

41126
86



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON

SELECCION DE MATERIALES DE CONSTRUCCION PARA
CAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y ENVOLVENTE
PARA LA INDUSTRIA DE PROCESO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA MECANICA)
P R E S E N T A :
DAVID ALFREDO PALOMEQUE CHACON

ASESOR DE TESIS: M. EN I. ALBERTO REYES SOLIS

MEXICO, D.F.

2003

A



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.



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGÓN

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGÓN – UNAM

JEFATURA DE CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

OFICIO: ENAR/JAME/0933/2003.

ASUNTO: Síndico

**LIC. ALBERTO IBARRA ROSAS
SECRETARIO ACADÉMICO
P R E S E N T E**

Por este conducto me permito relacionar los nombres de los Profesores que sugiero integren el Síndico del Examen Profesional del alumno: **DAVID ALFREDO PALOMEQUE CHACÓN**, con Número de Cuenta: **09852049-3**, con el tema de tesis: **"SELECCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PARA CAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y ENVOLVENTE PARA LA INDUSTRIA DE PROCESO"**.

PRESIDENTE:	ING. CASSIODORO DOMÍNGUEZ CRISANTO	FEBRERO	79
VOCAL:	ING. JAVIER NAVA PÉREZ	NOVIEMBRE	90
SECRETARIO:	M. en I. ALBERTO REYES SOLÍS	FEBRERO	94
SUPLENTE:	ING. DÁMASO VELÁZQUEZ VELÁZQUEZ	FEBRERO	96
SUPLENTE:	ING. JOSÉ LUIS GARCÍA ESPINOSA	AGOSTO	98

Quiero subrayar que el Director de Tesis es el M. en I. Alberto Reyes Solís, quien esta incluido basándose en lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Escuela.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Bosques de Aragón, Estado de México, 17 de octubre de 2003.

EL JEFE DE CARRERA



ING. RAÚL BARRÓN VERA

C.c.p.- Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez.- Jefa del Depto. de Servicios Escolares.
C.c.p.- M. en I. Alberto Reyes Solís.- Asesor de Tesis.
C.c.p.- Alumno.
RBVamce.

B

"La vida no es un pasillo recto y fácil

por el que viajamos libres y sin obstáculos,

sino un laberinto de pasajes

en el que debemos hallar nuestro camino,

perdidos y confundidos, una y otra vez

atrapados en un callejón sin salida.

Pero si tienes fe,

Dios siempre nos abrirá una puerta

que aunque tal vez no sea

la que queríamos,

al final será

buena para todos."

A. J. Cronin

PAGINACION DISCONTINUA

Agradezco a Dios:

Por darme en cada momento de mi vida fortaleza e inteligencia para salir adelante en todas las cosas que he realizado, por darme la oportunidad de convivir y ser parte de la familia que han formado mis padres, así como la dicha de haber conocido a las personas que me han brindado un apoyo.

Agradezco a mis padres:

Por todo el apoyo y confianza que me han dado desde siempre para la realización de mis metas y objetivos, por todo el cariño, la atención y los cuidados que me han brindado desde la distancia que me separa de mi hogar.

Agradezco a mis hermanos Luis Felipe y Ana Laura:

Por los momentos tan agradables que hemos pasado juntos, riendo y jugando, así como la honestidad y sinceridad que hay entre nosotros para brindarnos un apoyo.

Agradezco a Tammy:

Por las palabras de aliento, el cariño, el apoyo que me ha brindado y por los momentos en los que necesite de alguien y que estuvo para escucharme.

Agradezco a mis tías Lita y Amanda:

Por el apoyo, la confianza y la atención que me han dado durante la realización de mi carrera profesional, así como el cariño e interés que he recibido desde siempre.

Agradezco a la familia Iparraguirre Palomeque:

Por brindarme su casa para realizar mis estudios profesionales y por los momentos gratos que hemos pasado y su atención.

Agradezco a los ingenieros

Joel Mendoza Canales y Enrique Morales Ramírez:

Por el apoyo, la confianza y la oportunidad que me brindaron durante mi estancia en el instituto para la realización de mi tesis de licenciatura.

Agradezco al Instituto Mexicano del Petróleo:

Por brindarme la oportunidad para desarrollar mi tesis de licenciatura en sus instalaciones para que pudiera conocer más sobre lo que se realiza en este campo de la industria mexicana.

CONTENIDO**INTRODUCCIÓN**

ix

**CAPÍTULO 1
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

1.1 Clasificación del acero	1
1.1.1 Aceros al carbono	2
1.1.2 Aceros de aleación	3
1.1.3 Aceros de acuerdo a su proceso de fabricación	4
1.1.4 Aceros inoxidables	5
1.1.4.1 Clasificación de los aceros inoxidables	6
1.1.4.2 Selección de los aceros inoxidables	11
1.1.5 Aceros microaleados	13
1.2 Materiales no ferrosos	16
1.2.1 Cobre y sus aleaciones	16
1.2.2 Níquel y sus aleaciones	18
1.2.3 Titanio	21

iv

CAPÍTULO 2

DISPONIBILIDAD Y SUMINISTRO DE MATERIALES

2.1 Normalización	24
2.1.1 Sistema de designación AISI y SAE para aceros	25
2.1.2 Sistema de designación AISI para aceros inoxidables	27
2.1.3 Sistema de designación para aceros dúplex	28
2.1.4 Sistema de designación ASTM	30
2.2 Formas de suministro y aplicaciones	31

CAPÍTULO 3

CORROSIÓN Y OTROS TIPOS DE DAÑOS

3.1 Formas de la corrosión	35
3.1.1 Corrosión general o uniforme	36
3.1.2 Corrosión galvánica	37
3.1.3 Corrosión intergranular o cristalina	40
3.1.4 Corrosión por erosión	42
3.1.5 Corrosión por agrietamiento	45
3.1.6 Corrosión por picadura	46
3.1.7 Corrosión de fractura por esfuerzos	47
3.1.7.1 Efecto del medio ambiente	50
3.1.8 Corrosión inducida por contaminación del agua	51
3.1.8.1 Corrosión bacteriana	52
3.2 Método de evaluación de la velocidad de corrosión	54
3.3 Daños debido a vibraciones	55

