetálicos quebradizos, los cuales forman capas continuas, no deseables en la interface, durante la unión por métodos convencionales, pueden ser unidos de forma conveniente por éste método. Ejemplos de estos sistemas son: titanio-acero, tantalio-acero, aluminio-acero, titanio-aluminio y cobre-aluminio.

(2) El revestimiento por explosión puede realizarse sobre diversos tipos de áreas, siendo unicamente limitada su aplicación por el tamaño y la magnitud de la explosión, que dichas áreas puedan tolerar. Se han unido, por este procedimiento, superficies tan pequeñas como 1.3 cm^2 y tan grandes como 27.9 cm^2 .

(3) Metales con películas superficiales tenaces, que dificultan la unión por rodillos, como los aceros inoxidable/aceros Cr-Mo, pueden ser revestidos por explosión.

(4) También se pueden revestir metales que tienen un rango muy amplio entre sus puntos de fusión, como el aluminio (660°C) y el tantalio (2996°C).

(5) Se pueden unir metales con diferentes propiedades, como el cobre y el acero martensítico.

(6) Se tiene una gran cantidad de rangos, de materiales de soporte, que pueden utilizarse durante este tipo de revestido. Se han utilizado componentes revestidos de acero inoxidable tan

delgados como 0.025 mm y tan densos como 3.2 cm.

(7) El espesor del revestimiento estacionario o de soporte, es ilimitado.

(8) Se logran revestimientos de alta calidad para metales forjados, ya que el revestimiento por explosión, no altera su composición química.

(10) La mayoría de los metales utilizados para revestimientos por explosión, son menos caros que los metales sólidos que se utilizan con el mismo fin.

Las limitaciones que tiene el revestimiento por explosión son las siguientes.

(1) Existen los peligros inherentes al almacenamiento y el transporte de explosivos.

(2) Es difícil la obtención de explosivos con la energía, la forma y la velocidad de detonación apropiadas.

(3) Los metales que son unidos mediante explosivos, deben ser dúctiles y resistentes al impacto, ya que los metales o las aleaciones quebradizas se fracturan durante la unión.

(4) Es difícil lograr uniones de alta calidad, en los sistemas de metales en los que uno o más de ellos tiene un límite de elasticidad alto (límite de elasticidad > 690 MPa) o una velocidad de endurecimiento muy alto.

(5) La preparación y la unión de este tipo de revestimiento no es sensible de producirse mediante técnicas automáticas, por lo que cada unión requiere de una considerable labor manual. (19)

Fundido o Bronceado. El plomo, el cobre y otras aleaciones con

bajo punto de fusión pueden ser aplicados por la técnica de fundido o bronceado, como se muestra en la figura 5.23.



Figura 5.23. Una máquina "funde" un recubrimiento de plomo sobre una hoja de acero. Recubrimientos similares se pueden hacer de forma manual.

Soldado. Un recubrimiento metálico puede ser soldado a base por flujo de una capa de soldadura sobre la superficie mate, poniendo los metales en contacto y aplicando el calor suficiente para fundir la soldadura.

5.5.15.4. Metalizado.

La técnica de metalizado para aplicar el recubrimiento metálico se puede realizar por varios métodos.

1. Alimentando un alambre a una flama de oxiacetileno o de oxihidrógeno.
2. Alimentando un alambre dentro de una zona caliente creada por electrodo.

3. Inyectando partículas metálicas suspendidas en un gas a través de un soplador de flama.

Se prefiere, por lo regular, la preparación directa de la superficie ya que las gotitas del metal fundido deben adherirse después de la solidificación. El recubrimiento queda un poco oxidado y poroso. Su aplicación es común en las superficies de acero expuestas a la atmósfera, como en las torres de extracción de petróleo de las plataformas marinas, en los compartimentos de los tanques, en las chimeneas y otras estructuras de acero.

5.5.15.5. Alta Temperatura.

Las cerámicas, los cermets (mezclas de cerámica y metal) y varios óxidos se aplican por diversos métodos, incluyendo por aspersión con arco, para aplicaciones a altas temperaturas y para artículos de corte. Esta clasificación se sobrepone con la categoría de difusión y con los recubrimientos diseñados para dar dureza, superficies resistentes a la abrasión, como las que se consiguen con el carburo de tungsteno, el óxido de aluminio y los nitruros.

5.5.15.6. Misceláneos.

Otros métodos de aplicación para recubrimientos metálicos, incluyen los siguientes:

a) Plateado por boca. En este método, polvos de metales blandos, como el aluminio o el zinc, se depositan sobre las superficies cuando los objetos giran en un barril rotatorio a altas temperaturas.

b) Chisporroteo catódico. El metal es depositado a través del chisporroteo catódico es vaporizado en una atmósfera de gas o en un vacío que es depositado sobre el objeto que se va a recubrir.

c) Reducción química o Deposición. Se usa particularmente para el níquel, la reducción química o deposición se lleva a cabo de 85 a 90°C e involucra la inmersión de la superficie, que se va a recubrir, en una solución de cloruro de níquel y ácido fosfórico, o borhidruros o boranos de alquil-amina. Produciéndose así, una película lisa, no porosa que contiene 14% de fósforo. Este método puede utilizarse sobre superficies en las que se haya suspendido el trabajo de recubrimiento o que hayan sufrido otras irregularidades, y se recomienda particularmente para recubrir la parte interior de tanques, válvulas, tuberías, etc.

d) Cementación Compacta. Como se discutió en la sección de conversión de recubrimientos, varios materiales selectos pueden difundirse a través de la superficie del acero. Por lo que la absorción de carbón, silicón, de los nuevos óxidos metálicos y los carburos, pueden unirse a la matriz del acero por cementación compacta. El recubrimiento producido se usa para prevenir la oxidación a altas temperaturas o para resistir condiciones abrasivas severas. (20)

5.5.16. Métodos de Aplicación.

Una vez cumplidos los requisitos de preparación de la superficie, la aplicación de los recubrimientos generalmente se efectúa por aspersion, brocha o rodillo. En algunos casos, se emplean los procedimientos de inmersión o manual.

Nunca deben recubrirse superficies mojadas o húmedas. El límite de humedad relativa arriba del cual las operaciones de recubrimiento deben suspenderse es de 90%.

No se deberá aplicar ningún recubrimiento cuando la temperatura ambiente sea menor de 10°C.

Algunas de las más importantes técnicas de recubrimiento son las siguientes:

a) Con Brocha de Pelo y Rodillo. Este método se emplea cuando se requiere una gran humectación de la superficie, o cuando las condiciones de trabajo así lo requieran.

b) Aspersión. Este método de aplicación es el más rápido y las películas resultantes son más uniformes en espesor. La pistola de aspersión es el principal componente de este sistema de aplicación. Hay dos métodos para transportar el fluido a la pistola: con aire y sin él. En el primero puede ser por alimentación, por succión o por alimentación por presión y en el segundo la aspersión se produce forzando el material por alta presión a través de un orificio en la pistola.

El aire usado deberá estar seco y libre de aceites y contaminantes. (21)

c) Aspersión Electroestática. Con la aspersión electrostática, las partículas del recubrimiento, eléctricamente cargadas se rocían sobre la superficie que tiene carga opuesta a la de las partículas. El recubrimiento se produce por la atracción entre la superficie y las partículas, que tienden a depositarse sobre ella.

d) Método Electroforético. Con la técnica electroforética, las partículas cargadas eléctricamente suspendidas en un líquido conductor son impulsadas hacia la superficie cuando una corriente directa se aplica a través del líquido. Las partículas tienden a depositarse sobre la superficie de polaridad opuesta y a ocluir las hendiduras o fisuras de forma uniforme. Se utiliza para recubrir cuerpos de automóviles.

e) Lecho Fluidizado. Cuando se usa la técnica de lecho fluidizado, los polímeros termoplásticos son pulverizados y suspendidos en un tanque a través del cual se bombea aire que hace que las partículas fluyan como un líquido. Las superficies que van a ser recubiertas son precalentadas y pasadas a través de el lecho. La superficie caliente funde la resina termoplástica, que se deposita sobre ella y subsecuentemente se enfría para producir una cubierta plástica uniforme. El espesor del recubrimiento depende de la temperatura de la superficie y del tiempo de exposición.

f) Aspersión de Polvos. Las partes que van a ser recubiertas por el método de aspersión de polvos, se calientan a una temperatura adecuada y se colocan en el área en donde se rocía sobre ellas el recubrimiento en polvo que se funde al entrar en contacto con la superficie. Con esta técnica se logran recubrimientos muy uniformes.

g) Aspersión por Flama. Durante el método de aspersión por flama, los termoplásticos pulverizados o en barras se alimentan a una llama de oxiacetileno, que los impulsa hacia la superficie.

Las partículas se funden y se solidifican para formar el recubrimiento. Algunos metales se aplican de esta forma, pero a temperaturas mucho mayores.

h) **Deposición a Vacío.** Con la deposición a vacío, el material recubriente se pone en una fuente de calor en la parte baja de un recipiente, al que se lleva a vacío. El artículo que va a ser recubierto se suspende arriba del material recubriente. Dicho material (orgánico o inorgánico) se calienta hasta que se vaporice. Las moléculas del recubrimiento vaporizado condensan sobre la superficie del objeto. El vidrio, los plásticos y otros materiales no metálicos comunes, pueden recubrirse de esta forma.
(22)

5.5.17. Fallas de Recubrimientos.

Cuando los recubrimientos han sido empleados para proteger las instalaciones contra los efectos de la corrosión y dicha protección no ha sido efectiva, durante el plazo esperado, puede atribuirse a fallas originadas por mala preparación de la superficie, selección inadecuada del material, deficiente calidad del mismo, incorrecta aplicación del recubrimiento, condiciones atmosféricas inapropiadas durante la aplicación, inspección deficiente, o por la combinación de algunas de estas causas.

Las características más comunes de las fallas que se presentan en los recubrimientos, así como la manera de evitarlos, son las que se describen a continuación.

a) **Discontinuidad de la Película.** Si la corrosión se presenta en forma de puntos de oxidación más o menos extendidos, se debe a discontinuidades de la capa del recubrimiento, motivadas por mala calidad del material, mala aplicación con pistola de aire, uso de solventes inadecuados o falta de fluidez del material que no penetra en las irregularidades de la superficie del metal.

b) **Pérdida de Adhesión.** La película del recubrimiento queda adherida a la superficie metálica por atracción molecular o por la unión mecánica entre ambos. Al no ocurrir lo anterior, la película se desprende fácilmente.

Para evitar esta falla, es necesario emplear recubrimientos primarios a base de materiales que tengan una buena adherencia sobre la superficie metálica y que esta se prepare convenientemente, para eliminar cualquier material extraño que impida el contacto íntimo entre ambos.

También puede ocurrir pérdida de adhesión entre las diferentes capas del recubrimiento. Esta falla se presenta cuando:

- 1) Se repinta una superficie.
- 2) Hay incompatibilidad de recubrimientos y solventes.
- 3) Hay contaminación entre capas.

Para el caso 1), se recomienda que el recubrimiento nuevo se aplique sobre el recubrimiento viejo después de que éste ha sido "revivido" con algún solvente, o en casos particulares, lijado con el fin de aumentar su rugosidad.

c) **Ampollamiento.** El ampollamiento es causado por

entrampamiento de solventes, gases o líquidos en/o bajo la pintura, y que ejercen una presión mayor que la adhesión de el recubrimiento en el área bajo esfuerzo.

El ampollamiento se presenta principalmente en los recubrimientos cuando estos se encuentran expuestos a ambientes húmedos y a contaminación entre capas, o cuando el recubrimiento seca superficialmente con demasiada rapidez.

Las ampollas por vapores de solventes, se evitan si el recubrimiento se formula convenientemente para impedir un secado demasiado rápido y también si se aplica en capas suficientemente delgadas.

d) Agrietamiento. El agrietamiento es el resultado de esfuerzos mecánicos que actúan sobre la película y su magnitud depende de la flexibilidad y adhesión de los recubrimientos.

El agrietamiento se evita únicamente por la formulación de los recubrimientos a base de aditivos que proporcionen una flexibilidad satisfactoria.

e) Corrugado. Se presenta en recubrimientos que han sido aplicados en capas gruesas que secan rápidamente por efecto de la temperatura o por un exceso de agentes secantes en la superficie. Para aminorar este efecto, los recubrimientos se deben aplicar bajo las condiciones de secado para los cuales fueron formulados, y en capas de un espesor conveniente de acuerdo con el instructivo de aplicación.

f) Caleo. Consiste en la flotación de polvo sobre la superficie del recubrimiento, ocasionado por la degradación de la resina a consecuencia de la acción combinada de los rayos solares y del oxígeno.

El caleo excesivo solo se evita con la formulación apropiada del recubrimiento, para lo cual se debe tener en cuenta la naturaleza química del vehículo y su resistencia a la intemperie, así como la relación de vehículo a pigmento. Los recubrimientos con un bajo contenido de vehículo se calean rápidamente. (23)

5.6. BIBLIOGRAFIA

- (1) Fontana, M.G., and N.D. Greene, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, Singapore, (1978).
- (2) Ed. NACE, Corrosion Basics: An Introduction, Houston, Texas, (1984).
- (3) Fontana, M.G., op. cit.
- (4) Costa, J.M., Fundamentos de Electrónica: Cinética Electroquímica y sus Aplicaciones, Alhambra, España, (1981).
- (5) Fontana, M.G., op. cit.
- (6) Uhlig, H.H. and R.W. Revie, Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, 3th. ed., John Wiley and Sons, Inc., USA, (1985).
- (7) Fontana, M.G., op. cit.
- (8) Lara, C.A., Recubrimientos Anticorrosivos, TECNOLAB, p. 1, (Dic. 1986).
- (9) Ed. NACE, op. cit.

- (10) Kirk, R.E. and D.F. Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, Vol 9, Mack Printing Co., New York, pp. 17-20, (1963).
- (11) Ed. NACE, op. cit.
- (12) Kirk, R.E. and D.F. Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 15, 3th. ed., Jonh Wiley and Sons, New York, pp. 304-307, (1981).
- (13) Ed. NACE, op. cit.
- (14) McKetta, John J. and W.A. Cunningham, Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Vol. 17, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 386-392, (1983).
- (15) Ed. NACE, op. cit.
- (16) Kirk, R.E. and D.F. Othmer, op. cit., Vol 5, pp. 623-643.
- (17) Ed. NACE, op. cit.
- (18) Ed. Petróleos Mexicanos, Normas de Construcción de Obras, Aplicación de Recubrimientos para la Protección Anticorrosiva, NORMA 3.132.01., (1972).
- (19) Kirk, R.E. and D.F. Othmer, 3th. ed., op. cit., Vol 15, pp.275-278.
- (20) Ed. NACE, op. cit.
- (21) Ed. Petróleos Mexicanos, Normas de Construcción..., op. cit.
- (22) Ed. NACE, op. cit.
- (23) Ed. Petróleos Mexicanos, Normas de Construcción..., op. cit.

VI

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO CONTRA LA CORROSION EN LOS EQUIPOS DE
PROCESO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

6.1. TUBERIAS DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO

6.1.1. Materiales

6.1.1.1. Sistemas de tuberías de metales ferrosos

Acero Forjado. Los sistemas de tubería de acero forjado son los más utilizados y los que más se toman en consideración en las normas nacionales (de Estados Unidos).

Dos de las clasificaciones comunes de los tubos son la "de presión" y la "mecánica". El espesor de la pared se especifica, ya sea como "pared promedio" o "pared mínima". La pared mínima es más costosa que la promedio y debido a las tolerancias más estrechas de diámetro y espesor de las paredes, los dos sistemas medidos hacen que los tubos de presión sean más costosos que las tuberías. Sin embargo, los tubos de acero al carbono, pared promedio y soldados por resistencia eléctrica, de tamaño de 2 3/8, 2 7/8, 3 1/2 y 4 1/2 pulgadas de diámetro exterior, producidos con bandas enrolladas en laminación progresiva y probadas electromagnéticamente en lugar de a presión, compiten fuertemente con las tuberías.

Las tuberías y los tubos ferrosos (cuando no son de hierro colado) se pueden doblar en frío o en caliente. Existen accesorios de hierro colado, maleable, vaciado, acero forjado y fraguado. Para las tuberías se usan juntas roscadas, abocinadas, soldadas, estriadas, de expansión y de cuello, y para los tubos, juntas soldadas, de ajuste abocinado y de mordiente.

Al contrario que en el caso de las válvulas o los accesorios embridados de hierro colado, se prefieren con frecuencia bridas de acero para tuberías a las de hierro colado, porque permiten el

montaje con soldadura, en lugar del roscado, a la tubería, y porque las bridas para tuberías de hierro colado, no reforzadas por la tubería misma, no son tan resistentes como las bridas vaciadas como parte de los accesorios de hierro colado.

Las bridas de acero al carbono y de juntas solapadas de hierro dúctil (nodular) se utilizan ampliamente en sistemas de acero inoxidable austenítico, con el fin de reducir los costos.

Existen accesorios forjados hechos mediante la perforación de piezas de forjas sólidas, con soldadura de casquillos o extremos atornillados en tamaños de hasta 4 plg; pero el límite superior de tamaño habitual para el uso normal es de 2 pulgadas. El Código A.N.S.I. B16.11-1966 da dimensiones mínimas para las clases de soldaduras de casquillo de 3,000 y 6,000 lb y para las clases atornilladas de 2,000, 3,000 y 6,000 lb. Contiene también clasificaciones de presión y temperatura para las clases en diversas aleaciones ferrosas.

Los accesorios de acero forjado con extremos a rosca se pueden instalar sin relleno para tuberías en los fileteados y sellarse mediante soldadura para obtener juntas herméticas con un mínimo de trabajo de soldadura. No están sujetas a deformaciones por llaves de tuberías y esos acoplamientos, bujes y tapones se usan con frecuencia con los accesorios atornillados por debajo.

El Código A.N.S.I. B16.3-1963 da dimensiones para accesorios roscados de hierro maleable de 150 lb hasta un tamaño de 6 plg para 150 lb/plg² de vapor saturado y 300 lb/plg² a la temperatura ambiente y para 300 lb de accesorios roscados de hierro maleable hasta un tamaño de 3 plg para 300 lb/plg² de vapor a 550°F ó 1,000

lb/plg², a la temperatura ambiente. Se encuentran esos accesorios con roscas macho o uniones con un extremo para la instalación en espacios confinados. Se utilizan más los codos, las tes y los reductores de tamaños de 2 plg y menores para 150 lb. Son menos costosos que los accesorios forjados, pero no se pueden sellar mediante la soldadura. El Código no permite la utilización de hierro maleable para servicios con fluidos tóxicos o inflamables por encima de 300°F o 400 lb/plg² manométrica.

El Código A.N.S.I. B16.4-1964 da dimensiones de accesorios de hierro colado atornillados de 125 lb hasta un tamaño de 12 pulgadas para 125 lb/plg² de vapor saturado y 175 lb/plg² a 150 °F y de accesorios de hierro colado atornillados de 250 lb hasta el tamaño de 12 plg² para 250 lb/plg² de vapor saturado y 400 lb/plg² a 150°F. Los accesorios de 125 lb se hacen en codos regulares de 90 y 45°, codos reductores, tes regulares y reductoras y cruces. Los accesorios de 150 lb se hacen sólo en tamaños rectos. Su utilización primordial es para codos, tes y reductores de 125 lb destinados a servicios no críticos y a bajas presiones. El Código no permite la utilización de hierro colado para servicios con fluidos tóxicos o sobre la superficie del terreno, dentro de límites unitarios de procesamientos para fluidos inflamables por encima de 300°F o 150 lb/plg².

Existen válvulas de acero con extremos atornillados o con soldadura de casquillos de los tamaños más pequeños. Se emplean mucho las válvulas de bronce y latón con extremos atornillados para servicios de baja presión en los sistemas de acero. Cuando no se espere desmontar el sistema para el mantenimiento, se usan con

frecuencia válvulas embridadas en lugar de las de extremo de soldadura por ensamble, porque permiten la inserción de llaves ciegas para aislar secciones de un sistema de tuberías de lazo cerrado.

También hay válvulas ferrosas de hierro nodular (dúctil) que tiene resistencia a la tensión y un punto de resistencia aproximadamente igual al acero vaciado al carbono a temperaturas de 650°F y por debajo y una elongación sólo ligeramente menor.

Hierro colado. Los sistemas de tubería de hierro colado proporcionan más metal a menor costo que los de tuberías de acero y se utilizan mucho en los servicios a baja presión, donde la corrosión interna y externa provoque una pérdida considerable de metal. El hierro colado se usa mucho para la distribución subterránea de agua en tubería de tamaño de 4 a 24 plgs, sobre terrenos firmes. Para el manejo de agua nodular se dispone de recubrimiento de cemento por un costo nominal. La mayoría de las tuberías de hierro colado se vacían centrífugamente (en moldes que giran con rapidez), lo que hace aumentar la resistencia a la tensión y reduce la porosidad. El espesor de las paredes que se requiere para instalaciones subterráneas aumenta con la presión interna, la profundidad a la que van enterradas y el peso de los vehículos que pasen sobre la tubería. Se reduce hasta el punto en que la tierra que rodea a la tubería proporcione un soporte uniforme a todo lo largo y en torno a los 180 grados inferiores.

Las juntas vaciadas se han visto reemplazadas en gran parte por las juntas mecánicas y las juntas embutidas que son más apropiadas

para zanjas húmedas, mal tiempo y mano de obra no especializada y para minimizar las deformaciones en las tuberías, debido a los asentamientos del terreno. Las dos últimas juntas utilizan los mismos empaques para todas las presiones, a cualquier tamaño y, en consecuencia, el mismo diámetro exterior de tubería. Difieren de las tuberías de hierro colado para juntas vaciadas, para las que el diámetro exterior aumenta en tapas irregulares al incrementarse el espesor de las paredes para oponer resistencia a la presión interna creciente.

También se fabrican tuberías de hierro colado con extremos embridados, A.N.S.I. B16.1, de 125 lb o 250 lb. En las tuberías coladas en pozos, las bridas se vacían como partes integrantes; en las tuberías coladas centrífugamente, se montan mediante juntas roscadas. Los sistemas de tuberías embridadas de hierro colado se debe entender de tal modo que la expansión térmica se absorba mediante la rotación de una cara de la brida sobre la otra.

El hierro dúctil tiene una elongación de 10% o más, lo que permite que la pared de tuberías más delgadas resistan tanto la presión interna con las cargas de la tierra en los tamaños mayores.

Hierro con alto contenido de silicio. Esta aleación existe solamente en forma vaciada. Las tuberías y los accesorios se vacían, uniendo los extremos recalcados mediante bridas divididas. Hay también tuberías con bridas vaciadas como parte integrada. Las presiones admisibles de trabajo no se pueden enunciar de la

manera habitual para otros tipos de tuberías, debido a variables como los choques térmicos, las presiones variables y los fluidos corrosivos que se manejan. Aun cuando no se producen rupturas por debajo de 400 lb/plg^2 de presión en tamaños de hasta 6 plg, inclusive, se recomienda normalmente el uso de una presión de 50 lb/plg^2 , aun cuando se han utilizado estas tuberías para presiones considerablemente mayores a esta cifra.

Existen en la actualidad tuberías nuevas sin campana que utilizan empaques TFE y abrazaderas de acero inoxidable para formar juntas mecánicas (el nombre comercial es Duriron MJ).

Fuesto que esas aleaciones prácticamente no tienen elasticidad, es necesario utilizar juntas de expansión en las líneas de tuberías relativamente cortas. Las conexiones para tuberías embridadas, accesorios, válvulas y bombas se hacen con perforaciones de 125 lb American Standard.

6.1.1.2. Sistemas de tuberías de metales no ferrosos

Aluminio. Se producen tubos y tuberías de aluminio sin costura mediante la extrusión, en aluminio esencialmente puro y diversas aleaciones; existen tramos de 20, 30 y 40 pies de longitud. Las aleaciones y los tratamientos especiales hacen mejorar las propiedades físicas de esas tuberías; pero la soldadura las reduce. El aluminio esencialmente puro tiene una resistencia final a la tensión de $9\,500 \text{ lb/plg}^2$, sujeta a un ligero aumento mediante el tratamiento especial que se pierde durante la soldadura. La aleación 6061, que contiene 0.25% de cobre, 0.6% de silicio, 1% de magnesio y 0.25 de cromo, tiene una resistencia final a la tensión

de 18 000 lb/plg² en la condición reconocida, de 38 000 lb/plg² con el tratamiento especial en la forma de 6061-T6 y 24 000 lb/plg² en las juntas soldadas. Se utiliza mucho la aleación 1060, que es de 99.6% de aluminio puro, para el peróxido de hidrógeno; la aleación 3003, que contiene 1.2% de manganeso, para los productos químicos de alta pureza y las aleaciones 6063 y 6061 para muchos otros usos. La aleación 6063 es la misma que la 6061 menos el cromo y posee propiedades mecánicas ligeramente inferiores.

Las tuberías de aluminio se proporcionan en aleaciones 3003, 6061 y 6063, patrón 40, hasta 10 pulgadas, patrón 30 de 8 a 10 pulgadas y de peso estándar hasta un tamaño de 12 pulgadas. También existe en la aleación 6063 como patrón 5 hasta 6 plg y como patrón 10 hasta 8 plg.