CAPÍTULO 4

PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

4.1	Prevención de las reacciones corrosivas	58
4.2	Recubrimientos metálicos	60
4.2.1	Inmersión en caliente	61
4.2.2	Por explosión	61
4.2.3	Depósito de soldadura	63
4.2.4	Recubrimiento mediante laminas	66
4.2.5	Placa de choque	67
4.3	Recubrimientos no metálicos	68
4.3.1	Recubrimientos orgánicos	69
4.3.2	Inhibidores de la corrosión	69
4.3.3	Pintura	72
4.3.4	Recubrimientos cerámicos	73
4.4	Protección contra la corrosión galvánica	76
4.5	Pasivado de cambiadores de calor de acero al carbono para manejo de agua de enfriamiento	77
4.5.1	Tratamiento por recirculación	78
4.5.2	Tratamiento por agitamiento	79

CAPÍTULO 5

SERVICIOS COMUNES

5.1	Servicios no corrosivos	80
5.2	Servicios a baja temperaturas	82

5.3 Servicios a altas temperaturas	86
5.4 Servicios con agua de enfriamiento	88
5.5 Servicios con hidrógeno	92
5.6 Servicios con agua de mar	97
5.7 Servicios con ácidos y álcalis	99

CAPÍTULO 6

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

6.1 Información requerida	101
6.2 Características del material	103
6.2.1 Propiedades físicas	103
6.2.2 Propiedades mecánicas	105
6.2.3 Propiedades químicas	109
6.3 Costo de materiales	111
6.4 Características de fabricación	111
6.5 Disponibilidad de materiales	115

CAPÍTULO 7

REQUERIMIENTOS DE MATERIALES

7.1 Requerimientos específicos para cambiadores de calor de tubos y envolvente	116
7.2 Esfuerzos permisibles de diseño	119
7.3 Soldadura	121

7.3.1 Relevado de esfuerzos en las soldaduras	123
7.4 Requerimientos de operación y mantenimiento	125

CAPÍTULO 8

SELECCIÓN DE MATERIALES EN PLANTAS DE PROCESO

8.1 Refinación de crudo	130
8.2 Lista de equipos y materiales aplicados para la reconfiguración de la refinería de Minatitlán, Veracruz	136
8.3 Aplicaciones de materiales mejorados	150
8.3.1 Aplicaciones de los aceros dúplex	150
8.3.2 Aplicaciones de los aceros microaleados	158
CONCLUSIONES	160
BIBLIOGRAFÍA	163

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se ha elaborado con el propósito de establecer los requerimientos y recomendaciones específicos para realizar una correcta selección de los materiales utilizados en la fabricación de cambiadores de calor de tubos y envolvente para la industria de proceso, con la finalidad de prevenir, disminuir o anular los efectos negativos que se presentan en una selección inadecuada de los materiales.

También está propuesto para dar a conocer a los ingenieros que estén iniciándose en la industria de la refinería del petróleo o como fuente de consulta para estudiantes, técnicos o para aquellos ingenieros que ya tienen experiencia sobre materiales utilizados en las plantas de proceso.

El estudio realizado para la selección de materiales en la industria de proceso de forma optima, es debido a que la selección de materiales en ésta debe cumplir ciertas funciones para una constante actualización, y de esta manera lograr tener un nivel de competitividad nacional e internacional, como son:

- Desarrollar nuevos procesos en los materiales para ingeniería.
- Preparar y asignar estandarizaciones y dibujos de ingeniería para estos materiales y procesos.
- Evaluar nuevos y mejorados métodos de pruebas, procedimientos y equipos para laboratorio.
- Resolver dificultades y problemas en la producción.
- Investigar posibles causas de fallas e iniciar una acción correctiva.
- Dar servicio de pruebas y consulta técnica.

De esta manera, para poder realizar una correcta selección de los materiales a emplear en cada componente de los cambiadores, el ingeniero deberá tomar en consideración una serie de factores como son: propiedades físicas y mecánicas, resistencia a la corrosión, la disponibilidad del material, la facilidad de transformación de éstos, así como aspectos económicos, tiempo de vida del material, del equipo e instalación, así como el nombre del fluido, el gasto, temperatura de entrada y salida, presión de trabajo, calor específico, viscosidad, densidad, peso específico, conductividad térmica y entalpía.

Son factores de gran importancia debido a que son equipos que se preparan para las más exigentes condiciones de trabajo y operación, para ser utilizados en todos aquellos procesos que requieran enfriamiento, calentamiento o cambio de estado en líquidos o gases.

En el capítulo 1 se presenta la clasificación de los materiales de construcción comunes de los cambiadores de calor de tubos y envolvente, así como las características principales para su aplicación. Dentro de la clasificación se encuentran los aceros dúplex y aceros microaleados propuestos para realizar las modificaciones en los cambiadores de calor.

En el capítulo 2 se indican los sistemas de designación AISI, SAE y ASTM para los materiales empleados en la construcción de los cambiadores de calor, así como la forma en la que estos se suministran y su aplicación correspondiente.

En el capítulo 3 se abordan los tipos de corrosión que pueden generarse bajo las acciones de los fluidos corrosivos que se forman en los procesos para la refinación del petróleo, así como los daños que pueden ocasionar las vibraciones durante el servicio de los cambiadores de calor.

El capítulo 4 contiene los tipos de recubrimientos empleados para poder prevenir y proteger la formación de corrosión en los materiales a emplear, estas protecciones pueden ser mediante recubrimientos metálicos, no metálicos y químicos, como se verá con más detalle en el capítulo.

El capítulo 5 especifica los distintos ambientes de trabajo a los que están sometidos los cambiadores de calor, esto es, los servicios comunes a los que operarán y en los que se realiza el estudio de la formación de corrosión en los materiales.

En el capítulo 6 se especifican los datos importantes que deben considerarse para la selección de los materiales como son la información del tipo de proceso al que se someterán, las características físicas, mecánicas y químicas de cada material, su costo y la disponibilidad que exista en el mercado.

En el capítulo 7 se muestra los requerimientos necesarios para los componentes que integran a los cambiadores de calor, así como la consideración de los esfuerzos permisibles que estos deben tener para un buen desempeño, así como los elementos necesarios para la unión de estos por soldadura.

En el capítulo 8 se encuentra una pequeña descripción de lo que consiste la refinación del petróleo, así como los fluidos que se obtienen en cada planta de proceso. De esta manera, aquí se encontrará una lista de los materiales propuestos a emplear en la reconfiguración de la planta de Minatitlán, Veracruz. Del mismo modo, se encuentra la propuesta del cambio de los materiales comunes empleados hasta el momento, por los aceros dúplex y los aceros microaleados que proporcionan un mejor desempeño en los ambientes corrosivos.

Los materiales recomendados para cada tipo de proceso estarán regidos por el código ASME, *American Society of Mechanical Engineers* (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) Sección VIII, División I y II, y de la norma TEMA, *Tubular Exchangers Manufacturers Association* (Asociación de Fabricantes de Cambiadores de Calor de Tubos y Envolverte), para las partes básicas que integran a un cambiador de calor como son:

- **Envolverte.** Cuerpo y contenedor del fluido exterior.
- **Cabezales o bridas.** Tapas delanteras y traseras.
- **Espejos.** Placas que soportan el haz de tubos.
- **Tubos.** Por donde circula el fluido interior.
- **Baffles.** Placas que obligan al fluido aumentar su turbulencia.
- **Tirantes.** Barras para el espacio de los baffles.
- **Boquillas.** Por donde entran y sales los fluidos.

CAPÍTULO 1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los cambiadores de calor no pueden ser fabricados en serie ya que cada usuario tiene diferentes necesidades. Por lo que cada vez que se solicita un equipo de esta naturaleza, es necesario diseñarlo específicamente para los requerimientos del proceso y en conjunción con el usuario, para que apruebe todos los datos fisicoquímicos de los fluidos a trabajar.

Los materiales de construcción varían dependiendo del nivel de corrosión y erosión de los fluidos que se manejen; a continuación se da una lista típica de materiales comúnmente usados:

- Acero al carbono
- Cobre comercial Admiralty
- Acero inoxidable 304
- Acero inoxidable 316
- Acero inoxidable 316L

1.1 Clasificación del acero

El acero es el tipo de material más utilizado para la construcción de los componentes que integran un cambiador de calor, debido a que si se varía adecuadamente su composición, así como los tratamientos térmicos y mecánicos pueden obtenerse propiedades mecánicas que se encuentran entre márgenes muy amplios, así como la ventaja de obtenerse a un precio relativamente bajo en comparación de otros tipos de materiales.

Los diferentes tipos de aceros se clasifican de acuerdo al contenido de carbono así como de los elementos de aleación que producen distintos efectos en él. También se pueden clasificar por su esfuerzo de fluencia, y por medio de los métodos finales de tratamiento o acabado, así como por su tamaño y forma.

1.1.1 Aceros al carbono

El elemento principal de aleación es el carbono y más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono que se encuentra entre el límite de 0.06 a 1.7% y menos del 1.65% de manganeso, 0.1 a 0.60% de silicio, el 0.60% de cobre, 0.05% máximo de fósforo y 0.05% máximo de azufre.

La resistencia y la dureza de estos aceros se incrementa al aumentar el contenido de carbono. De este modo su clasificación de acuerdo a su contenido de carbono es la siguiente:

- **Los aceros al bajo carbono** son los más utilizados y contienen menos de 0.30% de carbono, son fáciles de deformar y se aplican donde no se requiere una alta resistencia. Se pueden soldar fácilmente por todos los métodos comerciales de soldadura; pueden obtenerse juntas de alta calidad sin la necesidad de un precalentamiento o postcalentamiento.

Los aceros que contienen menos del 0.15% de carbono poseen una baja resistencia a la tensión con el recocido y una mala maquinabilidad debido a su suavidad y adherencia a las herramientas de corte.

Los aceros que contienen entre 0.15 a 0.30% de carbono tienen una maquinabilidad satisfactoria en el recocido y normalizado.

- **Los aceros al medio carbono** contienen entre 0.3 a 0.5% de carbono, utilizándose para aplicaciones que requieren resistencias mayores que las de los aceros al bajo carbono. Son los más utilizados de los tres tipos de aceros. Pueden soldarse mediante métodos comunes de soldadura, sin embargo, debido a la formación de una fase de alta dureza en la zona soldada, puede ser necesario un precalentamiento o postcalentamiento, especialmente en aquellos que contienen entre 0.4 a 0.5% de carbono.
- **Los aceros al alto carbono** contienen cantidades mayores al 0.50%. Son empleados para aplicaciones donde se requieran de alta resistencia, rigidez y dureza. Cuando se temple a 163°C (325 °F) la dureza puede llegar hasta 62-65 Rockwell C. Tienen una baja maquinabilidad, una mala formabilidad y mala soldabilidad. Si su contenido es de más de 0.5% de carbono, es más difícil de soldar y se requiere de un control más riguroso debido a que puede originarse una mayor susceptibilidad a fracturarse y a la corrosión.

1.1.2 Aceros de aleación

Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno, cromo, níquel, aluminio, boro, cobalto, columbio, titanio, tungsteno o zirconio, además de cantidades que puedan exceder de uno o más de los límites de los siguientes elementos: manganeso 1.65%, silicio 0.60% y cobre 0.60% que los aceros al carbono normales, como se muestra en la tabla 1.1.

Estos elementos aleantes proporcionan un aumento en las propiedades mecánicas, la resistencia a la corrosión, resistencia a temperaturas elevadas, una buena tenacidad a bajas temperaturas, buena resistencia al desgaste, así como efectos en la dureza y maquinabilidad.

Tabla 1.1 Clasificación de los aceros según su composición.

Contenido de carbono	Contenido de aleación
Bajo carbono de menos de 0.3%	Carbono simples; sin elemento de aleación salvo Mn hasta 1.65%.
Carbono medio, 0.3 – 0.5%	Baja aleación, contenido total de aleantes <5%
Alto carbono, más de 0.5% Aceros para herramientas Aceros inoxidables	Alta aleación, contenido total de aleantes >5%

1.1.3 Aceros conforme a su proceso de fabricación

De acuerdo al proceso de fabricación (práctica de desoxidado) el acero se clasifica en:

Acero efervescente. Es producido sin llevar a cabo ninguna práctica de desoxidado durante su fabricación. Está limitado a contenidos de carbono no menores de 0.25%, posee una superficie con buenas características pero tiene una heterogeneidad química que persiste a través de la operación de rodado.

Acero tapado. Para la obtención de este acero se interrumpe la acción efervescente tapando el molde, generándose de este modo una superficie de menor calidad que el acero efervescente, pero con estructura interna más uniforme.

Acero semicalmado. Este acero es desoxidado parcialmente y es la presentación de la mayoría de los aceros, ya que es el proceso de fabricación más económico.

Acero calmado. El acero calmado o pasivado (*killed carbon steel*) es desoxidado completamente al adicionarle silicio o aluminio, para eliminar toda reacción entre el carbono y el oxígeno durante la solidificación; posee una estructura interna homogénea libre de defectos y una elevada resistencia al impacto.

Solo se puede llevar a cabo en aceros con un contenido de carbono mayor a 0.25%. Es adecuado para servicios a bajas temperaturas y para el manejo de hidrógeno (con un tamaño de grano fino), de esta forma se disminuye o elimina la posibilidad de levantar ampollas.