Raramente se recomiendan los accesorios roscados de aluminio para tuberías de procesamiento. Existen accesorios forjados con extremos soldables y con extremos de juntas estriadas. También existen bridas forjadas de aleación 6061-T6. Existen bridas vaciadas y accesorios embridados, colados en arena como aleaciones B214.

Se usan mucho válvulas de bolas y diafragmas con cuerpos de aluminio.

Cobre y aleaciones de cobre. Se producen por extrusión tubos y tuberías de aleaciones de cobre y silicio, cobre, bronce y latón y aleaciones de cobre y níquel sin costuras. El tubo existe en diámetros exteriores de tamaños que van de 1/16 a 16 plg y en una

gama de espesores de paredes que varían de 0.005 plg para el tubo más pequeño a 0.75 plg para el de tamaño de 16 plg.

Se vende en diámetros exteriores de tubos de agua (el diámetro externo es 1/8 plg mayor que el nominal), como tubo de diámetro externo y como tubería con diámetro externo de tubería. En forma de tubo, existe como rollos destemplados (blandos), donde la razón del espesor de la pared del diámetro es suficientemente alta como para permitir el enderezamiento sin pandeos ni aplastamientos excesivos. Existe en todas las combinaciones de tamaños de pared como tubos laminados (duros), en tramos de 20 pies. Los tubos de cobre se utilizan mucho para las tuberías de oficinas y laboratorios, para tendidos de tubos de vapor y para sistemas de control neumático.

Existen válvulas de bronce y latón rojo con extremos de juntas hembras soldadas para su conexión mediante la soldadura en sistemas de tuberías y tubos de cobre.

Las tuberías de cobre se ven atacadas por el agua procedente de substratos graníticos y, por esta razón, se utilizan en esos lugares tuberías de latón rojo A.S.T.M. B43, con accesorios de extremos soldados o atornillados de latón rojo.

Hay accesorios para soldar y tuberías sin costura de 70% de cobre, 30% de níquel y 90% de cobre y 10% de níquel, para manejar aguas salobres en espesores de tuberías regulares de cobre del patrón 10.

Tuberías de plomo y acero recubierto de plomo. Se usan tuberías

de plomo y acero recubierto de plomo para manejar ácido sulfúrico a temperaturas moderadas. Debido a la baja resistencia física del metal, se acostumbra tender las tuberías de plomo en entramados de madera y ángulos de acero. El plomo químico, A.S.T.M. B29-55, que tiene 99.9% de plomo, 0.04 a 0.08% de cobre y una cantidad de bismuto que no sobrepasa el 0.005%, tiene la mayor resistencia a la corrosión; el plomo con 6% de antimonio tiene mayor resistencia al esfuerzo a temperaturas por debajo de 225°F y más resistencia a la abrasión y la erosión; el plomo con 0.04% de telurio tiene la misma resistencia que el plomo químico; pero soporta mejor las vibraciones. No hay ninguna norma dimensional nacional para la tubería química de plomo.

La tubería de plomo se suele proporcionar en tramos de 12 pies. También se usan bridas de plomo con antimonio. Hay también cruces, tes rectas y reductoras. Y, brazos laterales rectos y de reducción y codos de plomo, o se pueden fabricar sobre el terreno a partir de la tubería. Existen válvulas sólidas de plomo antimonial para presiones de hasta 65 lb/plg² y se prefieren cuando los derrames son frecuentes.

La tubería recubierta de plomo soporta presiones mayores y requiere mucho menos soporte que la tubería de plomo. Existe en dos tipos: dilatado, en el que el plomo químico se dilata hidráulicamente al interior de las tuberías de acero embridadas y sale sobre las caras de las bridas y homogéneo, en donde el plomo químico se vacía como recubrimiento total. Las tuberías de acero

con recubrimiento de plomo dilatado tienen un costo más bajo y se fabrican en las longitudes pedidas o se envían en tramos aleatorios de aproximadamente 20 pies. Existen recubrimientos de varios espesores para cada tamaño y van de 5/64 a 1/4 de plg, para una pulgada; de 3/16 hasta 3/8 de plg para el tamaño de 12 pulgadas. Se usan tuberías de acero con recubrimiento homogéneo de plomo para vacío, temperaturas cíclicas o elevadas y presiones altas. Normalmente, se envían embridadas con bridas de caras de plomo en las longitudes pedidas o en tramos de longitudes aleatorias de aproximadamente 20 pies. El espesor del recubrimiento es de 1/8, 3/16 o 1/4 de plg para los tamaños de 1 a 6 plg y de 3/16 o 1/4 de plg para los tamaños de 8 a 12 plg. Para los dos tipos de recubrimiento, se pueden enviar por separado las tuberías y bridas adicionales. Las tuberías se cortan, filetean y rectifican sobre el terreno, se atornillan las bridas y la cara de plomo de estas últimas se une el recubrimiento mediante el quemado de plomo. Existen válvulas y accesorios embridados, con recubrimiento de plomo. Esos accesorios y las bridas son normalmente de hierro colado de 125 lb; pero se pueden obtener de acero o hierro colado de 250 lb en cualquier presión.

Magnesio. Los tubos de magnesio extruido resisten los ataques debidos a la mayor parte de los álcalis y muchos productos químicos orgánicos incluyendo aldehídos, alcoholes, fenoles, aminas y ésteres. Se puede obtener según el Código A.S.T.M. B217-58, en aleación con aluminio, manganeso o zinc. La resistencia final y el límite de elasticidad a 400°F son de

aproximadamente la mitad que las que tiene a la temperatura ambiente. El intervalo de diámetros externos es de 1/4 a 8 plg. El espesor de las paredes va de un mínimo de 0.028 plg a un máximo de 0.031 plg para el diámetro de 1/4 de plg y de un mínimo de 0.250 plg a un máximo de 1.0 plg para el diámetro de 8 pulgadas.

Níquel y aleaciones de níquel. Los tubos y las tuberías de níquel extruido existen en dos grados: 1) Con 99% de níquel 0.06% de carbono para ácidos de halógenos a altas temperaturas y soluciones de cloruro de sodio cáustico y, 2) Con 99% de níquel, 0.01% de carbono, para sosa cáustica fundida. Existen según el Código A.S.T.M. B161 como tubos en tamaños de 3/8 a 3 plg en incrementos de diámetro exterior de 1/8 de plg, con espesores de las paredes de 0.049 a 0.165 plg, y como tuberías, patrón 10, de 1/8 a 6 plg y patrón 40 a 80, de 1/8 a 8 plg. Las tuberías mayores se forman a partir de láminas y con costuras soldadas. Existen accesorios soldados. También hay válvulas embridadas de níquel colado. Debido a la baja resistencia, se utilizan juntas de solapas, con el soporte de otras bridas metálicas en lugar de bridas de níquel.

A veces se utilizan como sustituto tuberías y accesorios para soldar de acero al carbono, o con recubrimiento interno de 0.008 a 0.015 plg de níquel. También existen recubrimientos internos de níquel y fósforo.

Se utilizan tuberías y tubos de hierro, níquel y cromo extruidos, (14% de Cr, 7% de Fe y 79% de Ni), para la conducción de fluidos a altas temperaturas, hasta de 2,000°F, debido a la

extraordinaria resistencia a la oxidación, aun cuando a esa temperatura queda una resistencia muy baja. Se fabrican tubos sin costura hasta 8 1/2 plg de diámetro exterior por 5/8 de pulgada de paredes y tuberías en el patrón 40 hasta 6 plg y el patrón 10 y el 80, a 4 pulgadas. Las tuberías mayores se forman a partir de láminas y se sueldan las costuras. Existen válvulas embridadas, bridas y accesorios soldados.

Por el Código A.S.T.M. B165 se encuentran tuberías y tubos de aleación de níquel y cobre extruído (30% de Cu y 29% de Cu, con 1.75% de Co). Se utilizan para cloruro de sodio cristalizado, y la última de las aleaciones posee mayor consistencia y resistencia a la erosión. Se fabrican tubos sin costura de níquel y cobre (30% de Cu) en tamaños que van de 5/8 a 3 plg, con el diámetro exterior en incrementos de 1/8 de pulgada y espesores de paredes de 0.049 plg. Existe tubería sin costura, sin temple y laminada en frío, en el Patrón 10 hasta 6 plg de tamaño y en los patrones 40 y 80, hasta 8 plg. También se dispone de válvulas embridadas, bridas y accesorios para soldar. Se producen tubos sin costura de níquel y cobre (29% de Cu, 1.75% de Co) en tamaños de hasta 3 1/4 plg de diámetro exterior. Existe tubería sin costura en los patrones 40 y 80, hasta un tamaño de 2 1/2 plg.

Se usa una aleación de níquel-molibdeno-hierro (30% de Mo, 5% de Fe y 65% de Ni) para gas húmedo de cloruro de hidrógeno y ácido clohídrico en ebullición. Retiene más de las dos terceras partes de su resistencia a la cedencia a la temperatura ambiente, hasta llegar a 1,600°F. La aleación de níquel-molibdeno-cromo-tungsteno-hierro (17% de Mo, 15% de Cr, 5%

de W, 5% de Fe y 58% de Ni) es resistente a la oxidación y las atmósferas reductoras hasta los 2 100°F y tiene una resistencia excepcional a los agentes oxidantes fuertes, tales como el cloruro férrico y el cloruro cúprico. Las dos aleaciones se pueden soldar y se producen como tuberías soldadas de Patrón 5, de 1 1/2 a 4 plg; de patrón 10, de 1 a 4 plg; de patrón 40 de 1/4 a 4 plg. (Con excepción de los tamaños de 3/4 y 1 plg; de la última aleación), de patrón de 80 de 1 1/2 a 4 plg. La última aleación existe en la forma de tubería forjada sin costura en tamaños de 3/4 a 1 1/2 plg. Las dos tuberías existen como tubería colada en patrón 80, de 1 a 8 plg. Hay codos colados para soldar, en tamaños de 1/4 a 4 plg y extremos de vástagos de 1/2 a 6 plg pero se utilizan soldaduras de intersección en lugar de tes para soldar. También hay accesorios colados de 1 a 4 plg y bridas de deslizamiento y cuello soldado, coladas, de 150 lb, de 1/2 a 12 plg. Las tuberías soldadas de más de 4 plg se hacen con placas laminadas y soldadura en las costuras. También hay válvulas coladas.

La aleación de níquel-cromo-molibdeno-cobre hierro (29% de Ni, 20% de Cr, 3% de Mo, 4% de Cu y 44% de Fe) tiene una excelente resistencia al ácido sulfúrico a temperaturas y concentraciones que se encuentran fuera de la gama para el acero al carbono. Es soldable y se liga con columbio para la construcción soldada. Existen tuberías soldadas en patrón 5, de 1/2 a 4 plg; en Patrón 10, de 1/8 a 4 plg y en Patrón 40, de 1/8 a 2 plg. También se producen accesorios forjados para soldar, bridas forjadas para soldar y válvulas coladas.

Estaño. Se producen tuberías de acero puro de grado elevado, en tramos rectos, rollos o carretes. La longitud más larga de la tubería es la que pesa 50 lb. Debido a la inactividad relativa del estaño se utiliza primordialmente para manejar fluidos, para consumo humano y otros cuya contaminación es indeseable.

Titanio. El titanio no aliado de pureza comercial es resistente a los ácidos oxidantes tales como el nítrico, el crómico y el agua regia y es particularmente resistente a la corrosión por el agua de mar en procesos para la extracción de agua potable. Se producen tuberías según el Código A.S.T.M. B337. Se fabrican tubos laminados y extruidos según el Código A.S.T.M. B338. También existen válvulas, bridas y accesorios colados para soldar.

Circonio (estaño de 1.2 a 1.7%). Tiene una excelente resistencia al ácido nítrico diluido y concentrado, a 212°F. Se producen tubos sin costura que van de 1/2 plg de diámetro exterior con un espesor de pared de 0.030 plg a 8 plg de diámetro exterior 0.4 plg de pared y soldados, de hasta 30 plg de diámetro exterior por 1/8 de pulgada de espesor de la pared. También hay accesorios y válvulas coladas.

Mangueras metálicas flexibles. Se cubren tubos muy corrugados de latón delgado, bronce, Monel, aluminio y acero, con forros de alambre flexible, para obtener mangueras metálicas flexibles. Tanto el tubo como el alambre trenzado se sueldan con estaño o bronce a los fileteados de las tuberías, las uniones o los

extremos embridados. Los diámetros internos van de 1/8 a 12 plg. La temperatura máxima recomendada para las mangueras de bronce es de aproximadamente 450°F. El espesor del metal es mucho menor que para los tubos rectos para las mismas condiciones de presión y temperatura; por ende para poder hacer la selección adecuada se requieren datos precisos sobre la corrosión y la erosión.

6.1.1.3. Tuberías no metálicas y sistemas de tuberías recubiertas

Asbesto cemento. La tubería de asbesto-cemento no tiene costura y se hace de óxido de silicio y cemento Portland, compactados a una presión muy elevada, reforzados uniformemente con fibra de asbesto y curados con cuidado. La superficie interior es lisa, no se corroe ni desarrolla protuberancias. En condiciones normales de funcionamiento, el asbesto-cemento podrá manejar soluciones dentro de una gama de pH de 4.5 a 14. Se trata de un material frágil que se dilata al mojarse. Las juntas que más se utilizan son las introducidas por compresión. Esta tubería se utiliza ampliamente para sistemas de aguas subterráneas, para desechos y lechadas de fábricas de papel y para aguas de minas. Las juntas introducidas por compresión limitan la temperatura a 150°F. El peso ligero de la tubería minimiza el trabajo de manejo; pero se requiere cuidado para evitar daños. Esta tubería se produce también con un recubrimiento de epoxi que hace aumentar su resistencia a la corrosión.

Grafito impermeable. Se producen cuerpos de válvula, accesorios

y tuberías de grafito impermeable, con grafito de horno eléctrico que, después de la extrusión o el moldeo, se hace impermeable mediante su impregnación con resinas sintéticas. Cuando se impregna con resina fenólica, es resistente a la mayoría de los ácidos (incluyendo el fluorhídrico), las sales y los compuestos orgánicos. Cuando se impregna con resina fenólica modificada, es resistente a los álcalis fuertes y los materiales muy oxidantes.

Existen empaques de teflón y de elastómeros sintéticos. Hay válvulas de diafragma con cuerpos de grafito impermeable en tamaños que van de 1 a 6 plg. El espaciamiento máximo recomendado de soporte es de 9 pies y las válvulas se deben soportar independientemente.

Acero recubierto de cemento. Las tuberías de acero recubierto de cemento se producen mediante el recubrimiento de las tuberías de acero con un cemento especial. Su uso evita que el fluido manejado recoja hierro, la corrosión del metal por aguas salobres y el crecimiento de protuberancias. Existen tuberías roscadas en tamaños de 3/4 a 4 plg.

Los accesorios roscados llevan en general un recubrimiento de estaño o plomo para evitar que se maltrate el recubrimiento al hacer las juntas, y para proporcionar un flujo suave por el accesorio.

Se manejan tuberías de acero al carbono recubiertas de cemento de más de 4 plg, con extremos embridados o para soldar. La soldadura no daña el recubrimiento que forma una escoria que protege la soldadura misma.

Productos químicos. Los accesorios y las tuberías pétreas químicas a prueba de ácidos, resisten a la mayor parte de los ácidos, los álcalis u otros corrosivos, con la excepción principal del ácido fluorhídrico. El intervalo más amplio de tamaños se hace con la junta de campana y espiga y con extremos lisos por ensamble, mientras que la junta cónica embridada se puede obtener en tamaños de 1 a 10 plg.

Las tuberías de extremos lisos por ensamble reciben bridas cementadas con perforaciones A.N.S.I. B16.1. Se pueden obtener tuberías pétreas químicas de presiones medias, blindadas con fibra de vidrio y reforzadas con resina de furano, en donde las bridas de A.N.S.I. B16.1 se apoyan contra los cubos formados en blindaje.

Existen accesorios y válvulas de tapón con extremos que coinciden con los diversos tipos de tuberías.

Las tuberías de alcantarillado de arcilla vítrea son resistentes a los productos químicos muy diluidos, con excepción del ácido fluorhídrico y se producen en tramos estándar (A.S.T.M. C13) y extrarresistentes (A.S.T.M. C200). Se utiliza para drenajes, desechos industriales y aguas de avenidas, a la presión atmosférica. También hay codos, ramificaciones en Y, tes, reductores y ampliadores. El ensamblaje se hace mediante juntas vaciadas que permiten una gran deflexión angular. Los componentes de las juntas son del tipo de vaciado en caliente o del tipo mastic en frío; ambos tipos se adhieren firmemente a las superficies de arcilla; pero permanecen lo suficientemente flexibles como para evitar las fugas en el caso de asentamientos

del terreno. También hay tuberías con materiales de asfaltos o plásticos fundidos a presión en la parte exterior de la espiga y la interior de la campana. Las interfases se ajustan lisas, y se unen mediante la aplicación de un solvente en el momento del ensamblaje. La elección entre la resistencia estándar y la extra se basa en las cargas de vehículos y tierras.

Concreto. Se hacen tuberías para drenaje de concreto no reforzado, con extremos de juntas coladas en tamaños de 4 a 24 plg según el A.S.T.M. C14.

Para presiones más elevadas del agua, se incrusta en la pared de la tubería un cilindro de acero de aproximadamente 1/16 de pulgada de espesor, que impide las fugas a través de las grietas, y al que se puede agragar alambre preesforzado de refuerzo perimetral, aplicado después de reforzar el acero mediante el recubrimiento de cemento.

Se producen tubos y tuberías de vidrio con vidrio de borosilicato resistente al calor y a los productos químicos.

Se producen tuberías de vidrio con bridas cónicas y en longitudes de 6 plg a 10 pies. La presión máxima recomendada de trabajo es de 50 lb/plg² hasta el tamaño de 3 plg, de 35 lb/plg² para el tamaño de 4 plg y de 20 lb/plg² para el tamaño de 6 plg. El diferencial máximo repentino de temperatura es de 200°F, hasta el tamaño de 3 plg, de 175°F para el tamaño de 4 plg y de 160°F, para el de 6 plg. La temperatura de operaciones máxima es de 450°F. Existe una línea completa de accesorios y se hacen piezas

especiales sobre pedido. Se deben aliviar completamente los esfuerzos de dilatación térmica mediante codos y juntas corrugadas de expansión, de Teflón. Los suspensores se deben acojinar para evitar daños a la tubería, deben ajustarse en forma floja y situarse a un pie de cada extremo de 10 pies.

Se puede proporcionar tubería de vidrio con un recubrimiento de resina epoxi reforzado con tejido de fibra de vidrio, para protegerlo contra los abusos. Equipadas con acoplamientos especiales de bola, estas tuberías se pueden utilizar para presiones de 150 lb/plg².

Para las presiones muy bajas, hay tuberías de extremos de rebordes, equipadas con acoplamiento del tipo de banda de perno simple.

Tuberías de acero recubiertas de vidrio. Son totalmente resistentes a temperaturas de hasta 212°F a todos los ácidos excepto el fluorhídrico, y a todas las soluciones alcalinas hasta un pH de 12. Se pueden utilizar a temperaturas de hasta 450°F, a condición de que no haya cambios de temperatura excesivamente repentinos y a presiones de hasta 150 lb/plg² para tuberías estándar y 300 lb/plg² para tuberías especiales. El recubrimiento de vidrio suele ser de un espesor de 3/64 de pulgada. Existen accesorios completos en la forma de piezas vaciadas de hierro colado con recubrimiento de vidrio, para presiones de hasta 150 lb/plg² y como hierro dúctil recubierto de vidrio, para las presiones más altas. Para el montaje del sistema se utilizan juntas modificadas con bridas de unión a solapa.

Las tuberías, los accesorios y las válvulas de porcelana química, hechas de material denso y no poroso y cocidas a 2 250 °F, son inertes a todos los ácidos excepto el fluorhídrico; pero no son recomendables para los álcalis. Las superficies, excepto donde se esmerilan para recibir los empaques, se suelen vidriar para facilitar la limpieza. Se recomiendan presiones de trabajo de 50 a 100 lb/plg² para las válvulas y las tuberías. Se pueden usar temperaturas de 400 °F o más; pero se deben evitar los choques térmicos repentinos.

Se fijan permanentemente a la porcelana bridas de hierro colado (A.N.S.I. B16.1 de 125 lb, con espaciamento por pernos), con cemento altamente resistente a los ácidos. También hay válvulas de globo, tapas, reductores, cruces, tes y codos de 90 y 45 grados, de porcelana química embreada. Se produce porcelana química blindada con tela de fibra de vidrio de 1/16 a 3/32 de pulgada, impregnada y cementada a la porcelana mediante cemento plástico. El blindaje es continuo de extremo a extremo y pasa por debajo de las bridas. Evita los agrietamientos de la porcelana y, en el caso de que este material se agriete, evita la ruptura.

Se pueden obtener tubos y tuberías opacas o transparentes de sílice o cuarzo fundido, con 99.8% de dióxido de silicio. Los tubos y las tuberías se pueden utilizar continuamente a temperaturas de hasta 1,000 °C y, de manera intermitente, hasta 1,500 °C. Para obtener los detalles específicos es preciso consultar a los fabricantes.

Tuberías de madera y de acero recubierto de madera. Para las tuberías de madera, los materiales más comunes son los del ciprés, la secoya, el pino blanco y el abeto de Canadá. Las tuberías de acero recubiertas de madera son apropiadas para temperaturas de hasta 180°F y presiones de 200 lb/plg² para el tamaño de 4 plg, hasta 125 lb/plg² para el tamaño de 10 plg, y 100 lb/plg² para los tamaños mayores de 10 plg. Para las chimeneas y otros usos similares, las tuberías de duelas de madera con varillas al centro de un pie, son las más satisfactorias, porque permiten el apretamiento periódico.

Para instalaciones subterráneas, se usan en general tuberías de duelas de madera flejadas a máquina. Por lo común, la tubería se recubre en capas gruesas con asfalto y aserrín de madera.

Las tuberías cuadradas de madera se hacen por lo común de pino blanco con juntas de muesca y espiga. Hay también cajas de tuberías de vapor para cubrir y aislar las líneas de vapor subterráneas.

Los accesorios para las tuberías de madera se hacen de hierro colado, madera y acero recubierto de madera.

Tuberías de acero recubiertas de plástico y caucho. El uso de diversos polímeros como recubrimientos para tuberías de acero en lugar de los sistemas de tuberías, resuelve los problemas relativos a la baja resistencia a la tensión de los polímeros a temperaturas elevadas y la elevada dilatación térmica, en comparación con el acero. La capa exterior de acero permite un espaciamiento mucho más amplio de los soportes, juntas embridadas

apropiadas y temperaturas y presiones más altas en las tuberías. La gama de tamaños va de 1 a 8 plg. Los sistemas llevan bridas de hierro colado de 125 lb, hierro dúctil de 150 lb y acero de 150 y 300 lb. Los recubrimientos se instalan en la fábrica, tanto en los accesorios como en las tuberías. Se dispone de longitudes de hasta 20 pies. Existen también llaves ciegas y válvulas recubiertas de diafragma.

Los recubrimientos de cloruro de polivinilideno, tienen una excelente resistencia al ácido clorhídrico. La temperatura máxima es de 200°F.

Se utilizan recubrimientos de polipropileno para servicio con ácido sulfúrico. A una concentración del 10 al 30%, el límite superior de temperatura es de 200°F. En la gama de concentración del 50 al 93%, dicha temperatura cae de 150 a 75°F.

Los recubrimientos de poliéter clorado se utilizan para ácido clorhídrico, fluorhídrico y sulfúrico, a temperaturas de hasta 250°F.

Los recubrimientos de fluoruro de vinilideno se utilizan para muchos productos químicos incluyendo bromo y ácido clorhídrico al 50%, a temperaturas desde 300°F.

Las tuberías recubiertas de caucho se hacen en tramos de hasta 20 pies con tuberías sin costura, rectas con costuras soldadas y de algunos tipos de soldadura en espiral, utilizando diversos tipos de caucho natural y sintético adhesivo. El tipo de caucho se escoge para proporcionar el recubrimiento más adecuado para el servicio específico. En general, se usa caucho blando para la

resistencia a la abrasión, semiduro para servicios generales y duro para las condiciones más exigentes de servicio. Existen condiciones de recubrimientos de pliegues múltiples de caucho duro y blando. El espesor del recubrimiento va de 1/8 a 1/4 de pulgada, dependiendo del servicio, el tipo de caucho y el método de recubrimiento. Existen accesorios de acero vaciado, hierro dúctil, hierro colado, con recubrimiento de caucho. Los accesorios los adquiere normalmente el distribuidor puesto que es esencial la ausencia de porosidad en la superficie interna.

Existen válvulas de retención, de diafragma y de compuerta, recubierta de caucho duro. En las válvulas de compuerta, el vástago, el conjunto de cufia y los anillos de asiento, y en las válvulas de retención, el pasador de bisagra, el brazo de chapaleta, el disco y el anillo de asiento se deben hacer de un metal resistente a la solución que se maneja.