También es utilizado para diseñar equipos que operan a temperaturas mayores de 482°C (900°F). En virtud de que el código ASME para calderas y recipientes a presión no señala el esfuerzo permisible de diseño para aceros al carbono sobre 482°C (900°F), se requiere aplicar tratamiento térmico posterior a las soldaduras.

1.1.4 Aceros inoxidables

El acero inoxidable es una aleación, base de hierro, con contenidos de otros elementos que no hacen combinación química entre sí, pero producen una excelente resistencia a la corrosión.

Los principales elementos de aleación son el cromo, usualmente con un contenido del 12 al 30%, formando una delgada película impermeable de óxido (bajo atmósfera oxidante) la cual protege a la superficie de la corrosión. El níquel incrementa la protección contra la corrosión y se encuentra de 0 a 22%.

El carbono se usa para reforzar y endurecer el metal; sin embargo, cuando se eleva su contenido se produce un efecto de reducción de la protección contra la corrosión ya que el carburo de cromo formado reduce la cantidad de cromo libre en la aleación. Al igual que el columbio, cobre, molibdeno, selenio, azufre, tantalio, titanio, entre otros son utilizados para mejorar la resistencia a la corrosión, la oxidación o para el control de propiedades mecánicas.

Se usan ampliamente dentro de las industrias químicas y de proceso debido a que la acción de los elementos aleados es sustancial, además de estructural, y depende del porcentaje del o los elementos de la aleación. Un 12% de cromo impide la corrosión por el aire ambiente húmedo; para la oxidación a altas temperaturas se puede necesitar hasta un 30%.

1.1.4.1 Clasificación de los aceros inoxidable

Se pueden clasificar de tres formas de acuerdo a los elementos principales de aleación, al tipo de serie al que pertenecen por su contenido de elementos aleantes y por su microestructura.

De acuerdo a los elementos principales de aleación se clasifican en:

- ◆ **Aceros inoxidable al cromo**
- Están integrados por aceros martensíticos como los tipos 403, 410, 414, 416, 416 Se, 420, 431, 440 A, 440 B y 440 C; son endurecibles.
- Aceros ferríticos como los tipos 405, 430, 430 F, 430 Se, 442 y 446; son no endurecibles.

- ◆ **Aceros inoxidables al cromo-níquel**

- Están integrados por aceros austeníticos, que no son endurecibles más que por trabajo en frío, lo integran los tipos 201, 202, 301, 302, 302 B, 303, 303 Se, 304, 304 L, 305, 308, 309, 309 S, 310, 310 S, 314, 316, 316 L, 317, 321, 347 y 348.

- Aceros semiausteníticos, son endurecidos por precipitación como el PH 15-7 Mo, 17-7 PH, AM 355.

- Aceros martensíticos, son endurecidos por precipitación como el 17-4 PH, 15-5 PH, acero inoxidable W.

En base al contenido de elementos aleantes se tienen:

- ◆ Serie 200. Aceros inoxidables al cromo-níquel-manganeso, en los cuales el manganeso reemplaza un porcentaje de níquel.
- ◆ Serie 300. Aceros inoxidables al cromo-níquel, frecuentemente llamados como aceros inoxidables 18-8, con un contenido variable de cromo y níquel.
- ◆ Serie 400. Aceros inoxidables al cromo, con un contenido máximo de cromo de 30%.

Su clasificación se hace atendiendo a la microestructura, la cual es una resultante de los elementos aleantes presentes en el acero:

Martensíticos: Son aleaciones hierro-cromo, llamados simplemente al cromo, con contenidos de carbono relativamente altos de 0.2 a 1.2% y contenido de cromo de 12 hasta un 18% sin nada de níquel, identificados por la serie AISI 400. Los tipos más comunes son el 410, 420 y 431.

Poseen una mediana resistencia a la corrosión y son susceptibles de modificar sus niveles de resistencia mecánica, elevándola de manera considerable, al igual que la dureza, mediante un tratamiento térmico adecuado (Bonificado). La soldabilidad es muy deficiente; son ferromagnéticos.

Ferríticos: Aleaciones básicamente de cromo con alrededor de 12 a 18%, con bajos contenidos de carbono, con un máximo de 0.12%, y de 25 a 30% de cromo con un máximo de 0.38% de carbono, y nada de níquel, también clasificados dentro de la serie AISI 400. Los tipos más comunes son el 430, 409 y 434.

Los aceros convencionales de este tipo poseen una buena resistencia a la corrosión por cloruros, mayor a los inoxidables austeníticos, pero su desventaja es debida a su baja soldabilidad y baja resistencia al impacto, por lo que se limita al empleo en la industria del proceso, pero se les emplea como recubrimientos resistentes a la corrosión, generalmente en el manejo de hidrocarburos con compuestos de azufre a alta temperatura.

Los aceros especiales con un alto contenido de cromo como son: 29Cr-4Mo; 29Cr-4Mo-2Ni; 26Cr-Mo; bajo contenido de carbono y fabricados por procesos de vacío, presentan una buena ductilidad, soldabilidad y fabricabilidad adecuada. Son empleados para los tubos de transferencia en donde se requiera resistencia a la: picadura, corrosión por agrietamiento y corrosión por esfuerzos originados por la presencia de cloruros.

Austenítico: Contienen cromo que varía de 16 a 28%, níquel de 3.5 a 22% y molibdeno de 1.5 a 6% como elementos aleantes con contenidos de carbono que van de 0.20% o menos, se clasifican dentro del grupo de la serie AISI 300 y entre los tipos más comunes se encuentran el 304,304L, 316, 316L, 310 y 317.

Poseen una excelente resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas tanto bajas como altas; buenas propiedades mecánicas que son susceptibles de mejorar mediante procesos de deformación en frío; excelente soldabilidad y conformabilidad; muy buenas propiedades criogénicas, no son magnéticos y no se endurecen por tratamiento térmico.

Inoxidables endurecibles por precipitación (PH): La composición típica es 17% Cr y 7%Ni, con pequeñas cantidades adicionales de elementos de aleación como aluminio, niobio, cobre, titanio y molibdeno.

Pueden ser austeníticos (como el S66286), semiausteníticos (como el S17700) o martensíticos (como el S17400). Como estos aceros tienen un contenido de carbono muy bajo (0.04%C como máximo), es por eso que el endurecimiento primario se debe al endurecimiento por precipitación. La resistencia a la corrosión y al esfuerzo se mantienen a temperaturas elevadas

Dúplex: Son llamados ferrítico-austeníticos debido a que se presentan ambas fases y en la mayoría de los casos se presentan en cantidades iguales dependiendo de su composición y tratamiento térmico. Contienen cromo y níquel, aunque en porcentajes menores que todos los aceros anteriormente descritos, así como mínimos contenidos de carbono, también se les añade nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno con el objeto de proporcionarle una mejor resistencia a la corrosión y controlar su microestructura. Poseen excelente resistencia a la corrosión especialmente a la causada por "picaduras", comparable a la de los aceros inoxidables austeníticos con composición similar, pero con un punto de fluencia y resistencia máxima a la tensión mucho más elevadas. Su tenacidad se encuentra entre la del acero inoxidable austenítico y el ferrítico.

Tiene una buena soldabilidad y conformabilidad, acondicionables a usos típicos; son ferromagnéticos.

Las calidades comerciales actuales contienen 22–26% de Cr, 4–7% de Ni, hasta 4.5% de Mo, alrededor de 0.7% de C y W, y 0.08–0.35% de N. Se dividen de modo poco riguroso en cuatro tipos genéricos:

- 1) Fe-23Cr-4Ni-0.1N
- 2) Fe22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N
- 3) Fe-25Cr-5Ni-2.5Mo-0.17n-Cu
- 4) Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-W-Cu.

En los aceros inoxidable dúplex también se emplea el cromo y níquel como elementos principales para poder identificarlos. Las aleaciones que se han listado anteriormente reciben su nombre de acuerdo a su composición y son las 2304, 2205, 2505 y 2507 respectivamente. El último tipo se suele describir como el acero inoxidable “superdúplex”, y posee un tamaño de grano menor a los otros aceros inoxidables, por lo que posee altos valores de límite de fluencia y de fractura comparados con los inoxidables austeníticos.

Las constantes modificaciones de la composición han logrado mejorar la resistencia a la corrosión, la trabajabilidad y la soldabilidad. Muy particularmente, las adiciones de nitrógeno han mejorado la resistencia a la corrosión por picadura y la soldabilidad de estas aleaciones. Es muy común su empleo en ambientes acuosos que contienen cloruros, y como sustitutos de aceros inoxidables austeníticos que han sufrido ya sea agrietamiento por corrosión con esfuerzo o picaduras durante el servicio. Las calidades superdúplex son resistentes al agua de mar oxigenada o clorada.

1.1.4.2 Selección de los aceros inoxidable

La selección del material inoxidable requiere una evaluación basada en las siguientes características, listadas en orden de importancia:

- Resistencia a la corrosión y a la oxidación a temperaturas elevadas.
- Propiedades mecánicas del material.
- Características de los procesos de transformación a que será sometido.
- Costo total
- Disponibilidad del material.

Los aceros inoxidables no son indestructibles, sin embargo con una selección cuidadosa y sometiéndolos a procesos de transformación adecuados y realizando una limpieza periódica, resistirá las condiciones corrosivas y de servicio más severas. El tipo básico 304, tienen una buena resistencia a la corrosión y resiste casi todos los ácidos oxidantes, muchas soluciones esterilizadoras, la mayor parte de los compuestos químicos orgánicos y colorantes, y una amplia variedad de compuestos químicos inorgánicos. A partir del 304 se han realizado mejoras en cuanto a las propiedades de los aceros para un determinado medio de trabajo, los distintos materiales se muestran en la figura 1.1.

Para procesos industriales que requieren un nivel más alto de corrosión, conviene considerar los tipos 316 y 317, ya que estas calidades contienen molibdeno, el cual incrementa su resistencia contra la picadura en presencia de cloruros. Para ambientes severamente corrosivos en los que el agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo con cloruros es lo que más preocupa, por lo que se debe considerar la posibilidad de utilizar los superausteníticos, los acero inoxidable dúplex o los superferríticos.

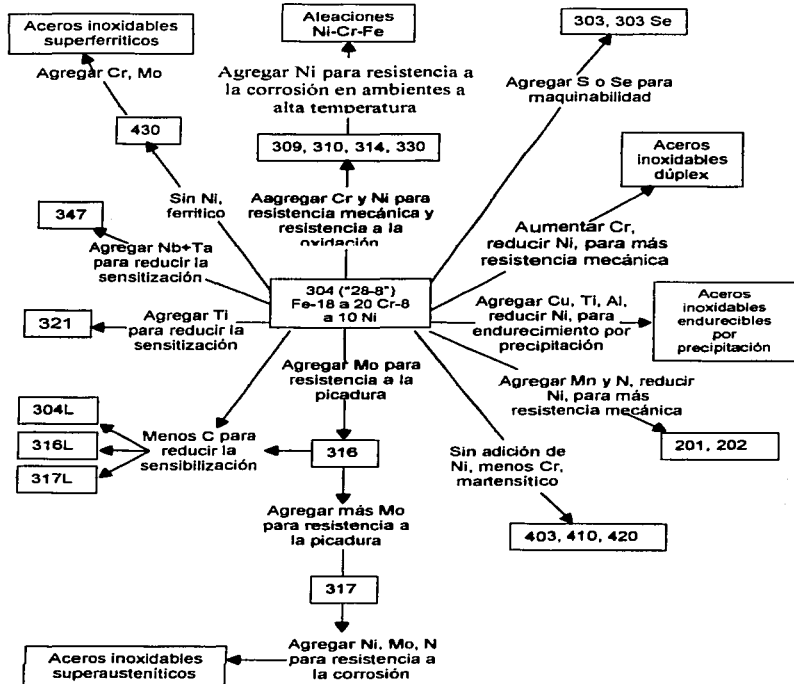


Figura 1.1 Conexión de la composición y propiedades de aceros inoxidables.

Para ambientes corrosivos menos severos, los aceros inoxidables ferríticos, como el 430, puede ser el adecuado, el bajo contenido de aleantes de esta calidad reduce su resistencia a la corrosión, pero también abarata mucho su costo respecto a los tipos 304 y 316 y las superaleaciones, este tipo resiste sin problemas el agua dulce y la corrosión atmosférica no marina.

1.1.5 Aceros microaleados

Se caracterizan por la adición de pequeñas cantidades (menor de 0.10% en peso) de vanadio, niobio, titanio, ya sea por separado o en conjunto.

En combinación con el carbono y/o nitrógeno forman partículas finas de precipitados dispersas en el acero dándole a éste: dureza, tenacidad, formabilidad en frío y soldabilidad sin incrementar la temperatura de transición de dúctil a frágil.