Se usan tuberías de acero con recubrimiento de caucho para ácido clorhídrico a temperaturas de hasta 175°F y concentraciones de hasta el 50%. También se emplea para disulfuro de carbono a temperatura ambiente.

Existen tuberías de acero con recubrimiento de TFE y FEP, en tamaños de 1 a 12 plg y longitudes de hasta 20 pies, los recubrimientos no se ven afectados por las concentraciones de ácidos, álcalis o solventes; pero se requieren orificios y estrías internas en la tubería de acero, para liberar los gases que penetran por los forros. Se debe consultar a los fabricantes antes de utilizar este tipo de tuberías para servicios de vacío. Los

límites superiores de temperatura son de 400°F para el TFE (politetrafluoroetileno) y 300°F FEP (polímero de fluoroetileno) para 150 lb. Se usan válvulas y accesorios de hierro dúctil, embridados y recubiertos. Las propiedades no adhesivas de recubrimiento hacen que sea ideal para el manejo de sustancias pegajosas o viscosas. El espesor del recubrimiento varía de 60 a 150 mils, dependiendo del tamaño de la tubería. Sólo se usan juntas embridadas.

Tuberías de plástico. En contraste con otros materiales de tubería, las de plástico están libres de corrosión interna y externa, y se pueden cortar y unir con facilidad y no provocan corrosión galvánica cuando se unen a otros materiales.

Existen tubos y tuberías de polietileno (PE) en tamaño de 42 pulgadas y menores. Tienen una excelente resistencia, a la temperatura ambiente, a las sales, los hidróxidos de sodio y amonio y los ácidos sulfúrico, nítrico y clorhídrico. Se producen tubos y tuberías por extrusión de resinas cuya densidad varía con el proceso de fabricación. Las propiedades físicas y, por consiguiente, el espesor de las paredes, dependen de la resina que se utilice. Se agrega aproximadamente un 3% de negro de carbón para proporcionar resistencia a la luz ultravioleta. El uso de resinas de mayor densidad reduce las aberturas y los orificios que se producen en servicios e incrementa la resistencia del material y la temperaturas máxima de servicio.

Existen tubos y tuberías de cloruro de polivinilo (PVC) y cloruro de polivinilo clorado (CPVC) en tamaños de 12 plg y menores para el PVC y de 4 plg y menores para el CPVC. Tienen una excelente resistencia a la temperatura ambiente a las sales, el alcohol, la gasolina, el hidróxido de amonio y el ácido sulfúrico, el nítrico, el acético y el clorhídrico; pero puede sufrir daños mediante las cetonas, los aromáticos y algunos hidrocarburos clorados.

Las juntas unidas con solventes son estándar; pero a veces se usan juntas atornilladas con tuberías del Patrón 80. Las juntas cementadas no se deben tocar durante cinco minutos y alcanzan la resistencia total en un día. Debido a las diferencias de dilatación térmica, las juntas entre las tuberías PVC y las tuberías metálicas deben tener bridas, utilizando una brida PVC en la tubería PVC y un empaque de cara completa. Existen bridas con perforaciones A.N.S.I. D16.5, de 150 lb. Existen en PVC válvulas de bola y válvulas de bola de tipo Y, así como también de diafragma.

Las tuberías y accesorios de polipropileno tienen una excelente resistencia a la mayoría de los ácidos minerales y orgánicos comunes y sus sales, los álcalis fuertes y débiles y muchos productos químicos orgánicos.

Tuberías termofraguadas y reforzadas. La resina epoxirreforzada con vidrio tiene una buena resistencia a los ácidos no oxidantes, los álcalis, el agua salada y los gases corrosivos. El refuerzo de

vidrio es muchas veces más fuerte a la temperatura ambiente que los plásticos, no pierde resistencia al aumentar la temperatura y refuerza a la resina eficientemente hasta 300°F. El refuerzo de vidrio se sitúa cerca de la pared exterior, protegido del contenido por una pared gruesa de resina y de la atmósfera, por una pared delgada de resina. Los tamaños normales son de 2 a 12 plg. Un diseño típico, con espesores de paredes del Patrón 40 y el 80 para tuberías de acero, se acerca mucho a las presiones permisibles de las tuberías de acero soldadas por ensamble a 80°F; pero cae a la mitad de esa presión tolerable a 180°F.

Los sistemas de tuberías de resina de poliéster con refuerzo de vidrio son similares al tipo de epoxi. Hay una gran variedad de resinas de poliéster. Las resinas de bifenol resisten los ácidos fuertes, al igual que las soluciones alcalinas. La gama de tamaños va de 2 a 12 plg y el intervalo de temperaturas es de 0 a 220°F. Los diámetros no están normalizados. Se utilizan juntas de casquillos cementados con adhesivos y juntas ensambladas y reforzadas, de tendido manual. Para estas últimas, el refuerzo consiste en capas de tela de fibra de vidrio, saturadas con cemento adhesivo.

Se producen tuberías de presión en tamaños de 1 1/2 a 12 pulgadas, de resina furán con refuerzo de vidrio, que resiste los ácidos, los álcalis y los solventes ácidos clorados hasta 280°F. Hay también accesorios y normalmente se proporcionan todos ellos con extremos lisos.

La resina fenólica Haveg 41 con refuerzo de asbesto se encuentra en forma de accesorios y tuberías con varios tipos de juntas. Es resistente a la mayor parte de los productos químicos ácidos, sobre todo al ácido clorhídrico. Las juntas estándar utilizan bridas cortadas de hierro colado, colocadas en estrías cónicas, maquinadas en la parte exterior de la tubería, cerca de los extremos. Las longitudes estándar son de 4 pies en los tamaños de 1/2 y 3/4 de pulgada y de 10 pies en todos los demás tamaños.

Las bridas tienen perforaciones según el Código A.N.S.I. B16.5, con la excepción de que los orificios de los pernos son menores. También existen accesorios con juntas de manguito cementadas, para utilizarse en donde la corrosión externa pueda destruir las bridas de hierro colado. Hay válvulas de globo del tipo Y, de diafragma y de retención.

En Haveg 31, la resina fenólica se modifica para mejorar la resistencia al cloro húmedo.

La resina furán Haveg 61 rellena de asbesto es muy resistente a la mayoría de los ácidos y las bases, de manera intercambiable, así como también a muchos hidrocarburos, compuestos orgánicos halogenados y ácidos orgánicos. (1)

6.1.2. Protección Catódica

Para proteger una tubería enterrada obviamente se requiere de un ánodo de larga vida, como su reemplazo requiere que se excave. Un valor típico de la vida de un ánodo es de diez años, el peso

del ánodo requerido depende del metal empleado y de la corrosividad del suelo. Otro problema es que en los suelos con alta resistividad la resistencia total en el circuito de la celda pueda ser tan alto que el flujo de la corriente sea virtualmente inhibido- es decir, hay poca o no hay solución de sacrificio del ánodo. En otro extremo, con suelos que tienen baja resistividad será necesario incorporar una resistencia adicional en el circuito para limitar la corriente de la celda, y prolongar la vida del ánodo. Un valor de diseño generalmente aceptado para la corriente de la celda es de 100 mA.

El magnesio es el metal preferido, teniendo un potencial substancialmente más grande que el zinc o el aluminio. En la siguiente tabla 6.1 se muestran los pesos típicos de los ánodos empleados en varios suelos, los cuales son capaces de proteger durante diez años manteniendo una corriente en la celda de 100 mA.

TABLA 6.1.

Resistividad del suelo ohm-cm	peso del ánodo de magnesio
abajo de 750	29 lb (10 Kg)
1 500 - 3 000	14.5 lb (6.5 Kg)
arriba de 3 000	7.7 lb (3.5 Kg)

6.1.3. Sistemas de Corriente Impresa

En este sistema se elige un ánodo externo de uno de los materiales más catódicos (el material que se encuentra al final de la escala galvánica), y se le aplica una corriente continua. Entonces el ánodo forma el lado positivo de un circuito de corriente directa abarcando la tubería o el sistema que va a ser

protegido y el suelo que rodea la línea. El valor de la corriente impresa inhibe cualquier corriente de celda galvánica que sea generada y entonces previene la corrosión que ocurra en el metal protegido. La densidad de corriente que se requiere se encuentra en un intervalo tan bajo como 0.00001 mA/pie^2 (0.0001 mA/plg^2 para tuberías recubiertas en ciertos suelos arriba de 0.1 amp/pie^2 10 amp/plg^2).

Los materiales que se emplean para los ánodos incluyen grafito, hierro con 14% de silicón, titanio y titanio platinizado. Los ánodos se colocan normalmente en una zanja especial o en una cama de tierra de coque fino. Dichos sistemas normalmente se diseñan para presentar un servicio de 20 años, con el mínimo de mantenimiento. Aunque es muy cara la instalación, resulta efectivo el costo a lo largo del tiempo. El punto principal de revisar es que se mantenga el flujo de corriente. (2)

6.2. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE BOMBAS

Las consideraciones que se deben hacer cuando se diseña una bomba son:

- Integridad Moldeada.
- Propiedades Mecánicas.
- Soldaduras.
- Espesor.
- Roscas.
- Juntas.
- Mantenimiento.
- Diseño Apropiado del Prensaestopas.

- Empaquetaduras.
- Sellos Mecánicos.
- Temperatura.
- Presión.
- Eje.
- Superficie del Eje.

6.2.1. GUIA DE SELECCION DE MATERIALES PARA BOMBAS CENTRIFUGAS

Los datos requeridos para la selección apropiada del material:

1. Solución bombeada
2. Principios corrosivos
3. PH (en caso de solución acuosa)
4. Impurezas u otros constituyentes
5. Gravedad específica
6. Temperatura de la solución
7. Presión de vapor a temperaturas superiores
8. Viscosidad
9. Aireación
10. Otros gases en la solución
11. Sólidos en suspensión
12. Servicio continuo o intermitente
13. Tipo de material de la línea de tubería conectada a la bomba
14. Experiencia anterior, en la selección del material
15. Vida económica considerada.

Pasos para conocer el material de construcción de la bomba:

EJEMPLO

Sea un Fluido de Trabajo el Tolueno

1. De la Tabla No. 1, en la columna de "Líquido" localizamos el fluido.
2. Una vez localizado, tenemos que para este fluido le corresponden los siguientes números:

17, 18

3. Con estos números entramos a la Tabla No. 2, encontrando así la descripción de los materiales utilizables para la construcción de la bomba;

Esto es:

17 - Indica, una bomba de bronce es conveniente.

18 - Indica, una bomba toda de hierro.

4. De la Tabla No. 1, para el fluido localizado, de la columna de "Clase de Material" vemos que le corresponden las siguientes clases:

S-1, I-1, I-2

5. Con estas clases entramos a la Tabla No. 3, encontrando los materiales recomendables para cada parte de la bomba; esto es:

NOTAS:

1. Los materiales de las partes de las bombas para cada clase de material se encuentran en la Tabla 6.4.
2. La corrosividad de aguas sucias, hidrocarburos arriba de 450°F, ácidos y lodos ácidos puede variar ampliamente. Una recomendación de material debe ser obtenida para cada servicio. La clase de material indicada es satisfactoria para cada muchos

de estos servicios, pero de ser verificada.

3. Las carcazas de fierro fundido donde se recomienda para hidrocarburos o servicios químicos, son para lugares no peligrosos únicamente. Usar carcazas de acero (S-1 para I-1) para bombas en servicios localizados cerca de las plantas de proceso o en cualquier lugar en donde algún vapor desprendido debido a una falla, genere una situación peligrosa, o en donde las bombas puedan ser sujetas a un golpe de carga.
4. Debe obtenerse la recomendación de materiales por separado para servicios que no sean claramente identificados por las descripciones de los servicios enlistados en esta tabla.
5. Si la corrosividad del producto es baja, la clave S-4 de materiales puede ser usada para servicios a 450-700°F.
6. Usese para el material de la bomba, Alloy 20 ó monel y sellos mecánicos dobles con un sistema de aceite presurizado.
7. Considerese el contenido de oxígeno y solución amortiguadora de agua en la selección del material.
8. Todas las soldaduras deben ser relevadas de esfuerzos.
9. Use materiales Clase A-7 excepto para carcaza de acero al carbón.
10. Materiales de sello mecánico. Para corrientes conteniendo cloruros, los resortes y otras partes mecánicas deben ser de Alloy 20 o mejores. Buna-N, neopreno no deben ser usados en ningún servicio conteniendo aromáticos. Viton no debe ser usado conteniendo aromáticos arriba de 200°F. (3)

SERVICIO	CLAVE DEL MATERIAL	CLASE DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (°F)	NUMERO DE NOTA DE REF.	SERVICIO	CLAVE DEL MATERIAL	CLASE DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (°F)	NUMERO DE NOTA DE REF.
Acido Hidrofluosulfonico	14, 18	I-2, S-9			Amoníaco		S-1	Abajo de 450	
Acido Mésico	8, 9, 10, 11, 12, 18	S-3, I-2, A-7, A-8			Aceites desulfurizados		S-4	450 a 700	5
Acido agua mineral	8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-2, A-7, A-8			Agua Limpia		I-1 I-2	Abajo de 212	
Acido mezclado Sulfúrico + nítrico	3, 8, 9, 10, 11, 12, 18	S-5, S-3, I-1 A-7, A-8			Agua de Torre de Enfriamiento		I-1 I-2	Abajo de 212	
Acido Nafénelico	5, 8, 9, 10, 11, 18	S-6, C-6, S-3, I-1, A-7, A-8			Agua de Alimentación a Calderas		I-1 I-2	Abajo de 250	7
Acido nítrico Dil.	5, 6, 7, 8, 9, 10, 12	S-6, C-6, A-7 A-8			Agua de Proceso		I-1 I-2	Abajo de 250	7
Acido nítrico Conc. hirviendo	6, 7, 10				Agua de Extracción de Acumuladores		S-3	Abajo de 350	2
Acido oxálico frío	8, 9, 10, 11, 12	S-3, A-7, A-8			B				
Anhidrido sulfúrico	8, 9, 10, 11, 12	S-3, A-7, A-8			Benceno y Benzol	17, 18	S-2 I-1 S-1	Abajo de 350 Abajo de 450	
Agua con cloro dependiendo de la Conc.	8, 10, 11, 12	S-3, A-8			Butano	3, 17, 18	S-1	Abajo de 450	
Alumbre crómico	10, 11, 12	S-3			Bisulfito de Calcio	9, 10, 11	S-3, A-8		
Agua destilada condensada	16, 17	I-2			Bisulfito de Carbono	18	I-2		
Agua destilada alta pureza	8, 16	A-7, I-2			Bisulfito de Sodio	10, 11, 12	S-3		
Anilina	17, 18	I-1, I-2			Bicarbonato de Potasio	18	I-2		
Anilina hidrosulfídrica	11, 12	S-3			Bicarbonato de Sodio	8, 9, 10, 11, 13, 18	S-3, I-2 A-7, A-8		
Asfalto caliente	5, 18	S-6, C-6, I-1			C				
Acetato cúprico de amonio	8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-1, A-7 A-8			Cloroformo	8, 9, 10, 11, 14, 16	I-1, I-2, S-3 A-7, A-8, S-9		
Aceite de creosota	17, 18	I-1, I-2			Cloruro de Cobre	11, 12	S-3		
Aceite de alquitrán de hulla	8, 9, 10, 11, 17, 18	S-3, I-1, A-7 A-8, I-2			Cloruro de Potasio	18	I-1		
Aceite de coco	8, 9, 10, 11, 14, 16, 17, 18	S-3, I-1, I-2 A-7, A-8, S-9			Cianógeno en Agua	18	I-1		
Aceite crudo frío	16, 17	I-2			Cloruro de Etileno Frío	8, 9, 10, 11, 14, 16	S-3, I-2, S-9 A-7, A-8		
Aceite crudo caliente	3	S-6			Cloruro Férrico	11, 12	S-3		
Aceite volátil	16, 17, 18	I-1, I-2			Cloruro Ferroso Frío	11, 12	S-3		
Aceite de alumbrado	17, 18	I-1, I-2			Cola Caliente	17, 18	I-1, I-2		
Acido Oxálico Caliente	10, 11, 12	S-3			Cloruro de Amonio	9, 10, 11, 12, 14	S-3, A-8, S-9		
Acetato de Sodio	9, 18	I-1, A-8			Caolín Suspensión en Agua	3, 18	S-6, I-1		
Acetato de Vinilo	9, 18	I-1, A-8			Caolín Suspensión en Acido	10, 11, 12	S-3		
Alumbre de Potasa	9, 10, 11, 12, 13, 14, 18	S-3, I-2, A-8 S-9			Cloruro de Litio	18	I-1		
Acido Muriático	Ver Acido Hidroclórico				Cloruro de Magnesio	8, 9, 10, 11, 12, 16	S-3, I-2 A-7, A-8		
Asfalto		S-1 S-6 C-6 I-1	Abajo de 480 480 a 700 Arriba de 700 Abajo de 360	2,5 2	Cloruro de Mercurio muy Diluido	9, 10, 11, 12	S-3, A-8		
					Cloruro de Bario	8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-1 A-7, A-8		
					Cerveza	8, 16	I-2, A-7		
					Clorato de Calcio	10, 11, 12	S-3		
					Celulosa de Acetato	9, 10, 11	S-3, A-8		

SERVICIO	CLAVE DEL MATERIAL	CLASE DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (°F)	NUMERO DE NOTA DE REF.	SERVICIO	CLAVE DEL MATERIAL	CLASE DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (°F)	NUMERO DE NOTA DE REF.
Clorobenceno	8, 16, 17	I-2, A-7			Etilen Glicol	9, 18	I-1, A-8		
Cloruro de Mercurio Conc.	11, 12	S-3			Etanol	Ver alcoholes			
Cloruro de Metileno	8, 18	I-1, A-7			F				
Combustible de Petróleo	17, 18	I-1, I-2			Fosfato de Amonio	8, 9, 10, 11, 14, 18	S-3, I-1, S-9 A-7, A-8		
Clorato de Potasio	8, 9, 10, 11, 12	S-3, A-7, A-8			Formaldehido	8, 9, 10, 11, 18	S-3, A-7, A-8, I-2		
Cloruro de Potasio	8, 9, 10, 11, 12, 16	S-3, I-2 A-7, A-8			Furfural	8, 9, 10, 11, 16, 18	S-2 I-1 S-1	Abajo de 350 Abajo de 450	
Carbonato de Potasio	18	I-1			Fenol	-----			
Cianuro de Potasio	18	I-1			Fosfato de Sodio Monobásico	8, 9, 10, 11, 16	A-7, A-8 S-3, I-2		
Carbonato Sódico Anhidro (Ceniza de soda) Frio	18	I-1			Fosfato de Sodio Dibásico	8, 9, 10, 11, 16, 18	A-7, A-8 S-3, I-2, I-1		
Carbonato Sódico Anhidro (Ceniza de soda) Caliente	8, 9, 10, 11, 13, 14	S-3, A-7, A-8, S-9			Fosfato de Sodio Tribásico	18	I-1		
Carbonato de Sodio Solución doctor		I-1	Abajo de 350		Fondos de Mezclas de Crudos		S-1 S-6 C-6 I-1	Abajo de 450 450 a 700 Arriba de 700 Abajo de 350	2,5 2
Clorato de Sodio	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8			G				
Cianuro de Sodio	18	I-1			Gasolina	17, 18	S-1 S-6 C-6 I-1	Abajo de 450 450 a 700 Arriba de 700 Abajo de 350	2,5 2
Cloruro Estánico	11, 12	S-3			Glucosa	16, 17	I-2		
Cloruro Estañoso	11, 12	S-3			Glicerina	16, 17, 18	I-1, I-2		
Cloruro de Azufre Frio	18	I-1			Gasóleo		S-1 S-6 C-6 I-1	Abajo de 450 450 a 700 Arriba de 700 Abajo de 350	2,5 2
Cloruro de Zinc	9, 10, 11, 12	S-3, A-8			Gas LP		S-1	Abajo de 450	
Cloruro de Mercurio	18	I-1			H				
Crudo		S-1 S-6 C-6 I-1	Abajo de 450 450 a 700 Arriba de 700 Abajo de 350	2,5 2	Hidróxido de Potasio	5, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 18	C-6, S-3, A-7 I-1, A-8, S-6, S-9		
Cumano		I-1 S-1	Abajo de 350 Abajo de 450		Heptano	17, 18	I-1, I-2		
Condensado		I-1 I-2	Abajo de 212		Hidrosulfito de Sodio	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8 S-3		
CH					Hipoclorito de Sodio	10, 11, 12	S-3		
Chapopote Caliente	3, 18	I-1, S-6			Hexametáfosfato de Sodio	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8		
Chapopote y Amonio en Agua	18	I-1			Hipoclorito de Calcio	10, 11, 12, 16,	S-3, I-2		
D					Hidróxido de Sodio	5, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 18	C-6, S-3, I-1, S-6 A-7, A-8, S-9		
Difenil	3, 18	S-6, I-1			Hidróxido de Sodio (20% y menos)		S-1 S-3	Abajo de 140 140 a 200 Arriba de 200	8 8 6
Desechos Fangosos	16, 17, 18	I-1, I-2			I				
Desechos de Destilería	8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-2 A-7, A-8			Iodoformo	9	A-8		
Dietilen Glicol	9, 18	I-2, A-8			Isomaxato		S-4	450 a 700	5
Diesel		S-1 S-6 C-6 I-1	Abajo de 450 450 a 700 Arriba de 700 Abajo de 350	2,5 2					
E									
Esmalte	18	I-1							
Eter de Petróleo	17, 18	I-1, I-2							

SERVICIO	CLAVE DEL MATERIAL	CLASE DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (F)	NUMERO DE NOTA DE REF.	SERVICIO	CLAVE DEL MATERIAL	CLASE DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (F)	NUMERO DE NOTA DE REF.
J					O				
Jugo de Remolacha	8, 16	I-2, A-7			Orina	8, 9, 10, 11, 16	S-3, I-2, A-7 A-8		
Jugo de Frutas	8, 9, 10, 11, 14, 16	S-3, I-2, S-9 A-7, A-8			P				
Jugo de Vegetales	8, 9, 10, 11, 14, 16	S-3, I-2, S-9 A-7, A-8			Pulpa de Remolacha	8, 9, 10, 11, 16, 17	S-3, I-2, A-7 A-8		
Jugo de Caña	13, 16, 17	I-2			Peróxido de Hidrógeno	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8		
K					Plomo Fundido	3, 18	S-6, I-1		
Kerosina		S-1 S-6 C-6 I-1	Abajo de 450 450 a 700 Arriba de 700 Abajo de 350	2, 5 2	Potasa	8, 9, 10, 11, 13, 14, 16	S-3, I-2, A-7 A-8, S-9		
L					Propano	3, 17, 18	S-1	Abajo de 450	
Licores	3, 9, 10, 11, 12, 14, 18	S-5, S-3, I-1 A-8, S-9			Piridina	18	I-1		
Lejía Caústica (Hidróxido de Sodio)	5, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 18	C-6, S-3, A-7 I-1, A-8, S-6			Plumbito de Sodio	18	I-1		
Leche	8	A-7			Pulpa de Madera	16, 17, 18	I-1, I-2		
Leca	16	I-2			Parafina Caliente	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8		
Licor de Jabón	18	I-1			Potasa Caústica	Ver hidróxido de potasio			
Licor de Tanio	8, 9, 10, 11, 12, 14, 16	S-3, I-2, A-7 A-8, S-9			R				
M					Resina	18	I-1		
Malta de Cerveza	8, 16	I-2, A-7			Revolvedor Fotográfico	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8		
Metacresol	5, 18	C-6, I-2, S-6			Residuo		S-1 S-6 C-6 I-1	Abajo de 450 450 a 700 Arriba de 700 Abajo de 350	2, 5 2
Manteca de Cerdo Caliente	17, 18	I-1, I-2			Reformador Catalíticos		S-4	450 a 700	5
Melaza	16, 17	I-2			S				
Mostaza	8, 9, 10, 11, 12, 16	S-3, I-2, A-7 A-8			Sengre	16, 17	I-2		
Metasilicato de Sodio	18	I-1			Solventes de Acetato	8, 9, 10, 11, 16, 17, 18	S-3, I-1, I-2 A-7, A-8		
Metil-etil-cetona	9, 18	I-1, A-8			Sulfato de Amonio con Acido Sulfúrico	9, 10, 11, 12, 16	S-3, I-2, A-8		
Metafosfato de Sodio	8, 9, 10, 11, 16	S-3, I-2, A-7 A-8			Salmuera, Cloruro de Sodio PH > 8	8	A-7		
N					Salmuera Cloruro de Sodio PH < 8	10, 11, 13, 14, 16	S-3, I-2, S-9		
Nafta	17, 18	Ver Gasolina			Salmuera, Calcio y Cloruro de Magnesio	10, 11, 13, 14, 16	S-3, I-2, S-9		
Nitro Etano	17, 18	I-1, I-2			Salmuera, Calcio y Cloruro de Sodio	10, 11, 13, 14, 16	S-3, I-2, S-9		
Nitro Metano	17, 18	I-1, I-2			Salmuera, Cloruro de Sodio Menor del 3% de Sal, Frio	13, 16, 18	I-1, I-2		
Nitrato de Plata	8, 9, 10, 11, 12	S-3, A-7, A-8			Salmuera, Cloruro de Sodio Arriba del 3% de Sal, Caliente	9, 10, 11, 12, 14	S-3, A-8, S-9		
Nitrato de Sodio	5, 8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-1, A-7 A-8, C-6, S-6			Salmuera Agua de Mar	16, 17, 18	I-1, I-2		
Nitrato de Estroncio	8, 18	I-1, A-7			Salmuera, Cloruro de Sodio Arriba del 3% de Sal, Frio	8, 9, 10, 11, 13, 14 16	A-7, A-8, S-9 S-3, I-2		
Nitrato de Amonio	8, 9, 10, 11, 14, 18	S-3, I-1, A-7 A-8, S-9							
Nitrato de Bario	8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-1, A-7 A-8							
Nitrato de Cobre	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8							
Nitrato de Potasio	5, 8, 9, 10, 11, 18	C-6, S-3, I-1 A-7, A-8, S-6							
Nitro Benceno	9	A-8							