Están contemplados dentro de los aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA, *High Strength Low Alloy Steels*) los cuales tienen mejores propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión que los aceros al carbono normales. No son considerados como aceros aleados a pesar de que las mejoras son logradas por la adición de otros elementos en pequeñas cantidades, por lo que son clasificados como otra categoría de aceros.

Debido a que se pueden tener por separado o juntos los elementos adicionales se pueden clasificar en:

- Aceros microaleados al vanadio.

Su contenido de vanadio es de hasta 0.10% en peso, para su fabricación se usan procesos de rolado en caliente, rolado controlado, normalizado, templado y revenido.

El vanadio aumenta la resistencia al precipitarse en pequeñas partículas (5 a 100 nm de diámetro) de carbonitruros de vanadio durante el enfriamiento posterior. Estos precipitados permanecen disueltos durante el rolado en caliente por lo que su formación depende de la velocidad de enfriamiento. El aumento en la resistencia que proporciona el vanadio se encuentra en promedio entre 51 y 153 kg/cm² por cada 0.01% V en peso, esto también depende de la velocidad de enfriamiento y el espesor del material.

- Aceros microaleados al niobio.

El contenido de niobio también aumenta la resistencia debido al endurecimiento por precipitación. En comparación con el vanadio, el niobio es más efectivo en la reducción del tamaño de grano y aunado al endurecimiento por precipitación, se logra una mayor resistencia. El contenido del niobio es de entre 0.02 a 0.04% aproximadamente y el aumento en la resistencia es de 357 a 408 kg-cm² por cada 0.01% Nb que se adicione.

Estos aceros son producidos por rolado con recristalización controlada y templados directamente. Para la recristalización controlada no se requiere de titanio, en comparación con el acero al vanadio que si no necesita para que se pueda realizar este proceso.

- Aceros microaleados al niobio-vanadio.

Al combinarse los dos elementos se proporciona un elevado punto de fluencia que si se tienen por separado en el acero. Poseen contenidos de carbono muy bajos (<0.10 C) y cuentan con una buena tenacidad, ductilidad y soldabilidad. Son conocidos como aceros de perlita reducida.

- Aceros microaleados al niobio-molibdeno.

Al adicionar molibdeno se tiene un aumento en el punto de fluencia que va de 204 a 306 kg/cm² (3000 a 4500 lb/pulg²) por cada incremento del 0.01% Mo hasta llegar a 0.27%.

El efecto del Mo es cambiar la forma de la perlita, introduciendo bainita en su lugar, sin embargo, esto no es lo que mejora las propiedades del acero, sino la combinación de ambos elementos que facilita la precipitación de carbonitruros de niobio en ferrita.

- Aceros microaleados al titanio.

Al agregar Ti a un acero al bajo carbono, este forma varios compuestos que producen un incremento en la resistencia por precipitación, refinamiento de grano y controlan muy la formación de sulfuros. También retarda el crecimiento de grano de la austenita recristalizada durante el rolado de recristalización controlada, sin embargo, el titanio no es tan efectivo para el rolado en caliente convencional y el refinamiento de grano como el niobio, pero si es mejor que el vanadio.

- Aceros microaleados al niobio-titanio.

Al adicionar el titanio en pequeñas partículas se le da una buena tenacidad, lo que el niobio no puede dar.

También se mejora la eficiencia del niobio al combinarse con el nitrógeno y forma nitruros de titanio que previene la formación de nitruros de niobio en la austenita precipitándose en la ferrita, mejorándose así las propiedades de este tipo de acero.

1.2 Materiales no ferrosos

Son elementos metálicos y aleaciones que no están basados en el hierro, los más importantes en este grupo son el aluminio, el cobre, el magnesio, el níquel, el titanio, el zinc y sus aleaciones.

Estos materiales no pueden igualar la resistencia de los aceros pero debido a sus características pueden resistir más la corrosión, así como una buena relación resistencia-peso para esfuerzos moderados y altos.

1.2.1 Cobre y sus aleaciones

El cobre es uno de los metales nobles que es muy resistente a la corrosión. A continuación se tiene unos ejemplos de algunas aleaciones de cobre por su código, como son: C10100, C11000, C17000, C24000, C26000, C52100, C71500.

Su aplicación en los cambiadores de calor es hacia los servicios con agua de enfriamiento, agua caliente, agua de mar, vapor de agua, ácidos deareados y no-oxidantes, así como al ataque atmosférico. Las aleaciones más utilizadas para la construcción de los cambiadores de calor son las siguientes:

Bronce. Es una aleación de cobre y estaño (alrededor del 90% Cu y 10% Sn); se han desarrollado aleaciones adicionales de bronce basadas en otros elementos fuera del estaño; éstas incluyen bronce al aluminio y silicio.

Estos elementos aleantes mejoran sus propiedades físicas, mecánicas y también su resistencia a la corrosión.

De aquí la utilización de los bronce al aluminio y de las aleaciones cobre-níquel para los tubos de los condensadores.

Cobre-Níquel 90/10 (706). Se utiliza en condensadores marinos, condensadores de vapor, estaciones de agua de mar o en cambiadores de calor que manejen agua de enfriamiento. Proporciona una alta resistencia a la turbulencia de agua de mar, al ataque por contacto con el aire y a la corrosión por esfuerzos, posee una baja resistencia al ácido sulfhídrico (H_2S) y compuestos relacionados con el azufre.

Cobre-Níquel 70/30 (715). Se llaman comúnmente cuproníqueles, y contienen entre 3 y 30% de Ni. En los cambiadores de calor se emplea bajo condiciones drástica de corrosión y erosión, especialmente a altas temperaturas y velocidades, también en condensadores y calentadores de agua de alimentación a presiones medias.

Posee una alta resistencia a las temperaturas elevadas, es resistente a la turbulencia y al contacto con el aire, a la corrosión por esfuerzos; es una de las aleaciones mejores para la resistencia a las aguas muy contaminadas y cargas de H_2S , así como el contenido de una elevada salinidad.

Bronce naval (464), bronce naval inhibido (465) y metal muntz (280). Estas aleaciones ofrecen elevada resistencia mecánica con relación a otras aleaciones de cobre, buena resistencia a la corrosión y además buena maquinabilidad, se emplean principalmente en la construcción de espejos.

Bronce al aluminio inhibido (687). Se emplea para tubos de transferencia en los cambiadores de calor en servicios con agua de mar. Su resistencia a la corrosión es mejor que la de los bronce fosforados, es de suponer que debido a la formación de un óxido protector en virtud de la adición de aluminio.

Son resistentes a la corrosión por soluciones de cloruros y de potasa, ácidos minerales no oxidantes y muchos ácidos orgánicos. Tienen una resistencia a los ambientes alcalinos.