SERVICIO	CLAVE DEL MATERIAL	CLASE DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (°F)	NUMERO DE NOTA DE REF.	SERVICIO	CLAVE DEL MATERIAL	CLASE DE MATERIAL	RANGO DE TEMPERATURA (°F)	NUMERO DE NOTA DE REF.
Salsa de Tomate (catsup)	8, 9, 10, 11, 16	A-7, A-8			V				
Sosa Caustica	5, 8, 9, 11, 13, 15, 18	S-3, I-2 C-8, S-3, I-1 A-7, A-8, S-8			Vinagre	8, 9, 10, 11, 12, 16	S-3, I-2, A-7 A-8		
Sulfato Ferroso	9, 10, 11, 12, 14	S-3, A-8, S-9			Vitriolo Azul	Ver sulfato de cobre			
Sulfato de Cobre	8, 9, 10, 11, 12	S-3, A-7, A-8			Vitriolo Verde	Ver sulfato ferroso			
Sulfato Férrico	8, 9, 10, 11, 12	S-3, A-7, A-8			Vitriolo Blanco	Ver sulfato de zinc			
Sulfato de Sodio	8, 9, 10, 11, 16	S-3, I-2, A-7, A-8			Vino	8, 16	I-2, A-7		
Sulfuro de Hidrógeno	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8			Vinagre de Madera	Ver ácido piroligneo			
Sulfato de Magnesio	8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-1, A-7 A-8			W				
Sulfato de Manganeso	8, 9, 10, 11, 16, 18	S-3, I-1, I-2 A-7, A-8			Whisky	8, 16	I-2, A-7		
Sulfato de Mercurio en Acido Sulfúrico	10, 11, 12	S-3			X				
Sulfato Mercurioso en Acido Sulfúrico	10, 11, 12	S-3			Xileno	8, 9, 10, 11, 17, 18	S-2 I-1 S-1	Abajo de 350 Abajo de 450	
Sulfato de Nicotina	10, 11, 12	S-3							
Sulfato de Potasio	8, 9, 10, 11, 16	S-3, I-2, A-7 A-8							
Sulfato de Piridina	10, 12								
Sulfuro de Sodio	8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-1, A-7 A-8							
Sulfuro de Amonio	8, 9, 10, 11, 18	S-3, I-1, A-7 A-8							
Sulfuro de Zinc	9, 10, 11, 16	S-3, I-2, A-8							
Sulfuro de Aluminio	10, 11, 12, 14	S-3, S-9							
Sulfuro de Sodio	8, 9, 10, 11, 16	S-3, I-2, A-7 A-8							
Soluciones de MEA, DEA, TEA		S-1		Abajo de 250					
Soluciones pobres de DEA, TEA		S-1		Abajo de 250					
Soluciones pobres de MEA (CO ₂ solamente)		S-9		175 x 300					
Soluciones pobres de MEA (CO ₂ , H ₂ S)				175 x 300	9				
Soluciones ricas de MEA, DEA, TEA		S-1		Abajo de 175					
T									
Tetracloruro de Carbono Anhidro	17, 18	I-1, I-2							
Tetracloruro de Carbono más Agua	8, 16	I-2, A-7							
Tiosulfato de Sodio	8, 9, 10, 11	S-3, A-7, A-8							
Tetraetilo de Plomo	17, 18	I-1, I-2							
Tolueno	17, 18	I-2 I-1 S-1		Abajo de 350 Abajo de 450					
Trifluoroetileno	8, 16, 17, 18	I-1, I-2, A-7							

TABLA G. 9.
TABLA RESUMEN DE MATERIALES (*)

CLAVE DEL MATERIAL	DESIGNACION CORRESPONDIENTE DE LAS SIGUIENTES SOCIEDADES **			DESCRIPCION
	ASTM	ACI	AISI	
1	A48, Class 20, 25, 30, 35, 40 y 50	---	---	Hierro gris - seis grados.
1 (a)	A536 y A395	---	---	Hierro fundido dúctil - seis grados.
2	B143, 1A, 1B y 2A; B144, 3A; B145, 4A	---	---	Estaño de bronce y estaño aplomado de bronce-7 aleaciones (incluye dos aleaciones no cubiertas por las especificaciones de la ASTM, como se explica arriba en la sección No. 2).
3	A216-WCB	---	1026	Acero al carbón
4	A217-C5	---	501	Acero 5% cromo
5	A296-CA15	CA15	410	Acero 12% cromo
6	A296-CB30	CB30	---	Acero 20% cromo
7	A296-CC50	CC50	448	Acero 28% cromo
8	A296-CF-8	CF-8	304	Acero austenítico 19-9
9	A296-CF-8M	CF-8M	316	Acero austenítico al móvil, 19-10
10	A296-CN-7M	CN-7M	---	Acero de cromo níquel austenita con cobre y molibdeno 20-29
11	---	---	---	Serie de níquel - baja aleación
12	A518	---	---	Hierro fundido con silicio-alta resistencia a la corrosión.
13	A436	---	---	Hierro fundido austenítico-2 tipos
13 (a)	A439	---	---	Hierro fundido austenítico dúctil
14	---	---	---	Aleación de níquel y cobre
15	---	---	---	Níquel
16	Indica, una bomba toda de bronce			
17	Indica, una bomba de bronce es conveniente			
18	Indica, una bomba toda de hierro			

* Producida del Hydraulic Institute Standars™ para bombas Centrífugas, Rotatorias y Reciprocantes 12 Ed.

** ASTM - Sociedad Americana de Resistencia de Materiales.
ACI - Instituto de Fundición de Aleaciones
AISI - Instituto Americano del Hierro y el Acero.

TABLA 6.4. MATERIALES PARA PARTES DE BOMBAS CENTRIFUGAS

PARTE	MATERIAL ASTM	CLASE DE MATERIAL Y ABBREVIACIONES		
		I-1	I-2	S-1
		cl	cl	STL
CARCAZA	SI	HIERRO FUNDIDO	HIERRO FUNDIDO	ACERO AL CARBON
PARTES INTERNAS DE LA CARCAZA (TAZONES, DIFUSORES, DIAFRAGMAS)	NO	HIERRO FUNDIDO	BRONCE	HIERRO FUNDIDO
IMPULSOR	SI	HIERRO FUNDIDO	BRONCE	HIERRO FUNDIDO
ANILLOS DE DESGASTE DE LA CARCAZA	NO	HIERRO FUNDIDO	BRONCE	HIERRO FUNDIDO
ANILLOS DE DESGASTE DEL IMPULSOR	NO	HIERRO FUNDIDO	BRONCE	HIERRO FUNDIDO
FLECHA	SI	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON
MANGA DE LA FLECHA (BOMBAS EMPACADAS)	NO	CROMO 12% ENDURECIDO	BRONCE DURO	CROMO 12% ENDURECIDO
MANGA DE LA FLECHA (SELLOS MECANICOS)	NO	ACERO INOXI DABLE 18-8 O CROMO 12%	ACERO INOXIDA- BLE 18-8 O CROMO 12%	ACERO INOX DABLE 18-8 O CROMO 12%
BUJES	NO	HIERRO FUNDIDO	BRONCE	HIERRO FUNDIDO
MANGAS INTERETAPAS	NO	HIERRO FUNDIDO	BRONCE	HIERRO FUNDIDO
BUJES INTERETAPAS	NO	HIERRO FUNDIDO	BRONCE	HIERRO FUNDIDO
ANILLO DE SELLO (SI LA BOMBA ES EMPACADA)	NO	HIERRO FUNDIDO	HIERRO FUNDIDO O BRONCE	HIERRO FUNDIDO
PRENSAESTOPAS CON EMPAQUE O PLACA DE RETENCION DEL SELLO MECANICO	SI	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON
PERNOS O TORNILLOS DEL PRENSAESTOPAS	SI	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	ACERO AISI 4140
PERNOS DE LA CARCAZA Y CAJA DE CHUMACERAS	SI	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	ACERO AISI 4140
EMPAQUE DE LA CARCAZA	NO	COMPOSI CION DE ASBESTOS	COMPOSI CION DE ASBESTOS	COMPOSICION DE ASBESTOS

S-3	S-4	S-5	S-6	S-9	C-6
STL NI RESIST	STL STL	STL STL CHR 12%	STL CHR 12%	STL MONEL	CHR 12% CHR 1%
ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	CROMO 12%
NI-RESIS- TENTE	HIERRO FUNDIDO	ACERO AL CARBON	CROMO 12%	MONEL	CROMO 12%
NI-RESIS- TENTE	ACERO AL CARBON	ACERO AL CARBON	CROMO 12%	MONEL	CROMO 12%
NI-RESIS- TENTE	HIERRO FUNDIDO	CROMO 12% ENDURECIDO	CROMO 12% ENDURECIDO	MONEL	CROMO 12% ENDURECIDO
NI-RESIS- TENTE	HIERRO FUNDIDO	CROMO 12% ENDURECIDO	CROMO 12% ENDURECIDO	MONEL	CROMO 12% ENDURECIDO
ACERO AL CARBON CROMO 12% ENDURECIDO	ACERO AL CARBON CARBURO DE TUNGSTENO- S, CROMO 12%	ACERO AISI 4140 CARBURO DE TUNGSTENO- S, CROMO 12%	ACERO AISI 4140 CARBURO DE TUNGSTENO- S, CROMO 12%	K. MONEL K. MONEL ENDURECIDO	CROMO 12% CARBURO DE TUNGSTENO S, CROMO 12
ACERO INOXIDABLE 18-8 O CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8 O CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8 O CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8 O CROMO 12%	K. MONEL ENDURECIDO	ACERO INOXIDABLE 18-8 O CROMO 12%
NI-RESIS- TENTE	HIERRO FUNDIDO	CROMO 12%	CROMO 12%	MONEL	CROMO 12%
NI-RESIS- TENTE	HIERRO FUNDIDO	CROMO 12% ENDURECIDO	CROMO 12% ENDURECIDO	K. MONEL ENDURECIDO	CROMO 12% ENDURECIDO
NI-RESIS- TENTE	HIERRO FUNDIDO	CROMO 12% ENDURECIDO	CROMO 12% ENDURECIDO	K. MONEL ENDURECIDO	CROMO 12% ENDURECIDO
HIERRO FUNDIDO	HIERRO FUNDIDO	HIERRO FUNDIDO	HIERRO FUNDIDO	MONEL	CROMO 12%
ACERO AL CARBON (NOTA 6)	ACERO AL CARBON (NOTA 6)	ACERO AL CARBON (NOTA 6)	ACERO AL CARBON (NOTA 6)	ACERO AL CARBON (NOTA 6)	CROMO 12% (NOTA 6)
ACERO AISI 4140	ACERO AISI 4140	ACERO AISI 4140	ACERO AISI 4140	K. MONEL ENDURECIDO	ACERO AISI 4140
ACERO AISI 4140	ACERO AISI 4140	ACERO AISI 4140	ACERO AISI 4140	K. MONEL ENDURECIDO	ACERO AISI 4140
COMPOSI- CION DE ASBESTOS	ACERO INOX DABLE 18-8, ASBESTOS ENCHAQUETA- DOS (NOTA 9)	ACERO INOX DABLE 18-8 ASBESTOS ENCHAQUETA- DOS (NOTA 9)	ACERO INOX DABLE 18-8 ASBESTOS ENCHAQUETA- DOS (NOTA 9)	TEFLON (NOTA 7)	ACERO INOX DABLE 18-8 ASBESTOS ENCHAQUETA DOS (NOTA 9)

D-6	A-7	A-8
CHR 5%	AI 18-8	AI 316
CHR 12%	18-8 (NOTAS 2 Y 5)	AI 316 (NOTA 2)
CROMO 5%	ACERO INOXIDABLE 18-8	ACERO INOXIDABLE 316
CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8	ACERO INOXIDABLE 316
CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8	ACERO INOXIDABLE 316
CROMO 12% ENDURECIDO	ACERO INOXIDABLE 18-8 ENDURECIDO (NOTA 1)	ACERO INOXIDABLE 316 ENDURECIDO (NOTA 1)
CROMO 12% ENDURECIDO	ACERO INOXIDABLE 18-8 ENDURECIDO (NOTA 1)	ACERO INOXIDABLE 316 ENDURECIDO (NOTA 1)
CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8	ACERO INOXIDABLE 316
CARBURO DE TUNGSTENO-3 CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8 ENDURECIDO (NOTA 1)	ACERO INOXIDABLE 316 ENDURECIDO (NOTA 1)
ACERO INOXIDA- BLE 18-8 O CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8	ACERO INOXIDABLE 316
CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8	ACERO INOXIDABLE 316
CROMO 12% ENDURECIDO	ACERO INOXIDABLE 18-8 ENDURECIDO (NOTA 1)	ACERO INOXIDABLE 316 ENDURECIDO (NOTA 1)
CROMO 12% ENDURECIDO	ACERO INOXIDABLE 18-8 ENDURECIDO (NOTA 1)	ACERO INOXIDABLE 316
CROMO 12%	ACERO INOXIDABLE 18-8	ACERO INOXIDABLE 316
CROMO 12% (NOTA 6)	ACERO INOXIDABLE 18-8, CARBON O (NOTA 6)	ACERO INOXIDABLE 316, CARBON O (NOTA 6)
ACERO AISI 4140	ACERO INOXIDABLE 18-8	ACERO INOXIDABLE 316
ACERO AISI 4140	ACERO AISI 4140	ACERO AISI 4140
ACERO INOXIDA- BLE 18-8, ASBESTOS ENCHAQUETADOS (NOTA 3)	ACERO INOXIDABLE 18-8, ASBESTOS ENCHAQUETADOS (NOTA 3)	ACERO INOXIDABLE 316, ASBESTOS ENCHAQUETADOS (NOTA 3)

6.3. VENTILADORES

Los materiales de construcción y los tipos de sellos empleados en un ventilador dependen de la composición del gas que se está manejando. Los materiales estándar incluyen el hierro fundido y el acero al carbón para la envolvente, aluminio y acero al carbón para los impulsores, y acero al carbón para los ejes. En algunos casos se requerirán otros materiales. Por ejemplo, si se requiere que el ventilador mueva una mezcla mojada de amoníaco, dióxido de carbono, y aire, quizá sea necesario construir todas las partes que están en contacto con el gas de acero inoxidable (304 o 316).

Los plásticos reforzados con fibra de vidrio (FRP) también se aceptan como materiales de construcción para los ventiladores, aunque las unidades de FRP tienen límites de presión. Por ejemplo, un ventilador de 7 1/2 plg de diámetro con una velocidad estándar de 120 000 pies³/min se construyó sólo para una presión estática máxima de 2 plg.

Con aletas inclinadas hacia atrás, los ventiladores de FRP pueden manejar flujos de 65 000 pies³/min a una presión estática de 3 plg (8 200 pies/min de velocidad). Con soportes especiales y reforzados, los ventiladores FRP con aletas radiales pueden manejar presiones arriba de 20 plg de agua a flujos arriba de 45 000 pies³/min (16 000 pies/min de velocidad).

La resistencia a la corrosión puede mejorarse con materiales especiales de recubrimiento los que con frecuencia están

disponibles con los fabricantes de ventiladores a costos más bajos que los materiales especiales. Sin embargo, el éxito de la aplicación de los recubrimientos depende de la experiencia. Lo adecuado de un recubrimiento es que siempre se prueban antes de emplearse en un servicio similar.

Cualquier tipo de recubrimiento especificado, su extensión y espesor se deben indicar claramente. La preparación de la superficie y el método de aplicación debe estar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del recubrimiento. Generalmente, se incluyen en el precio fijado por el fabricante superficies ráfagas de arena o las ráfagas de tiro, pero las preparaciones especiales no.

Quizá sea imposible recubrir las superficies interna y externa con recubrimientos cocidos. En algunos casos, recubriendo las superficies que están en contacto con la corriente de aire sea más satisfactorio y mucho menos costoso.

Las temperaturas permitidas de los recubrimientos deberían ser más altas a las temperaturas esperadas en la operación por un margen apreciable. Algunas veces se emplea hule, su temperatura límite es de 180°F la velocidad de las ruedas forradas con hule es de cerca de 13,000 pies/min.

Como regla, la velocidad máxima permitida para ventiladores industriales, grandes y modernos es de aproximadamente de 40,000 pies/min. Cuando la rueda es recubierta con cualquier material, es necesario emplear velocidades más lentas. Entonces la relación de presión de las máquinas se vuelve limitada.

Los revestimientos de resinas epóxicas o poliésteres también se

emplean con éxito para proteger las superficies de los ventiladores de los gases corrosivos. Estos y los recubrimientos se pueden emplear para velocidades comprendidas entre 20,000 y 28,000 pies/min.

Para reducir los costos, un fabricante puede recomendar que se recubra el eje y algunas partes de movimiento más lento con un revestimiento y atornillar, remachar, o rociar la superficie metálica en las porciones expuestas a velocidad alta. El Colmonoy 5, la Estelita 3 y 5, y el Inconel X se pueden emplear satisfactoriamente en ambientes sujetos a tensiones corrosivas como sulfuro de hidrógeno. Cuando la construcción de un ventilador permite emplear placas de Inconel X, Hastelloy, u otros materiales adecuados se pueden atornillar o remachar para minimizar la erosión.

Los métodos de construcción de ventiladores son tan numerosos como los fabricantes de los mismos. Las envolventes y los impulsores se pueden remachar, soldar, fundir, o atornillar. Los cojinetes pueden ser del tipo manga o antifricción y- dependiendo de la velocidad, la carga, y la temperatura- puede ser autolubrificante o requerir un sistema lobular. Si se emplean cojinetes antifriccionantes, entonces se tendrá poca vida pero la temperatura será la máxima permitida- de acuerdo a la norma ANSI especificada. Generalmente, se tiene un mínimo de 30 000 h de vida satisfactoria, pero para ventiladores de fuerte acción 50 000 h es más conservativo. La temperatura de los cojinetes, como se mide internamente, no deberá exceder los 180°F. (4)

6.4. COMPRESORES

La selección de los materiales para emplearse en maquinaria rotatoria deben ser estudiados cuidadosamente y evaluados en las condiciones de operación esperada.

Los factores que deben considerarse son:

1. Las tensiones de operación de las partes rotatorias, determinadas por el diseño, tamaño y velocidad de rotación, deben conocerse para seleccionar materiales que tengan suficiente resistencia.
2. Las tensiones de operación de la envolvente y otros elementos estacionarios también deben conocerse. Para estas partes la tensión se determina principalmente por el diseño, tamaño y presión interna.
3. Se debe evaluar el gas que va a manejar el compresor para determinar su agresividad con respecto a los materiales de construcción. Si ocurrirán altos porcentajes de corrosión, con materiales ordinarios, se deben seleccionar materiales alternativos, aunque se genere un costo adicional apreciable.
4. Debe determinarse la temperatura de operación esperada, ya que es un factor importante en todo lo hablado anteriormente, afecta la rapidez a la cual las reacciones de corrosión ocurren, afecta la resistencia de los materiales, e influye susceptiblemente en la falla de fragilización.

6.4.1. Fabricación del Impulsor

6.4.1.1. Tipos de impulsores

El corazón de un compresor centrífugo es su elemento rotatorio; por lo tanto, se pone gran atención en la fabricación de los impulsores. Los impulsores totalmente cerrados con una pared posterior sólida y cubierta, como se muestra en la figura 6.1, son los tipos más comunes en los compresores de etapas múltiples. Presentan más problemas de fabricación que los impulsores de tipo abierto o semicerrado, empleado más comúnmente en máquinas de una etapa (figura 6.2). Por esta razón se pone principal atención a los impulsores totalmente cerrados.

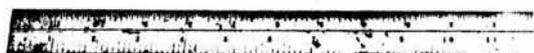
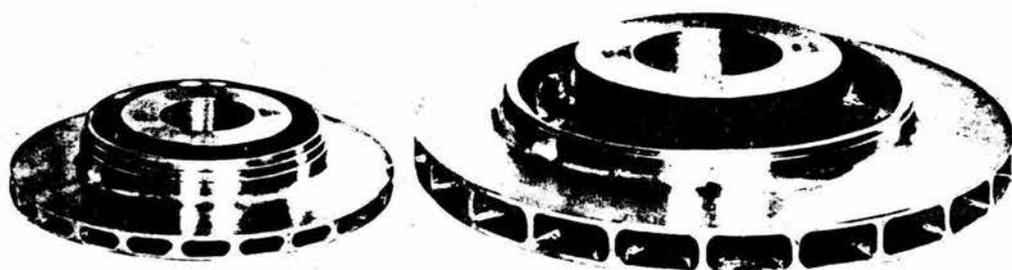


Figura 6.1. Fabricación típica de impulsores cerrados.



Figura 6.2. Fabricación típica de un impulsor abierto.

En casi todos los casos, los impulsores de los compresores se fabrican de materiales que son considerados difíciles de soldar, pero han sido desarrolladas técnicas satisfactorias para este propósito. Miles de impulsores han sido fabricados exitosamente.

6.4.1.2. Materiales para los Impulsores

Materiales Comunes

El disco del impulsor y la cubierta de las forjas siempre se hacen de una aleación de acero como AISI 4140 o 4340. La selección final del grado de aleación particular para cada aplicación depende del nivel de resistencia deseado y del tamaño del impulsor, la AISI 4140 es satisfactoria para casi todas las aplicaciones; la AISI 4340 se emplea para impulsores más grandes o de resistencia mayor por su endurecimiento más grande y su resistencia al temple. Su mayor resistencia al temple hace posible que mejore el límite de elasticidad mientras se mantiene una temperatura de templado relativamente alta. La temperatura de templado mínima permisible es 1 100°F, la que hace posible un buen balance entre la resistencia, la dureza, y la baja tensión interna.

Las forjas de AISI 4140 y 4340 son tratadas térmicamente para obtener el nivel deseado de resistencia. Después de remacharse y soldarse, los impulsores son tratados térmicamente para templar la zona afectada por el calor en la base del metal adyacente a la soldadura. La dureza del metal base varía con la resistencia requerida, pero frecuentemente es Rockwell C-26. En la zona afectada por el calor inmediatamente después de soldarse, la

dureza puede ser tan alta como Rockwell C-45 o 50. Después del templado a 1 100°F, este valor cae en el C-28 a 30.

Un tratamiento térmico de postsoldadura a una temperatura superior a la temperatura mínima de templado para los forjados podría dar como resultado una pérdida de resistencia en el centro o la cubierta del material base.

Materiales Especiales

Donde se necesita más resistencia a la corrosión, que la disponible de aleaciones ordinarias de aceros, como en los procesos químicos y petroquímicos los compresores de gas contienen humedad y gases corrosivos, el acero inoxidable Tipo 410 de la AISI, que contiene 12% de cromo, siempre es el primer paso. La soldabilidad del Tipo 410 es comparable a las aleaciones de aceros.

Se puede obtener un mejoramiento adicional en la resistencia a la corrosión para un ambiente más agresivo a través del uso del endurecimiento por precipitación de los aceros inoxidables, como Armco 17-4PH o 15-5PH. Estos grados son apreciablemente más caros, tienen las ventajas de un futuro mejoramiento a la corrosión y una soldabilidad mucho mayor que el acero inoxidable Tipo 410. Los grados de endurecimiento por precipitación también tienen resistencia más grande, por esta razón algunas veces se emplea donde la resistencia a la corrosión del Tipo 410 podría ser adecuada.

Los aceros inoxidables austéniticos, como los Tipos 304, 304L, 316, y 316L, se emplean ocasionalmente para impulsores de

velocidad lenta porque su resistencia a la corrosión es atractiva en ciertos ambientes. Sin embargo, la resistencia producida es sólo de 30.000 lb/plg², imponiendo un límite severo en la velocidad e impidiendo su uso para más aplicaciones. Se han empleado los tipos 304L y 316L, o han sido propuestos para utilizarse en compresores de una etapa con 100% de sulfuro de hidrógeno. Este gas se reporta como seco en una operación normal, pero puede mojarse durante el proceso como también durante el arranque o el paro.

El empleo del acero inoxidable austenítico en los impulsores se debe a que su coeficiente de expansión térmica es un 50% más alto que el de la aleación de acero empleada en los ejes. La construcción más común del rotor consiste de la contracción de los impulsores en carbón o ejes de aleación de acero. Si la excursión de temperatura durante la operación es suficiente, el crecimiento diferencial del eje y el impulsor puede ocasionar que el impulsor se afloje del eje. Una contracción pesada no puede emplearse para compensar este problema por la baja resistencia del material.