1.2.2 Níquel y sus aleaciones

El níquel es un elemento similar al Hierro en muchos aspectos, pero difiere en que es mucho más resistente a la corrosión y las propiedades de sus aleaciones a altas temperaturas son generalmente superiores. Debido a sus características de resistencia a la corrosión, se usa ampliamente como 1) un elemento de aleación en acero, tal como el acero inoxidable, y 2) como un metal de chapeado sobre otros metales como el acero al carbono.

Es resistente a los álcalis en frío y en caliente, ácidos orgánicos y ácidos inorgánicos no oxidantes diluidos, así como a la atmósfera. Se emplea en la construcción de equipos para servicios altamente corrosivos como enfriadores con agua de mar o salobre, condensadores de gasolina, donde sea necesaria una alta resistencia a la corrosión por esfuerzos y otras formas de corrosión debidas a la presencia de cloruros.

La adición de cobre mejora su resistencia a la corrosión en los medios reductores y en el agua de mar. El cromo aumenta su resistencia a la corrosión en los medios oxidantes.

La presencia de molibdeno como aleante también aumenta la resistencia en condiciones reductoras. La adición de cobre y molibdeno mejora la resistencia a la corrosión tanto en medios reductores como oxidantes. Algunos ejemplos de aleaciones de níquel de acuerdo a su código son: 270, 200, 400, 600 y 230, que poseen las características siguientes:

Níquel (serie 200). El níquel comercialmente puro es tan resistente como el acero estructural, aunque presenta mayor ductilidad, es inmune a la oxidación, presenta alta resistencia a la corrosión y al desgaste, se caracteriza por una gran conductividad térmica.

Debido a su alta resistencia a la corrosión, el níquel es ampliamente utilizado en equipos para la elaboración de alimentos y fibras sintéticas, así como el manejo de sosa cáustica y otras sustancias alcalinas.

Monel (níquel-cobre serie 400). Aleación que contiene aproximadamente un tercio de cobre y dos tercios de níquel, se caracteriza por una alta resistencia mecánica, soldabilidad, mantiene su dureza en un amplio rango de temperatura y una excelente resistencia para servicios muy corrosivos: sales, ácido fluorhídrico, ácido clorhídrico diluido, ácido fosfórico, varios ácidos orgánicos, numerosos solventes incluyendo el tetracloruro de carbono y agua de mar. No resiste fluidos corrosivos como el ácido nítrico y cloruro férrico. Generalmente recomendada para reducir soluciones pero no es adecuado para oxidarlas.

Su resistencia se considera arriba de la de tipos comunes de latones y bronce, y se puede comparar a la del acero estructural, aunque no responde a tratamientos térmicos se puede obtener un amplio rango en resistencia mediante trabajo mecánico.

Sus propiedades son afectadas por temperaturas que se encuentran arriba de 540°C (1000 °F), a bajas temperaturas no exhibe pérdidas de ductilidad y resistencia al impacto, se incrementa su resistencia a la cedencia y a la tensión.

En unidades de destilación de petróleo crudo, el monel provee resistencia al ácido clorhídrico diluido, en forma de recubrimiento en la sección superior de la torre de fraccionamiento, se emplea también en la fabricación de tanques acumuladores, condensadores y otros equipos sujetos a la corrosión por ácido clorhídrico y manejo de petróleo crudo, es resistente al ataque por H_2S presente en crudos con alto contenido de azufre.

Inconel (níquel-cromo-hierro serie 600). Se emplea en ambientes altamente corrosivos a elevadas temperaturas, es resistente a la oxidación a temperaturas arriba de $1179\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($2150\text{ }^{\circ}\text{F}$) y conserva una buena resistencia mecánica a altas temperaturas aproximadamente de $1207\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($2200\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Presenta una buena combinación de alta resistencia y maquinabilidad, se endurece mediante trabajo en frío, posee un buen desempeño tanto en servicios criogénicos como en servicios a elevadas temperaturas, puede ser trabajada tanto en frío como en caliente y soldado mediante procedimientos comunes.

Incoloy (hierro-níquel-cromo serie 800). Tiene como base al hierro, posee buenas propiedades mecánicas, una alta resistencia a la oxidación y carburización a altas temperaturas, es resistente a la corrosión bajo esfuerzos, corrosión por azufre, a gases de combustión y choque térmico.

Se emplea para tubos en calentadores desulfurizadores, tubos de hornos en unidades reformadoras de hidrógeno, tubos de hornos para la producción de etileno.

Hastelloy (níquel-molibdenu-cromo-hierro). Tiene una resistencia excepcional a la corrosión por ácidos concentrados calientes, además mantiene una adecuada resistencia mecánica a elevadas temperaturas.

Las aleaciones "A" y "B" se emplean para el manejo de ácidos clorhídricos, sulfúrico, fosfórico y ácidos orgánicos, en ausencia de agentes oxidantes; la aleación "C" es resistente a ambientes altamente oxidantes, cloro húmedo, cloruros y medios similares; la adición "D" es particularmente resistente al ácido sulfúrico; existen otras aleaciones modificadas para obtener características específicas.

1.2.3 Titanio

El titanio y sus aleaciones tienen una gran resistencia a la corrosión en agua de mar, cloro, soluciones de clorito e hipoclorito, ácido nítrico, ácido crómico, cloruros metálicos, sulfuros y ácidos orgánicos, de tal manera que no necesitan protección debido al resultado directo de la fuerte afinidad del metal con el oxígeno y de la excepcional estabilidad y resistencia a la corrosión del óxido metálico una vez formado.

Se pueden utilizar con buenas garantías en las plantas químicas, petroquímicas y en la manufactura de fertilizante, el principal uso comercial del titanio es en la obtención del cloro, ya que es uno de los pocos materiales adecuados para su manejo. El límite efectivo para aleaciones de titanio convencionales es aproximadamente de 500 a 550°C (932 a 1022°F), debido a esto, para trabajos en caliente se debe mantener a temperaturas altas el menor tiempo posible para reducir al mínimo la contaminación de la superficie, y la soldadura por fusión debe hacerse en una atmósfera de Argón. Cuando el titanio se le da un revestimiento de platino forma un excelente ánodo no consumible.

Los ánodos de titanio platinado se están usando actualmente para protección catódica mediante corriente aplicada y están instalados en muchas plantas de electrodiálisis y células hipocloríticas.