Las excursiones de temperatura en compresores de una etapa siempre son tales que el coeficiente de expansión diferencial puede manejarse, y estos materiales han dado un mejoramiento en la resistencia con gases como el dióxido de azufre.

Otro material que ha sido empleado para impulsores de compresores centrífugos es el Monel K500. Ha sido empleado principalmente para gases halógenos en condiciones húmedas, y el record es generalmente bueno, aunque la rapidez de corrosión algunas veces es alta lo suficiente para requerir un reemplazo

ocasional. También ha sido empleado por su resistencia a hechar chispas en compresores de oxígeno.

La compresión de gases halógenos, especialmente cloro, presenta un problema interesante. Si el cloro está verdaderamente seco y la temperatura se conserva por debajo de 275°F, los materiales estándares se pueden emplear satisfactoriamente. En pocas ocasiones, los compresores para el servicio de cloro mojado han sido construidos de titanio puro. Sus impulsores fundidos eran del tipo inducido abierto. La envolvente fundida de la voluta tenía un peso de 1800 lb, Figura 6.3. Todo el fundido era al vacío en moldes de grafito.

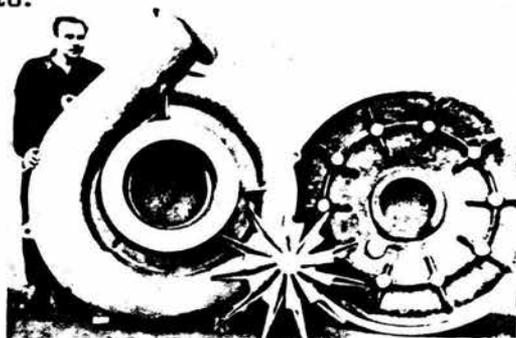


Figura 6.3. Componentes de titanio en un compresor para un servicio de cloro mojado.

Mientras el titanio trabaja excepcionalmente bien con cloro mojado, no se puede emplear con cloro seco porque, en el hecho de un centro que podría generar una temperatura elevada, el titanio es pirofórico. Esta característica puede suprimirse añadiendo humedad al cloro, generalmente la cantidad mínima aceptable de contenido de humedad es 0.015%.

El Inconel 625 también ha sido empleado como material de

construcción del impulsor en un compresor que maneja un gas con alto contenido de cloro. Mientras la resistencia producida no es tan alta como la de las aleaciones de acero.

Los impulsores de aleaciones de aluminio han sido empleados grandemente, pero en un intervalo limitado de aplicaciones. Algunas aleaciones de aluminio de alta resistencia se encuentran disponibles, y se espera que se incremente el número de aplicaciones. Las limitaciones de su uso han sido (1) el decremento de la resistencia aproximadamente arriba de 300°F, y (2) las dificultades en la fabricación de impulsores cerrados de composiciones de alta resistencia.

Los impulsores de aleaciones de aluminio fundido cerrados y semicerrados han sido empleados en algunos compresores centrífugos. Los impulsores de aleaciones de aluminio no se emplean para servicio de oxígeno por el hecho de que en el centro entre las partes rotatorias y estacionarias causa que el aluminio alcance una temperatura alta, hay la posibilidad de una reacción térmica con óxidos en la superficie de las partes de hierro o acero.

El aluminio y el acero algunas veces son seleccionados para los impulsores del compresor centrífugo por su baja densidad, aun en ambientes donde la corrosión no ocurre con aleaciones de acero bajas. Esta densidad más baja causa un cambio en las velocidades críticas laterales de un rotor lo cual es muy ventajoso.

6.4.1.3. Recubrimientos Protectores

Componentes Estacionarios

La facilidad de recubrir componentes estacionarios depende de lo accesible que resulte la superficie para limpiarla y recubrirla. Los componentes de un compresor de una etapa, como el ducto de entrada y las placas posteriores, siempre son de geometría simple, permitiendo una fácil destrucción abrasiva y el subsecuente recubrimiento, Fig. 6.4. Las entradas de los compresores de etapas múltiples y las volutas de compresores de una etapa son marcadamente más complejas. Casi todas las envolventes, como las volutas de un compresor de una etapa, Fig. 6.5, son candidatas marginales para recubrir. Las aspas en máquinas grandes siempre tienen buen acceso, pero las máquinas más pequeñas pueden tener un acceso extremadamente limitado. El diseño funcional eficiente de diafragmas de entreetapa (los cuales redirigen el flujo de gas a la siguiente etapa de compresión, Fig. 6.6) resulta en pasajes de gas que son más difíciles de recubrir.

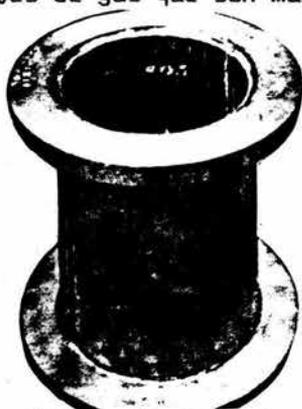


Figura 6.4. Ducto de entrada de compresor de una etapa adecuado para recubrirse.

Componentes Rotatorios

Las partes rotatorias como los impulsores requieren

recubrimientos que den una superficie "lubricada", en procesos sensibles, para reducir el área expuesta al fluido. En un caso, cuando se reportó que un proceso químico era sensible al hierro, todas las superficies internas (incluyendo el impulsor) de tres



Figura 6.5. Voluta de un compresor de una etapa cuya superficie interna no puede limpiarse o recubrirse.

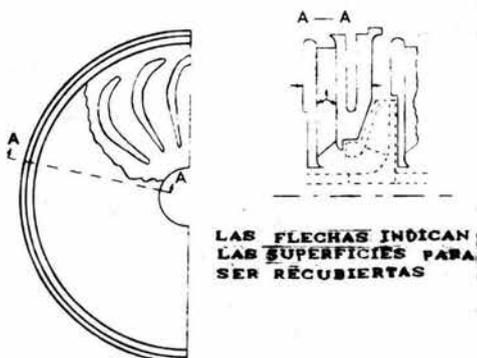


Figura 6.6. Diafragma esquemático de un compresor centrífugo indicando las superficies funcionales que requieren recubrimiento.

compresores de una etapa se recubrieron con 0.001 a 0.002 plg de níquel. Dicho servicio ha sido satisfactorio.

La razón más común para recubrir a los impulsores es la

resistencia a la corrosión. Los impulsores de acero han sido recubiertos para prevenir la erosión y corrosión, pero sólo infrecuentemente. Se ha hecho uso limitado de recubrimientos orgánicos como las resinas fenólicas y epóxicas, o sus modificaciones. Las resinas de clorotrifluoroetileno y fluoruro de polivinilideno, Kel-F y Kynar también han tenido aplicaciones exitosas.

Para justificar el recubrimiento de un impulsor, el costo del método de recubrimiento y las modificaciones subsecuentes de los procedimientos de fabricación debe ser considerablemente menor que un material compatible con el ambiente.

Con los impulsores recubiertos, se debe poner atención a:

1. Premecanizar para adaptar el espesor del recubrimiento donde las tolerancias dimensionales lo requieran.
2. Una inspección cuidadosa de la superficie prerrecubierta cuando se tiene un fundido.
3. Debe hacerse un balanceo antes y después del recubrimiento.
4. Preparación de la superficie antes del recubrimiento.
5. Protección del recubrimiento durante la transferencia y el ensamblado para evitar daños.

La consideración de lo anterior dará un servicio de 1 a 2 años. En una lista de reparaciones, un procedimiento prudente de servicio podría ser instalar un rotor recubierto. Se recomienda altamente para evitar el uso de impulsores recubiertos. El original entonces puede recubrirse, rebalancearse, etc. y estar disponible para una reinstalación en la siguiente revisión.

El chequeo del balance del impulsor posee dos problemas. El

primero, ocasiona el manejo bajo circunstancias en la que la protección de la caja rellena no puede prevenir, por mucho tiempo, que se dañe el recubrimiento. Segundo, cuando no es posible retirar el metal para mejorar el balance requerido, es necesario remover la mancha del recubrimiento. El área de la superficie total de la remoción del recubrimiento se debe conservar en el mínimo. Aunque regrese subsecuentemente a la mejor condición posible- un procedimiento que varía con cada uno de los materiales de recubrimiento- el área recubierta puede ser ligeramente menos resistente al medio corrosivo que al original.

La condición de las superficies fundidas o fabricadas puede realzar el empleo de un recubrimiento. Es obligatoria la remoción de la porosidad del hoyo ciego de todas las superficies para ser recubiertas, porque si se permite que permanezcan el ciclo del recubrimiento atraparán aire en estos hoyos. El burbujeo del recubrimiento ocurrirá durante el ciclo de curado con calor, interrumpiendo la continuidad de la película protectora.

Los estándares de construcción para impulsores tienen un problema similar. Como las soldaduras no están penetradas totalmente, sus periferias deben estar selladas con soldadura antes de recubrirse para asegurar la continuidad del recubrimiento. Esta configuración puede recubrirse satisfactoriamente, cuando las orillas sean dobladas y todas las soldaduras sean continuas.

La preparación de la superficie abrasiva, tal como SSPC (Steel Structures Painting Council). La Preparación de la Superficie 10, o la Preparación de la Superficie 5, no puede llevarse a cabo en

puntos pequeños de impulsores abiertos porque no son lo suficientemente largos para aplicar la limpieza y el rociado subsecuente del recubrimiento.

Similarmente, las configuraciones del impulsor, que previenen de soldaduras continuas no son buenos candidatos, ya que los recubrimientos dejarán huecos como resultado de soldaduras intermitentes.

Los impulsores de aleaciones de aluminio casi son anodizados universalmente. Algunas veces se anodizan convencionalmente, pero comúnmente son difíciles de anodizar para obtener un recubrimiento más delgado y más duro que de protección contra la corrosión y erosión. En ambientes donde existe el problema de la acumulación, la superficie porosa del recubrimiento se rellena con el polímero de tetrafluoroetileno.

Superficies externas

El recubrimiento especial de las superficies externas del compresor no presenta problema de accesibilidad. Sin embargo, no existe una consideración única para la preparación de la superficie. Por ejemplo, después de la instalación del rotor existe la posibilidad de dañar a los cojinetes y sellos. Por lo que la envolvente requiere una primera mano de silicatos inorgánicos de zinc que deben ser aplicados antes de ensamblarse el rotor en la envolvente.

6.4.1.4. Selección de Sellos Elastoméricos

La industria señala para los elastómeros una vida útil de 3

años. Estos componentes deberán colocarse en posiciones de fácil acceso para facilitar su reemplazo durante los períodos de inspección y reparación.

En casi todos los compresores, los sellos elastoméricos son de la forma de anillos "O". (Un anillo "O" es una junta continua que tiene un diámetro interior y una anchura de sección transversal con tolerancias establecidas por ambas dimensiones).

Debe elegirse el material para un anillo "O" bien definido cuando la máquina maneja un solo fluido. Por ejemplo, un compresor de nitrógeno gaseoso seco que opera en la descarga a 450°F podría tener anillos "O" de silicón para los sellos estáticos. Sin embargo, en aplicaciones simples como esta que rara vez ocurren, casi todas las selecciones de los sellos elastoméricos son compromisos. La decisión involucra el peso medio del fluido contra la temperatura del servicio y la presión requerida. Se selecciona el mejor material comercialmente disponible para el servicio específico. Algunos ejemplos del control de criterio son:

1. Los fluoroelastómeros no son compatibles con el amoníaco, cetonas, ésteres, éteres o aminas.
2. Los nitrilos no son compatibles con los hidrocarburos aromáticos.
3. El hule natural y el termopolímero etileno propileno se degradan seriamente con productos de petróleo.
4. Los sellos elastoméricos deberán seleccionarse individualmente para muchos lubricantes sintéticos y fluidos hidráulicos.
5. El nitrilo sólo se puede emplear a una temperatura máxima de 212°F.

6. La mayoría de las composiciones de fluorocarbono se limitan a una temperatura máxima de 400°F.
7. Los elastómeros estándares de silicón se limitan a una temperatura máxima de 450°F.
8. Los datos publicados sobre la temperatura máxima se basan siempre en pruebas de exposición relativamente cortas. Considerando el tiempo de exposición en servicio, con frecuencia es necesario reducir los valores a 100°F.
9. Los anillos "O" no deberán emplearse en sellos rotatorios de velocidades altas. El calor producido por la fricción causará que el elastómero se tense, lo que generará más calor por fricción. Esto provocará que el sello se destruya en poco tiempo.

La experiencia de un servicio previo en el mismo o un ambiente parecido es otra consideración importante en la selección del material de un anillo "O".

La compatibilidad de la resistencia química presenta un problema más complejo. Los gases puros son de aplicación sencilla. Las mezclas pueden contener constituyentes corrosivos, tales como aromáticos, alifáticos o hidrocarburos halogenados. Los elastómeros en sellos de gas están expuestos al lubricante, en suma al medio fluido del compresor.

Materiales Especiales y los Requerimientos

El perfluoroelastómero, producido de fluoroelastómeros y fluoropolímeros es compatible química y térmicamente con muchos medio fluidos, igual que los polímeros TFE. Las aplicaciones en

servicios como metil etil cetona/tolueno a 300 y 400°F han sido exitosas. Se sugiere su aplicación en el servicio de sulfuro de hidrógeno mojado.

6.4.1.5. Cuando se presenta el problema de fractura por corrosión bajo tensión. Los ejes de los compresores centrífugos se hacen de aleaciones de acero tratadas térmicamente, siempre los mismos grados, AISI 4140 y 4340, como en los impulsores. Se requiere con frecuencia que su resistencia este por encima de 90,000 lb/plg², para acomodar la tensión máxima aplicada bajo el acoplamiento. En este lugar el eje no se expone al gas.

Las partes estacionarias, incluyendo la envolvente y los diafragmas están hechas de acero al carbón y acero fundido, encontrando los requerimientos de resistencia máxima y dureza para ser inmune a la fractura por sulfuro con un margen de reserva.

6.4.1.6. En la fractura bajo tensión por sulfuro numerosas investigaciones han mostrado que la óptima microestructura para resistir a la fractura por sulfuro es la martensita templada que resulta del tratamiento térmico. Estos estudios han mostrado que las aleaciones de acero que tienen un límite de elasticidad máximo de 90,000 lb/plg², y una dureza máxima de Rockwell C-22 no son susceptibles a la fractura por sulfuro, aún en los ambientes más agresivos. A medida que el nivel de resistencia se incremente de 100 000 a 110 000 lb/plg², la tensión mínima que se requiere para producir la fractura por sulfuro decrecerá en ambientes muy severos

En otros estudios se ha reportado que se mejora la resistencia contra la fractura por sulfuro en el AISI 4130 modificándolo con 0.5 a 1.0% de molibdeno, y el AISI 4135 modificado con 0.5 A 0.75% de molibdeno y 0.035% de colombio. La solución prueba fue ácido acético al 5% saturada con sulfuro de hidrógeno. Las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente. La mejora se atribuye al incremento de la resistencia debida al templado, que requiere temperaturas más altas para producir un límite de elasticidad dado.

6.4.1.7. En la falla por fragilidad cuando se opera a temperaturas bajas. Los materiales para la envolvente generalmente requieren de una resistencia modesta, como los aceros siguientes: aceros al carbón de grano fino (ASTM A516 Grado 60) con propiedades satisfactorias a la temperatura de -50°F ; el acero con 2 1/4% de níquel (ASTM A203 Grado A); el acero carbón-manganeso-silicón (ASTM A537 Clase 1) a -75°F ; y el acero con 3 1/2% níquel (ASTM A203 Grado E) a -150°F .

Los materiales para las partes rotatorias son: el acero con 3 1/2% de níquel como AISI 2340; el uso del AISI 4330, que es muy bajo en níquel pero muy alto en cromo y molibdeno, se ha vuelto casi universal. Para los requerimientos de impacto lo mejor son las series 43XX por su dureza y su mejor respuesta al tratamiento térmico. Para temperaturas menores a -150°F , se deben seleccionar otros materiales, como el acero con 5% de níquel o aceros con 8 o 9% de níquel. (5)

6.5. FILTROS

6.5.1. Medios de Filtración

La elección del medio de filtración es, con frecuencia, la consideración más importante para asegurar el funcionamiento satisfactorio de un filtro. Esto es igualmente válido para la filtración de torta como para la de medio de filtración. El medio se debe escoger primordialmente por su capacidad para retener los sólidos en el ambiente en que deba funcionar. Para la filtración de tortas, la selección resulta casi siempre de una solución de término medio entre los diferentes atributos, algunos de los cuales tienden a ser mutuamente incongruentes:

1. Capacidad para detener los sólidos sobre sus poros, con rapidez, después que se inicia la alimentación (o sea, propensión mínima a las purgas).
2. Velocidad baja de arrastre de sólidos dentro de sus intersticios (o sea, propensión mínima a los atascamientos).
3. Resistencia mínima al flujo de filtrado (o sea, velocidad elevada de producción).
4. Resistencia a los ataques químicos.
5. Suficiente resistencia para sostener la presión de filtración.
6. Resistencia aceptable al desgaste mecánico.
7. Capacidad para descargar torta con facilidad y limpieza.
8. Capacidad para ajustarse mecánicamente al tipo de filtro con el cual se utilizará (tabla 6.5).
9. Costo mínimo.

Para la filtración con medios filtrantes, se aplican los

*
atributos 3, 4, 5, 8 y 9 de la lista anterior y es preciso agregarles a) capacidad para retener los sólidos que se requieren, b) libertad de descarga de pelusa o algún otro material adulterador en el filtrado y c) capacidad para no atascarse con rapidez (o sea, larga duración).

Los medios filtrantes se fabrican de algodón, polímeros sintéticos, vidrio, asbesto, celulosa, metales y otros materiales que forman fibras, de carbono, metal, retazos, polímeros sintéticos y otros sólidos porosos o perforados y de arenas y otros sólidos en partículas capaces de formar un lecho permeable.

Para la filtración de torta, el tipo más común de medio es el de textiles tejidos de algodón o fibras sintéticas. El algodón sigue siendo el material simple más utilizado, debido a su bajo costo inicial, disponibilidad en una gran variedad de tejidos y adaptabilidad general. Sin embargo, los textiles de polímeros sintéticos, como grupo, superan en la actualidad al algodón como medios de filtración, debido a los amplios límites de resistencia química y tolerancia a la temperatura que proporciona siempre alguno de ellos. Esas cualidades se resumen para las fibras textiles más populares como medios filtrantes, en la tabla 6.6.

Existen telas metálicas de varios tipos de tejido en níquel, cobre, latón, bronce, aluminio, acero, acero inoxidable, monel y muchas otras aleaciones. En el tejido liso, el espaciamiento más cerrado del alambre que existe es el de malla 400, lo cual limita el uso de este tejido a las pulpas, las lechadas cristalinas gruesas, etc. Los llamados "tejidos holandeses" emplean alambres largos y rectos, relativamente anchos y de espaciamiento recto,

que permiten que el relleno, torcido y relativamente pequeño se pueda tejer en forma mucho más cerrada, proporcionando un buen medio para la filtración de pulpas y cristales finos. Sin embargo, este tipo de tejido tiende a atascarse con facilidad, cuando se

TABLA 6.5. REQUISITOS MECANICOS DE MEDIOS FILTRADORES CON RESPECTO AL TIPO DE FILTRO*

Tipo de filtro	Necesidades de tela
De placas y marcos	Buenos empaques, estabilidad dimensional
De tambor giratorio	Resistencia a la tensión y la fricción
Centrífugo	Conformidad en la forma del tazón de la centrífuga, resistencia a la tensión
Horizontal	Rigidez, resistencia al desgaste
Hojas de presión y vacío	Estabilidad dimensional; facilidad de cosido

*French, Chem. Eng., 70 (21), 189 (1963).

Tabla 6.6. Características de materiales de filtros*

Nombre genérico y descripción	Resistencia a la ruptura/g/óner	Resistencia al desgaste	Resistencia a los ácidos	Resistencia a los álcalis	Resistencia a los agentes oxidantes	Resistencia a los solventes	Peso específico	Temperatura operativa máxima, °F
Acetato acetato de celulosa. Cuando no menos del 92% de los grupos hidroxilo estén acetilados, se puede utilizar el término genérico "triacetato"	1.2-1.5	G	F	P	G	G	1.33	210
Acético: cualquier polímero sintético de cadena larga compuesto al menos en un 85% en peso por unidades de acrilonitrilo.	2.0-4.8	G	G	F	G	E	1.18	240
Vidrio: la sustancia que forma las fibras es vidrio	3.0-7.3	P	E	F	E	E	2.54	OK
Metálico: compuesto de metal, plástico recubierto de metal, metal recubierto de plástico o un núcleo cubierto todo de metal	—	G						
Metacrílico: la sustancia que forma la fibra es cualquier polímero sintético de cadena larga compuesto por menos del 85%, pero al menos el 35%, en peso de unidades de acrilonitrilo.	2.5-3.0	G	G	G	G	G	1.90	190
Nylon: cualquier poliamida sintética de cadena larga con grupos amino repetidos como parte integrante de la cadena polimérica	3.5-9.2	E	F-P	G	F-P	G	1.14	225
Poliéster: cualquier polímero sintético de cadena larga compuesto al menos en un 85% en peso por un éster de un alcohol dibásico y un ácido terciario (p. ej. HGOOC-C ₆ H ₄ -COOH)	2.2-7.6	E-G	G	G-F	G	G	1.32	240
Policiclono: polímero sintético de cadena larga compuesto al menos en un 85% en peso por estireno	1.0-7.0	G	G	G	F	G	0.92	165
Polipropileno: polímero sintético de cadena larga compuesto al menos en un 85% en peso por propileno	4.8-8.3	G	E	E	G	G	0.90	250
Rayón: compuesto por celulosa regenerada y fibras fabricadas de celulosa regenerada en las que los sustituyentes han reemplazado a no más del 15% de los grupos hidroxilo	1.5-5.7	G	P	F-P	F	G	1.44	210
Saral: la sustancia que forma la fibra es cualquier polímero sintético de cadena larga compuesto al menos en un 85% en peso por unidades de cloruro de vinilideno (CH ₂ CCl ₂)	1.0-2.3	G	G	G	F	G	1.70	150
Algodón: fibras naturales	3.3-6.4	G	P	F	G	G	1.52	210
Fluorocarbóno: polímero sintético de cadena larga compuesto por unidades de tetrafluoroetileno	1.0-2.0	F	E	E	E	G	2.15	250

* Adaptado de Marx, Chem. Eng. 78(4), 51(1971). Los símbolos tienen los siguientes significados: E = excelente; G = bueno; F = regular; P = pobre.

† Polímero de baja densidad. Haste 230 °F para alta humedad.

‡ Teja solidificada térmicamente. De otro modo, más suave.

§ Requiere ventilación, porque libera gran cantidad por encima de 400 °F.

filtran partículas suaves y amorfas, utilizando la filtración conveniente. Debido a la larga vida de la tela adecuada de alambre, en filtraciones corrosivas y a altas temperaturas, resulta conveniente instalar esos medios de modo más o menos permanente.

Los metales se utilizan también en la forma de medios porosos rígidos. Se usan láminas y tubos de acero inoxidable sinterizado y otros metales, en filtros clarificadores y como base para los filtros de prerrecubrimiento.

Otros medios porosos se producen de muchos materiales. Las placas, los tubos y las formas especiales de grafito, que existen en una gama muy amplia de porosidades, son resistentes a todos los ácidos y los álcalis, en condiciones no oxidantes. La aloxita, el alúndum, la sílice y la porcelana se usan de manera similar y son resistentes a todos los ácidos, excepto el fluorhídrico; pero no a los álcalis fuertes. Existen también materiales plásticos, incluyendo el teflón.

Los medios fibrosos no tejidos para filtros incluyen fieltros comprimidos; las denominadas "telas no tejidas", que se producen mediante la elaboración en seco en una trama, seguida por la aglutinación o la plastificación con agentes adecuados, la borra de algodón y el papel. Esos materiales se emplean hasta que fallan y, a continuación, se descartan, por lo común después de un solo ciclo.

Los fieltros prensados y la borra de algodón se utilizan para filtrar partículas gelatinosas de pinturas, soluciones de hilados y otros líquidos viscosos y para eliminar la suciedad de la leche.

La filtración se produce mediante la deposición de las partículas sobre las fibras a través de la trama, que se apoya de manera adecuada en uno o los dos lados.

Las tramas no tejidas, que se pueden fabricar de algodón, rayón o fibras sintéticas, se usan para fines similares, principalmente en las prensas de placas y marcos y los filtros por gravedad. Se producen en pesos de entre 0.5 y 13 onzas/yarda². Se pueden diseñar con intersticios de un patrón y un tamaño controlado y uniforme. En la gama de pesos bajos, han tenido un éxito especial en la filtración por gravedad de aceites enfriadores. En la gama más alta son útiles en los filtros prensa, sobre todo para la clarificación viscosilla de alta viscosidad y otras soluciones, retirando partículas de hasta 5 micras o menos. En esta última utilización, se suelen espardear por lo común dos o más capas, para formar una cubierta compuesta.

Con frecuencia se usan pulpas y papeles de filtro para retener sólidos muy finos y para aclarar líquidos que contengan pequeñas cantidades de sólidos. Existen en diversos grados de permeabilidad, espesor y resistencia y algunos son resistentes a los ácidos y los álcalis fuertes. Deben apoyarse bien en el filtro y, si se va a retirar una torta sin destruir el papel, será preciso cubrirlos con una lámina.

Se utilizan mucho los lechos granulares, como los de filtros de arena y carbón, para filtrar agua y soluciones químicas, con el fin de retirar pequeñas cantidades de sólidos que se coagulan con facilidad. Se limpia mediante el retrolavado a una velocidad suficiente para desprender el lecho y llevarse los sólidos finos.

6.5.2. Ayudas para la filtración

Las filtraciones que se enfrentan a los problemas de un bajo nivel de filtración, atascamiento del medio o calidad poco satisfactoria del filtrado, se pueden mejorar mediante una ayuda de filtro, un material granular o fibroso, capaz de formar una torta de filtro sumamente permeable, dentro de la que se incluirán los sólidos que causen dificultades. Las ayudas de filtro son particularmente útiles en lechadas que contienen sólidos muy finamente divididos o grumos limosos y deformables. Su uso puede permitir la conversión de una clarificación que emplea un medio profundo a una filtración de torta, empleando un medio de tela ligera o metal entrelazado, con una economía y rendimiento mejores.

Las partículas de una buena ayuda de filtro deben ser de baja densidad volumétrica, para minimizar su tendencia al asentamiento; deben ser porosas y capaces de formar una torta porosa y químicamente inertes al filtrado. Esas características las tienen las dos ayudas comerciales de filtración que más se emplean: el sílice diatomáceo (denominado también diatomita y tierra diatomácea), un sílice casi puro, preparado a partir de yacimientos de esqueletos diatomáceos y perlita dilatada, partículas de lava "hinchada", que son principalmente de silicato alcalino de aluminio. Las fibras de celulosa y asbesto se utilizan también mucho como ayudas de filtración, las últimas, con frecuencia, en combinación con diatomita o perlita. Se han usado en casos especiales carbono, greda, magnesia, sal y yeso, menos eficientes que las otras. La arcilla decolorante y el carbono

activado, por lo común junto con sílice diatomáceo, actúan como adsorbentes y ayudas simultáneas de filtración, para los aceites, las grasas y las soluciones de azúcar.

Las ayudas de filtro de sílice diatomáceo tienen una densidad volumétrica en seco de 8 a 12 lb/pie³ y contienen partículas, en su mayor parte menores que 50 micras. Los diferentes métodos de procesamiento de la diatomita cruda dan como resultado una serie de ayudas de filtración que tienen grados variables de eficiencia y clarificación y velocidad de filtración; las de flujo más y menos libre difieren en la permeabilidad, en un factor de, aproximadamente, 20. La ayuda de filtro de perlita suele tener una densidad volumétrica más baja (3 a 6 lb/pie³) y una fracción mayor de sus partículas caen entre 50 y 150 micras. También existen en ciertos números de grados de eficiencia y para diferentes velocidades de filtración. En forma general, para cada grado de sílice diatomáceo hay una perlita correspondiente. El sílice diatomáceo soporta niveles ligeramente más extremados de pH que la perlita y se sostiene que es un poco menos compresible.

Las ayudas de filtración se usan en dos formas. La primera es como prerrecubrimiento para proteger el medio del filtro y evitar el escape de partículas pequeñas ocasionales al interior del filtro. Para este fin, hasta con una capa delgada, del orden de 0.1 lb de sílice diatomáceo por pie cuadrado de área de filtro. En segundo lugar, la ayuda de filtro se mezcla con la lechada todavía no filtrada, para atrapar las partículas de filtrado difícil en una torta permeable. La cantidad óptima para este fin, aunque relativamente pequeña, varía mucho con la aplicación y se debe

determinar por medio de tanteos. Un punto razonable de partida es de 1 a dos veces la concentración de masa de los sólidos que se van a retirar. Es aconsejable obtener el respaldo del fabricante de la ayuda de filtración.

Los filtros de succión se construyen en las plantas de metal o de madera y se pueden adquirir fondos falsos de madera con este fin, a los fabricantes de tanques de madera. Los fondos falsos de los filtros de succión metálicos pueden ser de placas perforadas, metal sinterizado o poroso o bloques o losas de cerámica porosa (por ejemplo, sílice, alúmina o porcelana). Los fabricantes producen filtros de succión completamente de cerámica o bajo pedido hechos de metal.

Las placas para filtros prensa se pueden hacer de una gran variedad de materiales de construcción: de casi cualquier metal (vaciado o labrado), de metal recubierto (galvanizado, con cubierta de plástico o caucho, etc)., de madera, de madera recubierta con resina epoxi y de polímeros sólidos (caucho duro, fenólico vaciado y laminado, poliéster reforzado con vidrio y poliolefinas). (6)

6.6. INTERCAMBIADORES DE CALOR

6.6.1. Estándares de Diseño

El ingeniero de diseño necesita establecer prácticas estándares para mejorar el balance económico entre el costo del equipo y el costo de mantenimiento y las pérdidas de producción. Estas

prácticas varían en diferentes sitios de la planta como castigo a las fallas de los intercambiadores de calor, y a que la severidad del servicio varía. En general, emplearemos los requisitos del TEMA-B para todos los intercambiadores de calor. Algunos de los estándares son:

1. Espesor de los tubos- El espesor para los tubos siempre se especifica que sea al menos 16 BWG (pared promedio). Este espesor se prefiere porque los tubos pueden relaminarse una y otra vez sin pérdida excesiva de la fuerza del material. Entonces, los goteos entre el tubo y los cabezales pueden repararse en el campo. Sin embargo, ocasionalmente se emplean aleaciones de tubos de 18 BWG en intercambiadores grandes en los que las pequeñas cantidades de derrames se pueden tolerar, tal como un intercambiador de ciclo de gas. También se emplean estándares de intercambiadores con tubos de 18 a 22 BWG en servicios no críticos donde las tensiones térmicas y los porcentajes de corrosión están en niveles bajos.

2. Acanalamiento de los hoyos tubulares- Dos acanaladuras (1/8 plg de ancho por 1/64 plg de profundidad) se especifican para todos los hoyos en las placas tubulares. El uso de acanaladuras provee un seguro barato contra el desarrollo de gotas que resbalan de los tubos en las placas tubulares. Los talleres de mantenimiento han omitido las acanaladuras en algunas unidades de cabeza flotante.

3. Espesor de la placa tubular- El espesor mínimo de 1 plg se emplea para todos los nuevos diseños. Algunos talleres de mantenimiento emplean placas tubulares de 1 1/4 plg en unidades reconstruidas. La placa tubular más gruesa da confianza adicional

de la prueba de goteo en las uniones tubo-placa tubular. Los tubos también se pueden relaminar sin fuera de redondez en los hoyos. El área de contacto añadida en los hoyos de las mamparas da una unión que no se afloja fácilmente por vibración o tensiones inesperadas que ocurran en las uniones tubo-placa tubular durante trastornos en el proceso. Si es necesario, el taller puede maquinarse un octavo de pulgada o más, de la cara de una placa tubular corroída durante las operaciones de reentubado. Esto salva la fabricación de una placa tubular nueva.

4. Minimizar las grietas- La corrosión y la concentración de sales y otros químicos en las grietas de un intercambiador de calor causará falla prematura. Normalmente, especificamos que todos los tubos deben laminarse sobre el espesor entero de la placa tubular. El laminado por fuera de la cara posterior de la placa tubular puede causar corrosión por esfuerzo en aceros inoxidables si el metal se encuentra bajo esfuerzo tensionante. Por consiguiente, es importante no laminar fuera de la cara posterior. Como una reducción de costo, el laminado parcial de los tubos en los hoyos de los tubos se ha especificado para algunos intercambiadores que manejan fluidos limpios y no corrosivos y que requieren placas tubulares gruesas (por encima de 2 1/4 plg).

La grieta entre la placa tubular y la coraza también debe eliminarse soldando por dentro, o especificando el tipo deseado de soldadura como se muestra en la figura UW-13.2 del Código ASME, Sección VIII.

5. Ventilación de la placa tubular- Tres o cuatro ventilaciones de la placa tubular se especifican para todas las unidades verticales

con el propósito de ventilar los gases atrapados bajo la tapa de la placa tubular. La tapa de la tobera del lado de la coraza en casi todos los intercambiadores de calor se localiza a varias pulgadas abajo de la superficie de la placa tubular. El área muerta entre la parte superior de la salida del tobera y la parte baja de la placa tubular puede llenarse con aire o de otros gases inertes sino se ventila.

La corrosión y la fractura bajo tensión ocurren en la interfase entre el líquido y el gas atrapado porque los sólidos generalmente se acumulan en este punto de los tubos. Esta es la causa más común de falla en los condensadores verticales y en los intercambiadores de calor.

Para estar seguro de que hay flujo a través de las ventilas, la tubería que conecta las ventilas a una purga deberá incluir un conducto abierto en el que el flujo se pueda ver regularmente. La tubería conectada a la salida de la tobera deberá incluir un circuito que llene la coraza con líquido sobre la ventila de la placa tubular. Lo anterior se muestra en el diagrama 6.7.

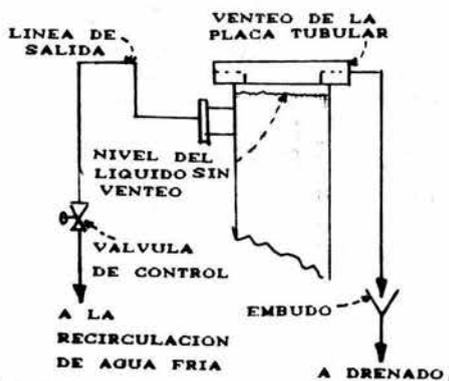


Diagrama 6.7.

En los intercambiadores verticales de cabeza flotante, el extremo flotante se localiza en la cubierta. No es conveniente el venteo de la placa tubular flotante. Especificamos que el punto más alto de la cubierta de la tobera del lado de la coraza debe ponerse rojo dentro de la cara del casco de la placa tubular flotante de tal forma que los gases atrapados bajo la superficie de la placa tubular se extiendan a través de la superficie de la tobera. Además, debe soldarse un acoplamiento de 1 plg a la salida de la tobera y tan cerca de la placa tubular para ventilar los gases. Las ventilas de la placa tubular también se emplean en los rehervidores verticales de termosifón para ventilar inertes y dióxido de carbono que puede acumularse bajo la parte alta de la placa tubular en las esquinas. Hemos tenido corrosión de las corazas opuesto a la parte alta de la tobera donde entra el vapor donde el dióxido de carbono se acumula, como se muestra en la siguiente figura 6.8. Un flujo pequeño de vapor se ventila a la atmósfera.

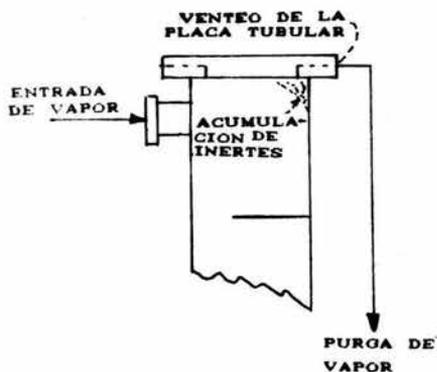


Figura 6.8.

6. Corazas- Los estándares de tubos se especifican para todas las corazas de los intercambiadores de calor arriba de las 24 plg de D.E. Esto permite a los talleres de mantenimiento comprar tubería estándar para reemplazar las corazas de los intercambiadores. Así se ahorra lo costoso del laminado de las corazas. El acero generalmente se emplea para las corazas, con agua de enfriamiento en ellas.

7. Ensuciamiento del lado de la coraza- El ensuciamiento del lado de la coraza con agua de enfriamiento que circula sólo una vez en la coraza se minimiza por:

a. El empleo de pantallas en los cabezales de abastecimiento de agua de enfriamiento para remover partículas de más de 1/16 plg.

b. La instalación de las válvulas y tuberías que permitan la inversión periódica de la dirección del refrigerante durante la operación, si las pantallas en los cabezales del abastecimiento de agua no se proveen. Esta inversión de flujo (remolinos) remueve el limo y también los sólidos que pueden bloquear la salida de la tobera.

c. La inyección periódica de aire en el fondo de la salida del lado de la tobera- especialmente durante los períodos en los que el agua contiene limo en exceso. El interior de la coraza de los intercambiadores sucios se ha limpiado sin cerrarlos inyectando aire cada 1 o 2 min., a través de un mecanismo cronometrado durante un período de varios días.

d. El diseño a una velocidad mínima de 3 pies/seg para mantener el limo suspendido cuando se usa agua de enfriamiento sucia. También se han omitido los tubos de los venteos de las placas

para minimizar el efecto del limo.

e. Los depósitos de limo ocurren donde el flujo es bajo, o donde hay grandes remolinos. Mejorando la distribución de flujo se minimiza la suciedad y el limo.

f. La restricción de las temperaturas de salida del agua de enfriamiento a un máximo de 45 a 50°C, evita la acumulación de sólidos en los tubos.

g. La selección de los metales para los tubos que resistan el ensuciamiento. Por ejemplo, la tubería de acero no se emplea cuando el flujo de agua de enfriamiento está del lado de la coraza. Normalmente los tubos se colocan en arreglos triangulares para los servicios de agua de enfriamiento. Si se anticipa la remoción del haz de tubos y se limpia con agua a presión alta, se especificará un arreglo cuadrado.

B. Protección contra el choque- Las placas contra el choque se emplean para las entradas de vapor de las toberas del lado de la coraza de los intercambiadores de calor. Normalmente las placas se instalan en grandes secciones de la línea de entrada, que provee dos veces el área de la tubería de entrada en el espacio anular alrededor de las placas. Las placas contra choque también se emplean para velocidades altas, para dos fases, y para fluidos abrasivos (requisitos del TEMA-B).

Las zonas de vapor se prolongan hacia la coraza con la finalidad de que sirvan como placa de choque para disminuir las velocidades de entrada del lado de la coraza y para evitar la vibración inducida por el flujo. La figura 6.11 muestra una zona

típica de vapor empleada para gases introducidos del lado de la coraza. (7)

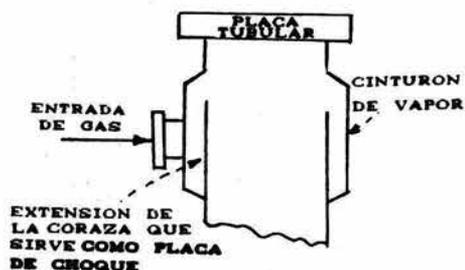


Figura 6.9 .

6.6.2. Materiales de Construcción para Intercambiadores de Calor

El material de construcción más común en los intercambiadores de calor es el acero al carbón. La construcción de acero inoxidable se utiliza a veces en los servicios en plantas químicas y, en raras ocasiones, en las refinerías petroleras. Muchos intercambiadores se construyen con metales disímbolos. Esas combinaciones funcionan satisfactoriamente en algunos servicios. Se requiere un cuidado extremo en su selección, puesto que pueden producirse ataques electrolíticos.

Las aleaciones en servicios en plantas químicas y petroquímicas, en orden aproximado de utilización, son el acero inoxidable de la serie 300, el níquel, el metal monel, las aleaciones de cobre, aluminio, el inconel, el acero inoxidable de la serie 400 y otras aleaciones. En servicios de refinerías

petroleras, el orden de frecuencia cambia y las aleaciones de cobre (para unidades enfriadas por agua) ocupan el primer lugar, y el acero de aleación baja en el segundo. En algunas porciones de la industria petrolera, las aleaciones de cobre, el acero inoxidable de la serie 400, el acero de baja aleación y el aluminio se están convirtiendo en las aleaciones que más se utilizan.

Los tubos de aleaciones de cobre, sobre todo latón Admiralty inhibido, se usan en general con enfriamiento de agua. Las láminas tubulares y los desviadores de aleaciones de cobre son, en general, de latón naval.

Están siendo utilizadas con mayor frecuencia las aleaciones de aluminio en servicios con agua (sobre todo el aluminio Alclad). La aleación Alclad tiene una capa de aleación de aluminio de sacrificio unida metalúrgicamente a una aleación de núcleo.

Los cabezales del lado del tubo para servicio con agua se hacen en una gran variedad de materiales: acero al carbón, aleaciones de cobre, hierro colado, acero al carbono con pintura especial o recubierto de plomo o plástico.

Tubos bimetalicos. Cuando los requisitos de corrosión o las condiciones de temperatura no permiten la utilización de una aleación simple para los tubos, estas tendrán que ser bimetalicas (o dúplex). Se pueden hacer casi de cualquier combinación de metales. Varían también los calibres y los tamaños de los tubos. Para calibres delgados, los espesores de las paredes se dividen en general en partes iguales entre dos componentes. En los calibres mayores, el componente más costoso puede comprender de una quinta

a una tercera parte del espesor total.

Láminas tubulares revestidas Por lo común, las láminas tubulares y otras piezas de intercambiadores son de un metal sólido. Las láminas tubulares bimetálicas o recubiertas se utilizan para reducir los costos o porque no hay ningún metal simple que resulte satisfactorio para las condiciones de corrosión. El material de aleación (por ejemplo, acero inoxidable, metal monel, etc.) se une o se deposita como revestimiento a un material de respaldo de acero al carbón.

Construcción no metálica. Los intercambiadores de casco y tubo con tubos de vidrio proporcionan 13.5 o 60 pies cuadrados de superficie con un diámetro exterior de 3/4 de plg por 0.030 plg de espesor de la pared y por 118.25 plg de longitud. Los cascos pueden ser de vidrio y de tubería de acero. Cada tubo tiene libertad para dilatarse, puesto que se utiliza una lámina selladora de teflón en la junta entre láminas tubulares.

Se producen intercambiadores de calor de grafito impermeable en una gran variedad de formas, incluyendo los de casco y tubo de cabezal exterior empaquetado. Se fabrican con tubos y cabezales del lado del tubo de grafito impermeable y cascos metálicos. (8)

6.6.3. Diseñando para Corrosión en General en Intercambiadores de Placa

Las placas de un intercambiador de placas son delgadas comparadas con la superficie de transferencia de calor de otras formas de equipo (de 25 a 36 mils, comparado con 48 a 64 mils). Por ejemplo, donde el acero inoxidable Tipo 316 ha sido empleado

para enfriar ácido sulfúrico, se requerirá el empleo de un intercambiador de placas para un servicio similar, que especifique una aleación 25 Ni, 20 Cr, 4 Mo, 2 Cu, o aún un Incoloy 825 (40 Ni, 25 Cr, 3 Mo, 2 Cu).

Como guía general, el porcentaje de corrosión máximo permitido para un plato de un intercambiador es de 2 mils/año. (9)

6.7. EVAPORADORES

6.7.1. Consideraciones en el Diseño de Evaporadores de Circulación Forzada

En los evaporadores de circulación forzada, las velocidades del fluido en los tubos están normalmente en la gama aproximada de un mínimo de 4 pies/s en los evaporadores de sal con tubos de cobre o latón y un líquido que contiene 5% o más de sólidos, hasta cerca de 10 pies/s con evaporadores de cáusticos con tubos de níquel y líquidos que contienen sólo una pequeña cantidad de sólidos. Se pueden utilizar velocidades más altas, cuando la erosión no acelere la corrosión.

6.7.2. Materiales de Construcción

- La elección de los materiales depende de:
- Las tendencias corrosivas del fluido procesado.
- La aplicación industrial, como en plantas de alimentos y farmacéuticas en donde la corrosión del producto y/o los requerimientos de higiene dictaminan el empleo de aleaciones de grado más alto.
- Económico.

-La preferencia del usuario.

Los requerimientos para los materiales de construcción afectan no solo la metalurgia de la unidad sino también el tipo seleccionado. Por ejemplo, las unidades de placas y circulación forzada son de coeficientes de calor más altos y de áreas de superficie más pequeñas, marcadas con frecuencia cuando se necesitan aleaciones caras. La tabla 6.7 es una guía parcial para los materiales de construcción típicamente empleados en los evaporadores. (10)

TABLA 6.7. SE EMPLEA UNA AMPLIA VARIEDAD DE METALES Y ALEACIONES PARA FABRICAR EVAPORADORES. AQUI HAY ALGUNOS EJEMPLOS:

PRODUCTO	MATERIALES DE CONSTRUCCION
Nitrato de amonio	Acero inoxidable Tipo 304 o 304L
Sulfato de amonio	Acero inoxidable Tipo 316
Sosa cáustica	Acero al carbón aliviado de tensión, Monel o aleaciones de níquel, dependiendo de la concentración y los contaminantes
Farmacéuticos	Acero inoxidable Tipo 304 o 316, Monel o titanio
Acido fosfórico, diluido, urea pura	Acero inoxidable Tipo 316
Alimentos procesados, jugo de frutas, productos de leche	Acero inoxidable Tipo 304 o 316
Sal (cloruro de sodio)	Acero inoxidable Tipo 316L
Acido sulfúrico	Acero al carbón forrado con caucho o plomo, plomo, grafito, etc., dependiendo de la concentración

6.8. MEDIDAS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION EN CALDERAS

El remedio contra la corrosión causada por un agua de alimentación impura consiste en la filtración seguida de tratamiento químico para precipitar las impurezas disueltas. El

ácido carbónico puede eliminarse en gran cantidad por la adición de cal apagada, en la proporción de 1 Kg de cal por cada 5 000 Kg de agua. La cal se disuelve primero en agua, el residuo insoluble es arrojado y el agua de cal resultante es introducida en cantidades regulares en el tanque de alimentación. La cal apagada o hidrato de calcio no sólo elimina el ácido carbónico, sino que también facilita la deposición de la grasa y neutraliza los constituyentes ácidos. La presencia de grasa en las calderas se debe generalmente al calentamiento del agua de alimentación con vapor de escape, y el remedio más efectivo consiste en substituir el engrase con aceite de los cilindros por la lubricación con grafito, y utilizar aceites minerales puros para el engrase de los vástagos de émbolos y válvulas.

Un circuito cerrado (con condensación) en el que el agua de alimentación no entre en contacto con el aire y en el que las entradas de agua nueva (reposición de la alimentación) son desaireadas o desactivadas, es la mejor protección contra la corrosión.

La corrosión puede ser causada o acelerada por acción galvánica, y ésta puede ser contrarrestada suspendiendo chapas de zinc en las cámaras de vapor y de agua. Unos 125 cm² de zinc por cada metro cuadrado de superficie de calefacción es lo que debe usarse. Cada chapa debe tener contacto metálico con su suspensión y con la plancha a la cual va unida. Las chapas se dispondrán espaciadas y si la corrosión continuara en algún punto, se correrá hacia este una de las chapas o se dispondrá otra más.

La corrosión exterior se evita por lo general remediando

cualquier fuga en cuanto se presente y manteniendo la superficie seca y limpia. Especial atención merecen los asientos y las cubiertas de los conductos de humos y todas partes metálicas en contacto con obra de ladrillo.

Las cenizas y escorias se verterán a un recipiente o carretilla y nunca directamente sobre las planchas del suelo. Tanto las superficies internas como las externas afectadas por la corrosión deberán limpiarse cuidadosamente y protegerse con algunas manos de pintura preservadora. (11)

6.8.1. Temperatura:

1. En las distribuciones de agua caliente se debe evitar en lo posible que la temperatura del agua pase de 60°C.

2. Para evitar las corrosiones por flujo de calor se debe eliminar el calentamiento local; aislando correctamente y evitando que se produzcan caídas bruscas y grandes de temperaturas.

6.8.2. Calidad de los materiales:

1. Eliminar los efectos de la deformación en frío y las faltas de homogeneidad estructural.

2. Elegir los materiales adecuados para los accesorios y condensadores.

3. Construcción correcta de los aparatos, evitando los efectos de las rupturas de fatiga o de fatiga-corrosión por medidas constructivas oportunas.

4. Para evitar la cavitación de las bombas rotativas dar una conformación juiciosa a la entrada y los rotores, limitar la

altura de aspiración a 6 m de agua y evitar las caídas de frecuencia de la corriente eléctrica. (12)

6.8.3. Equipos de Combustión

En el empleo de quemadores de petróleo pesado ha sido posible conseguir niveles de contenido de oxígeno en los gases de salida de la caldera de 0.5% a plena carga, hasta 0.7% a 20% de la evaporación, lo cual se refleja en una reducción substancial de depósitos a altas temperaturas y corrosión a bajas temperaturas si se mantienen estos valores de bajo exceso de oxígeno. La operación a bajo exceso de aire también permite reducir el costo de la caldera y sus accesorios, por tener hornos más pequeños y espaciamientos menores entre los tubos de las diversas superficies de calefacción. Hay asimismo una economía en los ventiladores y la consecuente reducción de las pérdidas térmicas por la reducción en peso de gases.

Todo lo anterior se logra empleando registros de flujo paralelo, es decir sin venas desviadoras y con el flujo de aire predominantemente axial y una manga para ajustar el área de flujo y cerrar.

La operación con este tipo de registros muestra que el exceso de aire puede ser mantenido bajo un 3% en un rango apreciable de cargas.

6.8.3.1. Diseño de los Hogares

Un hogar debe ser capaz de quemar cualquiera de los combustibles especificados, sin pérdidas sensibles por combustión

incompleta y sin necesidad de mantenimiento a las paredes, excepto después de largos períodos de operación. La ceniza del combustible deberán descargarse por la parte inferior. Antes de entrar a la zona de convección, los gases generados durante la combustión, deberán ser enfriados a un nivel de temperatura, al cual la escoria y los problemas de corrosión por alta temperatura no afecten seriamente la disponibilidad del equipo.

El diseño de las paredes, deberá permitir la libre expansión, pero al mismo tiempo mantener la forma correcta del hogar sin distorsiones y ser lo suficientemente rígidas para absorber disturbios de combustión menores sin daños. (13)

6.9. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO CONTRA LA CORROSION EN HORNOS

El horno debe diseñarse teniendo como base los quemadores. Si el horno se alimenta por el extremo de los cabezales de manera que las flamas se desplacen paralelas a los tubos, la sección transversal del horno debe ser suficientemente grande para proveer un espacio adecuado entre los quemadores y los tubos. Cuando esto no esto no es posible, las flamas al golpear sobre los tubos pueden causar fallas aun cuando se empleen temperaturas y presiones moderadas en los tubos.

Cuando los quemadores se colocan en el piso, en paredes laterales, o en la bóveda de un horno tipo caja, deben usarse un número considerable de pequeños quemadores y el espacio entre éstos y los tubos no debe ser muy grande. Puesto que el espacio para la localización de los quemadores aumenta con la longitud de los tubos, la máxima longitud práctica de los tubos debe usarse

para disminuir el número requerido de regresos en los tubos. La longitud de los tubos se limita por la capacidad de las fábricas productoras de ese material a menos que se usen tubos con costura. El método de limpieza de los tubos, ya sea con trompo de turbina o mediante vapor y aire, puede ser un factor en la determinación de la longitud del tubo. Ordinariamente el diseño de la sección de convección requiere una velocidad razonable del gas de combustión para tener buen coeficiente de convección determinando la longitud del tubo en donde el espaciado de los quemadores no es controlante. La distribución del flujo del gas de combustión en la sección de convección, se hace más difícil cuando se usan tubos largos, y en hornos con tubos de 50 a 60 pies deben proveerse cuando menos con dos salidas para los gases en la sección de convección. El cuidado y operación de los quemadores y su equipo correlacionado tiene un efecto pronunciado en el costo de operación y mantenimiento del horno. Los quemadores de petróleo funcionarán adecuadamente cuando atomizan con 0.3 lb de vapor por libra de combustible.

Muchos quemadores requieren cierta cantidad de aire secundario que se admite a través de los registros del quemador. Deberá hacerse notar que, en general, los registros del quemador deberán usarse para controlar la relación aire-combustible (por ciento de exceso de aire), mientras que la compuerta de la chimenea deberá usarse para controlar el tiro en la parte superior del horno. En este punto debe mantenerse un tiro reducido (0.01 a 0.05 plg de agua) para que el horno se mantenga a presión negativa y las fugas, ya sean del techo o de las paredes, sean de afuera hacia

adentro. Las fugas de gases de combustión dañan el acero estructural, corroen y deforman los visores y las puertas de explosión dañando severamente todo el horno. El horno deberá contar con un manómetro de tiro conectado en el techo del horno para guiar al operador, pero en ausencia de un instrumento de tal naturaleza el aspecto de las juntas en el techo puede ser una guía. Unas líneas negras en las juntas entre los ladrillos indican una infiltración de aire; las líneas brillantes indican flujo de gases al exterior.

El uso de aire en exceso superior al necesario a menudo hace imposible mantener un tiro apropiado en el domo del horno. Además a mayor exceso de aire se requerirá mayor combustible para una carga térmica dada, de manera que los análisis de los gases de combustión deben formar parte de la rutina de operación para asegurar un rendimiento económico del horno. Exceso de oxígeno en los gases de combustión aumenta la velocidad de oxidación de los tubos y los soportes. En algunos tipos de horno (dependiendo de la razón de radiante a sección de convección) altos excesos de aire dan por resultado temperaturas más altas de los gases de combustión que entran a la sección de convección y pueden originar fallas prematuras en los espejos de los tubos en la sección de convección.

A mayor flujo radiante menor costo inicial del horno para una capacidad dada. A flujos térmicos promedios arriba de 15,000 Btu/(h)(pie²), sin embargo, los ahorros disminuyeron rápidamente, y los problemas de control y mantenimiento del horno aumentan desproporcionadamente. Sin embargo, entre más grande sea

el horno y mayor la razón de refractario a la superficie fría, menor será la temperatura de los gases de combustión en la sección radiante para un flujo radiante determinado. El flujo radiante promedio permisible en un horno depende de las características de la carga, grado de cracking, coeficiente de transferencia térmica dentro del tubo, razón de $A/\alpha A_{cp}$ (que es la razón de la velocidad de transferencia en la superficie del tubo a la velocidad de transferencia circunferencial), y la distribución de flujos térmicos a lo largo de los tubos y para tubos en varias posiciones. Todos estos detalles requieren consideración, y en la Tabla 6.8 se indican algunos valores representativos de las velocidades promedio permisibles.

TABLA 6.8. VELOCIDADES RADIANTES PROMEDIO PERMISIBLES

TIPO DE HORNO	VELOCIDAD PERMISIBLE, Btu/(h)(pies ² de superficie circunferencial del tubo)
De crudos	10 000 - 16 000
Vacío	500 - 10 000
Reformador de nafta	1 000 - 18 000
Cracking de gasoil:	
Calentamiento	10 000 - 15 000
Empape	10 000
Fraccionamiento de viscosidad	10 000 - 12 000

Debe entenderse que las velocidades promedio permisibles es sólo un índice y que, en la actualidad, la máxima velocidad de punto en un tubo o tubos es el factor básico que deberá prescribirse para condiciones determinadas. De acuerdo con esto, el promedio de velocidad de transferencia de calor puede

incrementarse cuando los tubos están espaciados a mayor distancia que la normal, cuando los tubos se calientan por ambos lados o cuando se toma cualquier otra medida específica para mejorar la distribución del flujo. Los tubos generalmente se espacian de uno a uno y medio diámetros de la superficie de la pared a la línea central de los tubos. Desde un punto de vista práctico es preferible un solo diámetro, ya que esto aminora el peso de los apoyos intermedios de los tubos.

Antiguamente, no se usaban precalentadores de aire tan frecuentemente en los hornos de refinería como en los hornos generadores. El empleo de aire precalentado es especialmente deseable cuando la temperatura de entrada del aceite que debe quemarse es demasiado elevada. Cuando se emplea aire precalentado y cuando se tiene que mantener la velocidad radiante, se desarrolla una mayor proporción de trabajo del horno que cuando no se calienta previamente el aire. (14)

6.10. TORRES DE ENFRIAMIENTO

De acuerdo a las partes que la conforma:

Estructura.- Se construye en hormigón, metálica o madera. La de hormigón es la más duradera, pero también la de costo inicial más elevado.

La estructura metálica puede presentar ventajas al facilitar el montaje, pero siempre será de menor duración. El acero debe ser galvanizado por inmersión en caliente dada la alta corrosividad existente. El acero inoxidable, el aluminio, etc., son

prácticamente prohibitivos por su costo. La madera da buenos resultados donde es barata y de calidad apropiada.

Relleno. - Existen dos tipos básicos de rellenos: de salpicadura y laminares. Los primeros están formados por parrillas constituidas por listones de diversos materiales: poliestireno, polietileno u otros tipos de plásticos, aunque a veces para casos especiales se utiliza aluminio, materiales cerámicos, etc.

En los rellenos de tipo laminar el agua se extiende en infinidad de láminas de gran superficie, sin necesidad de transportarla en gotas, y tienen un mayor rendimiento por metro cuadrado de superficie ocupada, pero son más caras. Los materiales utilizados para fabricar este tipo de relleno son amianto, plásticos, acero galvanizado, aluminio, etc., generalmente en forma de chapas onduladas.

También hay rellenos de pino rojo o abeto, de triplay marino y de asbesto cemento.

Eliminadores de gotas. - Suelen ser de plásticos o amianto.

Ventiladores. - Las aspas de los ventiladores suelen ser preferentemente de aluminio, acero galvanizado o plástico reforzado, y casi siempre orientables, para poder ajustar el caudal de aire de acuerdo a las condiciones climatológicas existentes, favoreciendo el control de temperatura de agua fría. Los anillos del ventilador son de poliestireno, polietileno o acero.

Piscina. - Para torres industriales se hace en hormigón y en ellas se instalan las cimentaciones de la estructura de la torre.

Cerramiento. - Pueden ser de ladrillos, hormigón, fibrocemento, chapa ondulada, poliéster, etc. Hoy en día es muy usual el fibrocemento, ya que no se corroe, es de montaje económico y fácilmente cambiabile. (15)

6.11. RECIPIENTES A PRESION Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO

6.11.1. Precauciones en el Diseño de Tanques a Presión

La función confiable de un recipiente a presión depende de la prevención del usuario y la información que el usuario de al diseñador y al fabricante. Si el proceso involucrado es corrosivo, por ejemplo, la rapidez esperada de la corrosión basada en una historia de un recipiente en un servicio similar. Los datos de resistencia a la corrosión se encuentran disponibles para la mayoría de los materiales y los químicos, pero las condiciones de operación rara vez se duplican en el laboratorio y deben determinarse con frecuencia, una examinación cercana después de que el recipiente se pone en servicio.

El usuario debe estar familiarizado con las condiciones de operación y las causas de los defectos y deterioro en el tipo de recipiente que está siendo ordenado.

Aunque el Código permite muchos tipos de construcción, algunos de ellos quizá no sean adecuados para el tipo de servicio en el que se requiere. Además, lo que prescribe el Código ASME sobre un recipiente no siempre es suficiente. Por ejemplo, el código

permite pequeñas aberturas para ser soldadas sólo de un lado y también provee una construcción equivalente de juntas periféricas y cabezas. Sin embargo, este tipo de construcción no es adecuada para algunos recipientes, porque deja algunas juntas internas y accesorios no soldados y sujetos a corrosión. El comprador conciente de tales hechos especificará el tipo de soldadura de las juntas. Los dibujos también se checarán antes de la fabricación para estar seguros de que las aberturas están donde se deseaba y que la inspección de las aberturas permite un acceso fácil al interior.

El inspector del Código también debe checar el diseño del recipiente para asegurarse de que el espesor de la coraza, del cabezal y de la tobera sean correctas, el radio de la junta suficiente, la abertura reforzada adecuadamente al igual que un espesor suficiente.

La parte UG-22 del Código establece que las cargas deben considerarse cuando se diseña un recipiente, pero no da una información clara de como tomarlos en cuenta. Cuando los recipientes y los sistemas de tubería operan fuera de lugares cerrados, debe considerarse el aire. También deben tomarse en cuenta las cargas externas tales como la nieve; la temperatura mínima ambiental; la reacción de los sistemas de tubería; la expansión térmica restringida en su apego al recipiente y sobre sus soportes o anclas; el peso de las válvulas, bombas, sopladores, y maquinaria rotatoria. Es muy importante que el diseñador vea que toda la maquinaria, tubería y el equipo está balanceado y soportado apropiadamente. Los apéndices D y G del

Código también dan más información útil para tomarse en consideración.

La corrosión interna siempre se desarrolla en las superficies susceptibles a la humedad. Por está razón, es muy importante estar seguros de que los recipientes pueden drenarse apropiadamente.

En los recipientes verticales equipados con mecanismos de agitación, el desgaste más grande siempre ocurre en el fondo del cabezal. En los recipientes verticales con agitadores, el desgaste mayor será entre la sexta y novena posición de acuerdo a las manecillas del reloj y entre la posición seis y tres de las manecillas del reloj. Los recipientes horizontales con agitador deberán diseñarse, si es posible, de tal forma que el área pueda rotarse a la mitad superior. La vida útil del recipiente se extenderá.

Los recipientes sujetos a fuerte corrosión, erosión o abrasión mecánica requieren una consideración de corrosión extra y hoyos. El goteo por estos hoyos dará aviso de que el recipiente se ha corroido a su mínimo espesor permisible. Por ejemplo, si el espesor mínimo requerido es $3/8$ plg pero el espesor de la placa empleada (a incrementar el servicio) es de $7/8$ plg, la corrosión permitida entonces será de $1/2$ plg. Los hoyos situados en centros de 18 plg entonces podrían taladrarse a una profundidad de $3/8$ plg de la superficie no afectada por la corrosión.

La parte UG-25(d) del Código establece: "Cuando los hoyos son perforados, serán al menos de $3/16$ plg de diámetro y deberán ser perforados a una profundidad no menor al 80 por ciento del espesor requerido para una coraza sin costura de dichas dimensiones. Estos

hoyos deberán perforarse en una superficie opuesta a aquella en la cual se espera su deterioro". (16)

6.11.2. Diseño de Tanques de Almacenamiento

El intervalo de productos almacenados y el tamaño al cual pueden construirse depende de varios factores, pero los principales son los siguientes:

1. Materiales de construcción.
2. Soldaduras.
3. Consideraciones de diseño.
4. Lugar de construcción.

6.11.2.1. Materiales de construcción

Los tanques de almacenamiento se hacen de casi todos los materiales estructurales. Los que más se usan son el acero y el concreto reforzado. Se usan materiales plásticos y plásticos con refuerzo de vidrio para tanques de hasta 60 000 galones. También se pueden aplicar recubrimientos de plástico y vidrio a tanques de acero. Su usa aluminio y otros metales no ferrosos cuando se requieren propiedades especiales. Cuando sea nesario el uso de metales costosos tales como el tantalio, se pueden aplicar como recubrimientos del tanque o como revestimientos metálicos.

Como medios para prevenir la corrosión se puede emplear la protección catódica, el aislamiento eléctrico.

6.11.2.2. Soldadura

Hay un número fundamental de consideraciones relacionadas con

la soldadura de los tanques de almacenamiento que se exponen a continuación.

Características de las juntas

Aunque el material en placas sea bueno no puede considerarse en la fabricación de tanques de almacenamiento sino se suelda para dar una junta de resistencia y ductibilidad similar a la placa. Donde el material de la placa tiene una baja temperatura de resistencia al impacto, las características de la junta no deben ser inferiores.

Los aceros inoxidable, ya sea de resistencia normal o alta, deben soldarse en el campo, pero para aquellos aceros inoxidable con una resistencia mucho mayor del laminado en frío, se tiene la tendencia a obtener una resistencia reducida en la junta debido al efecto del recocido en la zona afectada por el calor durante la soldadura.

Características de resistencia y corrosión

Además de que se desea que la resistencia de la junta sea igual o mayor que el material de la placa, se requiere que la junta sea satisfactoria para las condiciones de servicio en otros aspectos tales como resistencia a la corrosión; resistencia al impacto, eliminación de defectos, etc. Entonces aceptando el hecho de que la soldadura del metal y el material de la placa tienen esencialmente diferentes estructuras, juntos deben producir una junta que sea satisfactoria totalmente.

Sin embargo, en la práctica la resistencia al impacto de la

soldadura es siempre menor que la del material de la placa y si el diseño requiere una placa evaluada al impacto no es difícil escapar a la conclusión de que se requiere una resistencia a la corrosión del metal soldado igual a la mínima resistencia considerada para la placa.

Efectos de la temperatura

En muchas ocasiones para tanques de almacenamiento ambientales y subambientales, el tanque se evalúa a una temperatura superior que la temperatura de servicio. Con un material como el acero que es sensible a la temperatura, es importante conocer los efectos de la temperatura en el comportamiento de una junta soldada estandarizada para asegurar que el paso de la prueba de agua a temperatura ambiente a las condiciones de servicio de temperatura baja puede hacerse sin correr ningún peligro.

Cuando se suelda se producen esfuerzos y tensiones en la zona de soldado y a ello hay que añadir cualquier esfuerzo adicional impuesto por las condiciones de servicio. Se ha investigado y trabajado sobre este problema, pero dos factores sobresalen de las normas comerciales de recipientes.

1. El alivio del esfuerzo térmico de un recipiente de acero es casi una garantía completa de la inmunidad a la fractura por fragilización.

2. Una vez que el recipiente ha sido evaluado hidráulicamente aún aunque no se alivie el esfuerzo térmicamente, es improbable que falle en un servicio donde el patrón del esfuerzo de servicio es similar al patrón del esfuerzo de prueba pero a una temperatura

más baja.

Relacionando esto a la práctica de los tanques de almacenamiento, uno no puede aliviar fácilmente el esfuerzo térmicamente en el tanque, pero una evaluación con agua es una práctica estándar que siempre debe llevarse a cabo. La prueba con agua representa el periodo probablemente más peligroso y para evitar una falla en ese momento los materiales de construcción deben ser adecuados para la prueba a la temperatura del agua. Después es improbable que el tanque sea esforzado al mismo punto otra vez, a menos que el producto tenga una gravedad específica mayor que la unidad, o que las condiciones externas tales como empujones en exceso de las conexiones de la tubería, establecimientos locales de los cimientos o excesivos gradientes térmicos, etc; alteren el patrón de esfuerzo. Sin embargo, es posible aliviar el esfuerzo individual de los platos en el taller y esto se hace frecuentemente donde hay alta concentración de esfuerzo, como en las toberas de la coraza y en los pesados accesorios de la coraza. Estas consideraciones no se aplican a las aleaciones de Al-Mg o a los aceros inoxidables de 18/8 donde la junta soldada no es tan sensible a la temperatura. Por supuesto, es imprudente evaluar cualquier tanque con agua y después llenarlo con un líquido de gravedad específica mayor que la unidad sin considerar cuidadosamente las implicaciones.

Fatiga

Como la fatiga no se considera un problema en el diseño de tanques de almacenamiento no es necesario moldear el perfil

resplandeciente de la soldadura con la placa. La presencia de una soldadura reforzada tenderá a incrementar la resistencia estática de la junta, pero deberá evitarse un corte afilado en el refuerzo que une la placa.

6.11.2.3. Consideraciones en el Diseño

El desarrollo del diseño de un tanque de almacenamiento se debe mucho al desarrollo general y al crecimiento de la industria petrolera. Es importante que sólo los códigos de diseño para tanques de almacenamiento de uso general son para almacenar petróleo y líquidos similares que pueden almacenarse a temperatura y presión atmosférica. Sin embargo, hay, algunas diferencias esenciales entre los tanques y los recipientes a presión y algunas de ellas se enlistan a continuación.

1. Los tanques siempre se sitúan en construcción.
2. Los tanques de acero raramente se alivian del esfuerzo térmicamente, aparte de los accesorios de la coraza.
3. La coraza del tanque sólo se esfuerza y el esfuerzo es unidireccional.
4. Los tanques para un servicio de petróleo normalmente se construyen de aceros estructurales más que de la calidad cocida.
5. En muy pocas ocasiones los tanques se someten a cargas por fatiga.
6. El riesgo posible en el acontecimiento de una falla es particularmente alto cuando se almacena un material inflamable o corrosivo. Los grandes tanques de almacenamiento de aceite crudo manejan 100,000 toneladas o más.

7. Normalmente los tanques se evalúan con agua para probar su seguridad estructural, sin tomar en cuenta el producto definitivo o la temperatura de servicio. En los códigos de diseño de los recipientes a presión se requiere del 30 al 50 por ciento de sobrepresión sin tener en cuenta la forma en que se lleve a cabo.

(17)

6.12. BIBLIOGRAFIA

- (1) Perry, John H., and Chilton, Cecil H., "Manual del Ingeniero Químico", Segunda Edición en Español., McGraw-Hill Co., México (1982).
- (2) Warring, R.H., Handbook of Valves, Piping and Pipelines, Gulf Publishing Company, Texas (1982).
- (3) Karassik, Krutzsch, Fraser, Messina, Pump Handbook, Ed. McGraw-Hill, USA (1976).
- (4) McKetta, John J., Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Vol. 5, Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y. pp.23-39. (1979).
- (5) McKetta John J., op. cit. Vol.20. pp.387-405.
- (6) Perry, John H., and Chilton, Cecil H., op. cit.
- (7) Lord, R.C., Minton, P.C. and Slusser, R.P., Guide to Trouble-Free Heat Exchangers, Chem. Eng., Vol.77. No.12. June 1, p.153. (1970).
- (8) Perry, John H., and Chilton, Cecil H., op. cit.
- (9) Cowan, Colin T., Choosing Materials of Construction For Plate Heat Exchangers-I, Chem. Eng., Vol.82. No.12. June 9, p.100.

- (1975).
- (10) Mehra Davinder K., Selecting Evaporators, Chem. Eng., Vol.93. No.3. February 3, p. 56. (1986).
 - (10) Kern, D.Q., Procesos de Transferencia de Calor, Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V., México, D.F. (1986).
 - (11) Pull, E., Calderas de Vapor. Selección, Funcionamiento y Conservación de las Calderas de Vapor y de su Equipo Auxiliar, Traducido de la 3^a Edición inglesa, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona (1977).
 - (12) Tódt, Fritz, Corrosión y Protección, Ed. Aguilar, Madrid (1959).
 - (13) Primer Seminario de Ingeniería Petrolera, Organizado por el IMP, 1971-1972.
 - (14) Kern, D.Q., op. cit.
 - (15) Baquero Franco, J. y Llorente Martínez, V., Equipos para la Industria Química y Alimentaria, Editorial Alhambra, España (1985).
 - (16) Chuse, Robert, Pressure Vessels. The ASME Code Simplified, Fifth Edition, McGraw-Hill Company, USA (1977).
 - (17) Fluid Control, Edited by William F. Waller, A.M.I.T.P.P., ASS.I. Ref. Eng., Morgan-Grampian (Publishers) Ltd., England (1970).

CONCLUSIONES

1. La corrosión es un problema que puede controlarse con métodos adecuados, como son una apropiada selección de materiales, una especificación, diseño, fabricación e instalación lo más adecuadas posibles, y mantenimiento periódico del equipo. Todos estos factores están relacionados y a cada uno de ellos debe dársele la atención necesaria, tanto en el caso de artículos nuevos como de repuestos, para obtener una economía y un rendimiento máximos.

2. La selección de materiales es muy importante, y debe estar preferentemente basada en la experiencia. Cuando no se tiene experiencia específica, pero se cuenta con la pericia suficiente, la selección se puede hacer con base en el conocimiento de las características de resistencia química y las limitaciones de los materiales de construcción. Sin embargo, por lo general se recomienda efectuar pruebas de corrosión o de resistencia química para determinar si el material propuesto es adecuado para el servicio. Es de suma importancia que las condiciones de prueba empleadas sean iguales o similares a las que van aplicarse en el servicio o instalación que se está considerando. Se debe considerar la posibilidad de corrosión por agrietamiento, la corrosión por esfuerzos, la corrosión intergranular, la corrosión por picaduras y otras formas existentes de corrosión o deterioro, así como las pruebas diseñadas y realizadas para determinar la adecuación de los materiales cuando se sabe o se sospecha que éstos son susceptibles a un tipo particular de corrosión bajo las



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

condiciones ambientales de que se trate.

3. Las especificaciones deben ser lo suficientemente completas para tener la seguridad de que se usará la composición o tipo de material y de que se proporcionarán las condiciones correctas de tratamiento térmico y acabado superficial. Los materiales deben ser inspeccionados por el usuario o su representante técnico.

4. Las consideraciones de diseño deben incluir la necesidad de un drenado libre y completo, facilidad de limpieza e inspección, y la posibilidad de corrosión galvánica cuando se usen metales diferentes en contacto mutuo. Desde el punto de vista de reducir al mínimo las posibilidades y el grado de dificultades originadas por la corrosión, se deben observar las siguientes reglas generales.

Siempre que sea posible se deben usar uniones a tope. Si se utilizan uniones empalmadas empleando soldaduras achaflanadas, el cordón de soldadura debe ser continuo en el lado del proceso.

La instalación de deflectores, ángulos de refuerzo, boquillas de purga, y la localización de válvulas y bombas debe ser tal que se pueda lograr un drenado libre y un lavado eficiente sin interrupciones. En donde sea práctico se deben instalar medios de acceso para inspección y mantenimiento.

Por lo general se debe evitar el empleo de metales diferentes en contacto mutuo, particularmente si se encuentran bastante separados en su posición nominal en la serie electroquímica. Si se van a usar juntos, se debe procura obtener el área más grande del

material anódico, o aislar ambos metales uno del otro.

En donde sea posible, se deben reducir al mínimo las áreas de turbulencia localizadas y las altas velocidades en las conexiones de alimentación y de drenado, y en los accesorios de las líneas.

El equipo debe soportarse de tal manera que no descansa en estancamientos de materiales líquidos o materiales que mantengan humedad. Ya que el soporte debe permitir que los esfuerzos o cargas que actúan sobre el equipo tengan como punto final de aplicación el suelo.

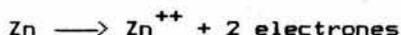
5. La decisión de utilizar cierto método preventivo o de eliminación, depende definitivamente del estudio particular que se haga de cada problema que se presente en un determinado equipo de proceso, pues es del análisis global del sistema de donde resulta la decisión respecto al método preventivo o de eliminación más adecuado, dónde colocarlo y la forma de evaluar los componentes necesarios para su aplicación; es decir, el análisis del sistema es fundamental para poder entender que fenómeno nocivo está desarrollándose en el equipo. Al entender el fenómeno, se puede tomar una buena decisión para eliminarlo, con mayor razón si se pone en peligro el funcionamiento o la existencia misma del equipo.

GLOSARIO DE TERMINOS DE CORROSION

ACCION LOCAL: Corrosión debida a la acción de "celdas locales", es decir; celdas galvánicas que resultan de la heterogeneidad entre áreas adyacentes en la superficie de un metal expuesto a un electrolito.

ADITIVO: Sustancia añadida en pequeña proporción, siempre a un fluido, para un propósito especial, como reducir la fricción, corrosión, etc.

ANODO: (Opuesto al cátodo) El electrodo en el cual ocurre la oxidación y la corrosión. Una reacción común en el ánodo es:



ANOLITO: El electrolito de una celda electrolítica adyacente al ánodo.

ANTIIOBSTRUYENTE: Se refiere a la prevención del ataque o crecimiento de los organismos marinos en la superficie del metal sumergido, generalmente a través de la toxicidad química causada por la composición del metal o de la capa del recubrimiento.

ATAQUE POR DEPOSITO (CORROSION POR DEPOSICION): Corrosión por picadura que resulta de los depósitos en una superficie metálica.

ATAQUE INTRUSIVO: Es la erosión corrosión que resulta del flujo turbulento o intrusivo de los líquidos.

AUSTENITICO: El nombre dado a la cara central de la estructura cúbica cristalina de los metales ferrosos. El hierro y el acero ordinarios tienen esta estructura a temperaturas elevadas; también ciertos aceros inoxidables (Series 300) tienen esta estructura a la temperatura ambiente.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CARBURIZACION: La absorción del carbón en la superficie metálica; esto puede o no puede desearse.

CATODO: Un electrodo o una porción de un electrodo en el cual ocurre una reacción de reducción.

CATOLITO: La porción del electrolito de una celda electrolítica adyacente al cátodo.

CAVITACION: Formación y colapso repentino de burbujas de vapor en líquidos, que es resultado de presiones bajas en las orillas de un impulsor; esto produce momentáneamente presiones locales altas que puede destruir mecánicamente porciones de la superficie en la cual las burbujas se colapsan.

CAVITACION EROSION: Ver daño por cavitación, es el término preferido.

CELDA: Circuito que consiste de un ánodo y un cátodo que están en contacto eléctrico en un electrolito sólido o líquido. La corrosión generalmente ocurre en las áreas anódicas.

CELDA DE AEREACION: Celda de concentración de oxígeno; una celda que resulta de la diferencia de oxígeno disuelto en dos puntos.

CELDA DE CONCENTRACION: Una celda electrolítica, la fem a la que se debe las diferencias en composición del electrolito en las áreas del ánodo y cátodo.

CELDA DE CONCENTRACION DE OXIGENO: Celda galvánica causada por una diferencia en la concentración de oxígeno en dos puntos en la superficie metálica.

CELDA GALVANICA: Es una celda en la cual el cambio químico es la fuente de energía eléctrica. [Consiste de dos conductores distintos en contacto uno con el otro y con un electrolito, o dos

conductores similares en contacto uno con el otro y con electrolitos distintos].

CELDA LOCAL: Una celda galvánica que resulta de la heterogeneidad entre las áreas adyacentes en la superficie de un metal expuesto a un electrolito. La heterogeneidad puede deberse a la naturaleza física o química ya sea con el metal o en su ambiente.

CORROSION: El deterioro de una sustancia [usualmente un metal] por la reacción con su ambiente.

CORROSION BAJO PELICULA: Es la corrosión que ocurre bajo la película en la forma de rayas distribuidas al azar.

CORROSION BIMETALICA: Corrosión que resulta del contacto entre metales distintos; corrosión galvánica.

CORROSION CATODICA: Un incremento en la corrosión de un metal haciéndolo catódico.

CORROSION CAVITACION: Daño por corrosión que resulta de la cavitación y la corrosión; metal corroido, se desarrolla presión de la cavidad colapsada y remueve el producto de corrosión, exponiendo una barra metálica a la corrosión.

CORROSION POR DISPERSION DE CORRIENTE: Corrosión causada por la corriente a través de caminos distintos al circuito proyectado o por cualquier corriente externa en la tierra.

CORROSION-EROSION: Corrosión que se incrementa por la acción abrasiva de una corriente en movimiento; la presencia de partículas suspendidas aceleradas en gran parte por la acción abrasiva.

CORROSION GALVANICA: Corrosión que se incrementa por la corriente causada por una celda galvánica (algunas veces llamada par de

acción).

CORROSION GENERAL: Corrosión de una manera uniforme.

CORROSION GRAFITICA: Corrosión del hierro gris fundido en el cual los constituyentes metálicos se convierten en productos de corrosión dejando intacto al grafito.

CORROSION POR HENDIDURA: Corrosión localizada como resultado de la formación de una hendidura entre un metal y un no metal, o entre dos superficies metálicas.

CORROSION INTERGRANULAR: Es la corrosión que ocurre preferencialmente en los límites del grano.

CORROSION POR PICADURA: Corrosión localizada que toma la forma de cavidades en la superficie.

CORROSION SELECTIVA: La corrosión selectiva de ciertos componentes aleantes de una aleación (como dezincificación), o en una aleación (como oxidación interna).

DAÑO POR CAVITACION: Deterioro causado por la formación y el colapso de cavidades en un líquido.

DEBILITAMIENTO DE LA SOLDADURA: Corrosión localizada o adyacente a la soldadura.

DEPOLARIZACION: Reducción o eliminación de la polarización por medios físicos o por cambios en el ambiente.

DESGASTE: Deterioro que resulta del roce repetitivo en la interfase entre dos superficies. Cuando el deterioro se incrementa por la corrosión se emplea el término corrosión por desgaste.

DEZINCIFICACION: Desprendimiento del zinc de una aleación.

ELECTROLISIS: Cambio químico en un electrolito que resulta de una

corriente impresa.

ELECTRODO: Metal en contacto con un electrolito que sirve como sitio donde una corriente eléctrica entra al metal o deja al metal para entrar a la solución.

ELECTRODO AUXILIAR: Electrodo empleado comúnmente en estudios de polarización para pasar corriente hacia o desde un electrodo de prueba. Siempre se hace de un metal no corroído.

ELECTROLITO: Un ión conductor.

EQUIVALENTE ELECTROQUIMICO: El peso de un elemento oxidado o reducido por una cantidad específica (unidad) de electricidad, siempre un Coulomb (un amperé que fluye por un segundo).

EROSION: Deterioro por la acción abrasiva de los fluidos, usualmente acelerada por la presencia de partículas sólidas de materia en suspensión. Cuando el deterioro se incrementa por la corrosión, se emplea con frecuencia el término erosión corrosión.

ESTACION DE AGRIETAMIENTO: Agrietamiento que resulta del efecto combinado de la corrosión y la tensión interna. Un término que se aplica a la fractura por corrosión bajo tensión del latón.

EXFOLIACION: Es una capa delgada que crece como producto de la corrosión.

FORMACION DE TUBERCULOS: La formación de productos de corrosión localizada y que se encuentran esparcidos sobre la superficie en forma de bultos.

FRAGILIZACION: Pérdida severa de la ductilidad de un metal o una aleación.

FRAGILIZACION POR CAUSTICOS: Fractura por corrosión bajo tensión en soluciones alcalinas.

GRAFITACION: (1) Descomposición de un carburo de metal a un metal y grafito, (2) Ver CORROSION GRAFITICA.

HERRUMBRE: Producto de corrosión constituido principalmente por óxido de hierro hidratado.

INCRUSTACION: (1) La formación a temperaturas altas de una capa o capas delgadas de producto corrosivo en una superficie metálica. (2) La depasivación de constituyentes insolubles del agua en una superficie metálica (como en el interior de las calderas de vapor).

INHIBIDOR: Es una sustancia que retarda la corrosión cuando se añade a un ambiente en concentraciones pequeñas.

INHIBIDOR CATODICO: Sustancia química o combinación de sustancias que previenen o reducen la rapidez de la reacción catódica o de reducción por la acción física, fisico-química o química.

INMUNIDAD: Estado de resistencia a la corrosión o disolución anódica causada por el hecho de que el potencial del electrodo de la superficie en cuestión está por debajo del potencial de equilibrio de la disolución anódica.

MEDIA CELDA: Metal puro en contacto con una solución de concentración conocida de su propio ion, a una temperatura específica desarrolla un potencial que es característico y reproducible; cuando se acopla con otra media celda, se desarrolla un potencial total, el cual es la suma de ambas medias celdas.

METAL ACTIVO: Metal listo para corroerse o que está siendo corroído.

METAL NOBLE: Metal que no es muy reactivo, como plata, oro, o cobre, y puede encontrarse en forma metálica en la tierra.

OBSTRUCCION: Es la acumulación y el crecimiento de organismos marinos en una superficie metálica sumergida.

OXIDACION INTERNA: Formación de partículas de producto de corrosión por debajo una superficie metálica a una temperatura elevada. Esto resulta de una reacción preferida de ciertos componentes aleantes por la difusión de oxígeno, azufre, nitrógeno, etc; también conocida como corrosión selectiva.

PASIVACION: El proceso o procesos (físico o químico) por medio del cual un metal se vuelve pasivo.

PASIVADOR: Un inhibidor que cambia el potencial de un metal apreciablemente a un valor más catódico o noble.

POLARIZACION: El desplazamiento del potencial del electrodo que resulta de los efectos del flujo de corriente, medido con respecto a cualquier equilibrio (reversible) o potenciales estacionarios.

POLARIZACION CATODICA: Polarización del cátodo; una reducción del potencial inicial que resulta de los efectos de la corriente en o cerca de la superficie del cátodo. El potencial se vuelve más activo (negativo) por la polarización catódica.

POTENCIAL ACTIVO: El potencial de un metal corroido.

POTENCIAL DE CORROSION: El potencial que un metal corroido muestra bajo condiciones específicas de concentración, tiempo, temperatura, aereación, velocidad, etc.

POTENCIAL ELECTRONEGATIVO: Potencial que representa la terminal activa o anódica de la serie fem; potencial anódico es el término

preferido.

POTENCIAL ELECTROPOSITIVO: Potencial que representa la terminal noble o catódica de la serie fem; potencial catódico es el término preferido.

POTENCIAL ESTANDAR-(POTENCIAL DEL ELECTRODO ESTANDAR): El potencial reversible para un electrodo de proceso cuando todos los productos y reactivos están en actividad en una escala en la cual el potencial para la media celda estándar del hidrógeno es cero.

POTENCIAL NOBLE: Es un potencial substancialmente catódico al potencial estándar del hidrógeno.

PROTECCION CATODICA: Reducción o prevención de la corrosión haciendo a un metal cátodo en un medio conductivo por medio de una corriente eléctrica directa [la cual puede ser impresa o galvánica].

PROTECCION CON METAL DE SACRIFICIO: Reducción o prevención de la corrosión de un metal en un ambiente que actúa como electrolito acoplándolo a otro metal que es electroquímicamente más activo que el electrolito particular.

RAPIDEZ DE CORROSION: La velocidad (siempre un promedio) con la cual la corrosión progresa (puede ser lineal o a intervalos); con frecuencia expresada como resistencia lineal, en unidades de mdd (miligramos por decímetro cuadrado por día) por cambio de peso o mpa (milésimas por año) o m/a (micrómetros por año) para cambios de espesor.

SERIE GALVANICA: Lista de metales arreglados de acuerdo a sus potenciales relativos de corrosión en algún ambiente específico:

con frecuencia se emplea agua de mar.

SOBREVOLTAJE: El desplazamiento del potencial del electrodo de su valor de equilibrio (reversible) por el flujo de corriente.

GLOSARIO DE TERMINOS METALURGICOS

ALEACION: Substancia que tiene propiedades metálicas y está compuesta de dos o más elementos químicos de los cuales al menos uno es metal.

ALIVIO DE LA TENSION: Es un proceso para reducir la tensión residual en un objeto metálico, calentando el objeto a una temperatura adecuada y manteniendolo por un tiempo suficiente. Este tratamiento se puede aplicar para aliviar las tensiones inducidas por el colado, templado, normalizado, maquinado, trabajo en frío, o soldadura.

AUSTENITA: Solución sólida en la cual el hierro gamma es el solvente caracterizado por la estructura decara central cúbica.

CARBON COMBINADO: El carbón que se combina con el hierro o aleaciones para formar el carburo de hierro colado o acero.

CAPACIDAD DE AMORTIGUAMIENTO: Es la habilidad de un metal para absorber vibraciones, cambiando la energía mecánica en calor.

CARBURO: Compuesto de carbón con uno o más elementos metálicos.

CEMENTITA: Compuesto de hierro y carbón conocido como "carburo de hierro", el cual tiene una fórmula química de Fe_3C y es caracterizado por una estructura cristalina ortorómbica.

COMPONENTE: Parte micrograficamente distinguible de una aleación o mezcla.

CORTE DE SENSIBILIDAD: La reducción causada en la resistencia nominal, impacto o estático, por la presencia de una concentración de tensión, expresada como la relación de la tensión cortada entre la no cortada.

DEFORMACION ELASTICA: Cambio temporal en las dimensiones causado por la tensión. Los materiales regresan a su dimensión original después de que se elimina la tensión.

DEFORMACION PLASTICA: Distorsión permanente de un material bajo la acción de tensiones aplicadas.

DESLIZAMIENTO: El flujo o la deformación plástica de los metales manejados por períodos largos con tensiones menores que el límite de resistencia mecánica normal. El efecto es particularmente importante si la temperatura de tensionamiento se encuentra en la vecindad de la temperatura de recristalización del metal.

DUREZA: Propiedad de absorber considerable energía antes de la fractura; se representa en el área bajo la curva tensión-esfuerzo, y por lo tanto involucra la ductilidad y la resistencia.

EFICIENCIA DE LA CORROSION EN EL ANODO: Proporción de la corrosión actual a la corrosión teórica basada en el flujo de corriente total.

ELEVADORES DE TENSION: Los factores como los cambios en la forma, en el contorno o defectos en la superficie; que concentran tensiones en forma localizada.

ELONGACION: Es la cantidad de extensión permanente en la vecindad de la fractura en la prueba de tensión; expresada siempre como un porcentaje de la longitud original como garantía, 25% en 2 plg.

El alargamiento también se puede referir a la cantidad de extensión de cualquier etapa en cualquier proceso que alarga un cuerpo continuamente, como en el laminado.

ENDURECIMIENTO: Cualquier proceso para incrementar la dureza de un metal por medio de un tratamiento adecuado, que incluye siempre el calentamiento y el enfriamiento.

ENVEJECIMIENTO: En un metal o una aleación, un cambio en las propiedades que generalmente ocurre lentamente a temperatura atmosférica y más rápidamente a temperatura más alta.

ESTRUCTURA HETEROGENEA: Estructura metálica con más de una fase.

EXCORIAMIENTO: El daño de una o ambas superficies metálicas para remover las partículas de las áreas localizadas durante la fricción.

FATIGA: Es la tendencia de un metal a romperse bajo condiciones de tensión ciclica repetitiva considerablemente abajo de la resistencia a la tensión máxima.

FERRITA: Solución sólida en la cual el hierro alfa es el solvente y que se caracteriza por tener una estructura cristalina cúbica.

FRAGILIDAD: Tendencia a la fractura sin deformación apreciable.

GRANOS: Cristales individuales en los metales.

HOMOGENEO: Se define como tener las mismas características. Sin embargo, la homogeneidad física puede requerir solo una identidad del tipo de reticulación, mientras la homogeneidad química requiere una distribución uniforme de los elementos en la aleación.

INCLUSIONES: Partículas de impurezas (óxidos, sulfuros, silicatos y otros) que se manejan mecánicamente, o que se forman durante la

solidificación o por reacción subsecuente dentro del metal sólido.

LIMITE DE ENDURECIMIENTO: Es la tensión máxima que un metal resistirá sin fallar durante un gran número de ciclos de tensión. Si el término se emplea sin clasificación, los ciclos de tensión son totales y se produce una inversión completa de la tensión.

LIMITE PROPORCIONAL: La tensión más grande que un material es capaz de soportar sin una desviación de la ley de proporcionalidad de la tensión al esfuerzo. (Ley de Hooke).

LIMITE DE RESISTENCIA MECANICA: La tensión a la cual un material exhibe un límite de desviación específico de la proporcionalidad de la tensión a la deformación. Se emplea una desviación del 0.2% para muchos metales como las aleaciones de base aluminio y base magnesio, mientras que un 0.5% del alargamiento total bajo carga se emplea con frecuencia para aleaciones de cobre.

MALEABILIDAD: La propiedad que determina la facilidad de deformarse un metal cuando se sujeta al laminado o al martilleo. Entre más maleable sea un metal será más fácil laminar o martillar en hojas delgadas.

MANEJABILIDAD: Es la característica o el grupo de características que determinan la facilidad de formar un metal en la forma deseada.

MAQUINADO LIBRE: La propiedad que hace el maquinado fácil por la formación de fragmentos pequeños, una característica impartida al acero por el azufre, al bronce por el plomo, a las aleaciones de aluminio por el plomo y bismuto, a las aleaciones de níquel por azufre y carbón, y así sucesivamente.

MARTENSITA: Es un constituyente inestable en el acero templado, formado sin difusión y solo durante el enfriamiento bajo una cierta temperatura conocida como la temperatura M_s (o "Ar"). La estructura se caracteriza por su apariencia acircular en la superficie del espécimen grabado y pulido. La martensita es el producto de transformación duro de la austenita. Se observa una estructura cristalina tetragonal cuando el contenido de carbón es mayor del 0.5%.

MATRIZ: Es la fase principal en la cual otro componente se fija.

MENA: Un mineral del cual el metal puede extraerse productivamente.

METALOGRAFIA: Ciencia que trata sobre la constitución y la estructura de metales y aleaciones revelado por el microscopio.

MICROESTRUCTURA: La estructura del metal o modelos de aleaciones grabadas y pulidas que son reveladas en el microscopio.

MODULO DE ELASTICIDAD: La pendiente de la porción elástica de la curva tensión deformación en la prueba mecánica. La tensión divide por la alargación unitaria. La tensión o el módulo de elasticidad compresivo se llama "Módulo de Young"; el módulo elástico torsional se conoce como el "módulo de cizalle" o el "módulo de rigidez".

NORMALIZACION: Es un proceso en el cual una aleación ferrosa se calienta a una temperatura adecuada sobre el intervalo de transformación y después se enfría a temperatura ambiente.

PERLITA: Agregado laminar de ferrita y carburo. **NOTA:** Se recomienda que esto podría reservarse para las microestructuras que consisten de placas delgadas o laminadas-esto es, aquellas

que puedan tener un brillo nacarado en luz blanca. La lamina puede ser muy delgada y resoluble, solo con el mejor microscopio equipado y la mejor técnica.

POLARIZACION ANODICA: La polarización del ánodo; es decir., el decremento en el potencial inicial del ánodo que resulta del efecto del flujo de corriente en o cerca de la superficie del ánodo. El potencial se vuelve más noble (más positivo) por la polarización anódica.

POROSIDAD: Defecto causado en los metales fundidos por la presencia de orificios y cavidades poco profundas.

POSCALENTAMIENTO: Proceso empleado inmediatamente después de la soldadura, el calor se aplica a la zona soldada ya sea por templado o abasteciendo una proporción de enfriamiento controlada, para evitar una estructura dura o frágil.

PRECALENTAMIENTO: (1) Término general empleado para describir el calentamiento aplicado como preliminar a algún tratamiento térmico o mecánico. (2) Un término aplicado específicamente al acero para describir un proceso en el cual el acero se calienta lentamente y uniformemente a una temperatura menor que la temperatura de endurecimiento y después se transfiere a un horno en el cual la temperatura está substancialmente por encima de la temperatura de precalentamiento.

PROPIEDADES DIRECCIONALES: Condición anisotrópica donde las propiedades físicas y mecánicas varían, dependiendo de la relación de la prueba del eje a una dirección específica del metal; un resultado de la dirección preferida o de la fibrosidad de las inclusiones durante el trabajo.

PROPIEDADES FISICAS: Son aquellas descritas bajo las propiedades mecánicas; por ejemplo, densidad, conductividad eléctrica, coeficiente de expansión térmica. Este término se ha empleado con frecuencia para describir las propiedades mecánicas, pero su uso no se recomienda. Ver propiedades mecánicas.

PROPIEDADES MECANICAS: Aquellas propiedades de un material que revelan la elasticidad y la reacción inelástica cuando se aplica una fuerza o que involucra una relación entre la tensión y el esfuerzo; por ejemplo, el módulo de elasticidad, la resistencia a la tensión y el límite a la fatiga. Con frecuencia estas propiedades se han asignado como "propiedades físicas", pero se prefiere el término de "propiedades mecánicas".

PRUEBA AL IMPACTO: Prueba que sirve para determinar la energía absorbida en fracturar una barra de prueba a velocidad alta. La prueba puede ser con tensión o doblado, o puede ser una prueba de ranura, si se presenta una ranura, creando tensiones multiaxiales.

PROTECCION ANODICA: Es una apreciable reducción en la corrosión haciendo a un metal un ánodo y manteniendolo en una condición de polarización alta con un flujo de corriente pequeño.

PRUEBA FISICA: Los métodos de prueba por los cuales las propiedades físicas son determinadas.

RECOCIDO ESTABILIZADOR: Tratamiento aplicado a los aceros inoxidables austeníticos, que contienen titanio o colombio. Este tratamiento consiste en calentar a una temperatura por debajo del recocido total para precipitar la máxima cantidad de carbón como carburo de titanio o carburo de colombio. Esto elimina la precipitación a temperaturas más bajas, lo cual reduciría la

resistencia del acero contra la corrosión.

RECOCIDO TOTAL: Proceso de suavizado en el cual una aleación ferrosa se calienta a una temperatura por encima del intervalo de transformación y, después de mantenerse durante un tiempo suficiente a esta temperatura, se enfría lentamente a una temperatura menor del intervalo de transformación. La aleación se enfría lentamente en el horno, aunque puede retirarse y enfriarse en algún medio que asegure una rapidez de enfriamiento lenta.

REDUCCION EN EL AREA: La diferencia entre el área de la sección transversal y el área más pequeña en el área de ruptura; representada como un porcentaje del área original; también llamada "contracción del área".

RESISTENCIA A LA TENSION: El valor obtenido de dividir la carga máxima observada durante la tensión por la muestra, entre el área de la sección transversal antes de tensionarse. También llamada "tensión máxima".

RESISTENCIA DE COMPRESION: RENDIMIENTO. La tensión máxima que un metal sujeto a compresión puede resistir sin una cantidad predefinida de deformación. La tensión máxima que un metal frágil puede resistir sin fracturarse cuando se sujeta a compresión.

REVESTIMIENTO: Proceso para cubrir un metal con otro. Las superficies de dos metales se ponen en contacto cuidadosamente y se someten a un laminado de tal forma que se obtiene como resultado una composición de recubrimiento. En algunos casos, antes del laminado, se puede depositar un electroplatinado.

SEGREGACION: En una aleación, la concentración de los elementos aleantes en regiones específicas, siempre es como resultado de la

cristalización primaria de una fase con la concentración subsecuente de los otros elementos en el líquido remanente.

TEMPLADURA: Proceso de recalentamiento templar-endurecer o acero normalizado a una temperatura por debajo del intervalo de transformación, y después enfriado a la rapidez deseada.

TEMPLAR: Proceso de enfriamiento rápido de una temperatura elevada por contacto con líquidos, gases o sólidos.

TENSION RESIDUAL: Tensiones macroscópicas que se conjuntan en un metal como resultado de una deformación plástica no uniforme. Esta deformación puede ser causada por el trabajo en frío o por gradientes de temperatura drásticos del templado o soldadura.

TENSIONES TERMICAS: Tensiones en el metal, que son resultado de la distribución no uniforme de temperatura.

TORSION: Tensión creada en un material por una acción de torsión. Correspondiendo a la tensión dentro del material resistiendo la torsión.

TRABAJO EN CALIENTE: Deformación plástica de un metal a tal temperatura y rapidez que el endurecimiento por tensión no ocurre. El límite más bajo de temperatura para este proceso es la temperatura de recristalización.

TRABAJO EN FRIO: Deformación de un metal plasticamente a una temperatura y rapidez a las cuales ocurre el endurecimiento por tensión. El límite superior de la temperatura para este proceso es la temperatura de recristalización.

TRABAJO MECANICO: Someter a un metal a presión que puede ser ejercida por rodillos, cuñas, prensas, o martillos, que cambian su forma o afectan su estructura y consecuentemente sus

propiedades mecánicas y físicas.

TRATAMIENTO TERMICO DE LA SOLUCION: Proceso en el cual una aleación se calienta a una temperatura adecuada, se mantiene a esta temperatura lo suficiente para permitir que un cierto constituyente entre en la solución sólida y es cuando se enfría rápidamente para mantener al constituyente en la solución. El metal se deja en un estado inestable, supersaturado y quizá subsecuentemente exhiba dureza.