Por otro lado el titanio es resistente a la corrosión de la mayoría de soluciones electrolíticas en los procesos de acabado de metales. Los cambiadores de calor tubulares de titanio se emplean para calentar soluciones de cromado y niquelado. También en bastidores de anodizar se utiliza el titanio por sus propiedades electroquímicas. Es empleado ampliamente en los tubos de transferencia de los cambiadores de calor por donde se emplea agua de mar como medio de enfriamiento, y el fluido por el lado de proceso.

Debido a su excelente resistencia a la erosión es adecuado para manejar velocidades de 9.1 m/s (30 pies/s). Con el fin de reducir costos, se emplean tubos calibre 20 ó 22 BWG, aunque con tal medida puede ser necesario el aumento de soportes, y un proceso especial de rolado, los espejos pueden ser de titanio sólido o de acero al carbono recubierto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 2 DISPONIBILIDAD Y SUMINISTRO DE MATERIALES

Se pueden encontrar una gran cantidad de materiales disponibles en el mercado, por lo que es necesaria la recopilación sobre todas las características que poseen para la buena aplicación de estos en un determinado servicio.

Esta información puede obtenerse de manuales sobre materiales, de los mismos proveedores de materiales, o bien de las asociaciones que los representan y que están dedicadas a cada una de las clases de materiales como metales, cerámicas, plásticos y polímeros.

Estas asociaciones compilan normas de productos y prácticas, como lo son tamaños, formas y disponibilidad de cada uno de los materiales. En la tabla 2.1 se muestra algunos de los grupos que proponen y establecen especificaciones para materiales.

Tabla 2.1 Algunos grupos que redactan especificaciones.

Nombre del grupo	Designación
<i>Alloy Casting Institute</i>	ACI
<i>American National Standards Institute, Inc</i>	ANSI
<i>American Petroleum Institute</i>	API
<i>American Society of Mechanical Engineers</i>	ASME
<i>American Society for Testing and Materials</i>	ASTM
<i>American Welding Society</i>	AWS
<i>American Iron and Steel Institute</i>	AISI
<i>Society for Automotive Engineers</i>	SAE

2.1 Normalización

Aunque existan diversas instituciones dedicadas a proponer y establecer especificaciones para materiales, aquí sólo se enfocará a cuatro especificaciones que se manejan en la industria petrolera para la construcción de los diferentes elementos constitutivos de los cambiadores de calor de tubos y envolvente.

Las formas de suministro más utilizados son: placa, tubo de calibre, tubo de cédula, forja, barra y accesorios, cuyas características, dimensiones y requerimientos de fabricación están normalizadas por los siguientes códigos, estándares y especificaciones.

ANSI (*American National Standards Institute*)

Anteriormente llamada ASA (*American Standards Association*), divide sus estándares y códigos en dos partes; la primera se compone de varios estándares que especifican las dimensiones, tolerancias, rangos de presión, marcado, requerimientos de bisel, tipos de rosca, entre otros, para los tubos, conexiones, bridas, válvulas, empaques y tornillería. La segunda parte está constituida por varios códigos que describen los requerimientos mínimos para el diseño, materiales, fabricación, pruebas e inspección para sistemas de tuberías.

ASME (*American Society of Mechanical Engineers*)

Establecen los requerimientos para materiales, métodos de manufactura, pruebas de materiales, diseño y cálculo de recipientes y sistemas de tuberías. El objetivo principal de las reglas del código ASME es suministrar una razonable protección a la vida y ala propiedad proporcionando un margen de deterioro de los equipos en servicio que conduzcan a un periodo de utilización razonablemente largo y seguro.

En la formulación de estas reglas y en el establecimiento de las presiones máximas admisibles de diseño se consideran los materiales, los métodos de fabricación y construcción, el tipo de inspección y los accesorios de seguridad.

ASTM (*American Society for Testing and Materials*)

Posee especificaciones que abarcan materiales, métodos de manufactura, tratamiento térmico, pruebas, tolerancias dimensionales, entre otros, para materiales en general.

API (*American Petroleum Institute*)

Aquí se establecen los requerimientos de materiales, métodos de manufactura, tolerancias dimensionales, entre otros, para los sistemas de tuberías que se relacionan con la industria petrolera.

2.1.1 Sistema de designación AISI y SAE para aceros

De acuerdo a las especificaciones desarrolladas por la *American Iron and Steel Institute* (AISI) y la *Society of Automotive Engineers* (SAE) que son iguales para el acero con la excepción de que AISI utiliza prefijos para indicar el método de obtención del mismo, la designación de los aceros al carbono se rige por un sistema de numeración de cuatro dígitos: 10XX, donde 10 nos indica que se trata de acero al carbono y XX nos indica el porcentaje o rango de contenido de carbono en puntos porcentuales, como se muestra en la tabla 2.2.

Por ejemplo, en el acero 1035, el número 35 representa un rango de 0.32 a 0.38 % de contenido de carbono. Cuando se tiene una serie de cinco dígitos, los últimos tres indican el contenido de carbono.

CAPÍTULO 2 DISPONIBILIDAD Y SUMINISTRO DE MATERIALES

Tabla 2.2 Sistema AISI-SAE de designación de aceros al carbono y de baja aleación.

Material	Descripción
Aceros al carbono	
10XX	No resulfurado, 1.0Mn máx.
11XX	Resulfurado
12XX	Resulfurado y refosforizado
15XX	No resulfurado, sobre 1.0Mn máx.
Aceros aleados	
13XX	1.75 Mn
40XX	0.20 ó 0.25 Mo, ó 0.25Mo+0.042S
41XX	0.50, 0.80 ó 0.95Cr+0.12, 0.20 ó 0.30Mo
43XX	1.83Ni, 0.50-0.80Cr, 0.25Mo
46XX	0.85 ó 1.83Ni+0.20 ó 0.25Mo
47XX	1.05Ni, 0.45Cr, 0.20 ó 0.35Mo
48XX	3.50Ni+0.25Mo
51XX	0.80, 0.88, 0.93, 0.95 ó 1.00Cr
51XXX	1.03Cr
52XXX	1.45Cr
61XX	0.60 ó 0.95Cr+0.13 ó 0.15V min.
86XX	0.55Ni, 0.50Cr, 0.20Mo
87XX	0.55Ni, 0.50Cr, 0.25Mo
88XX	0.55Ni, 0.50Cr, 0.35Mo
92XX	2.00Si ó 1.40Si+0.70Cr
50BXX	0.28 ó 0.50Cr, 0.0005-0.003B
51BXX	0.80Cr, 0.0005-0.003B
81BXX	0.30Ni, 0.45Cr, 0.12Mo, 0.0005-0.003B
94BXX	0.45Ni, 0.40Cr, 0.12Mo, 0.0005-0.003B

(a) XX o XXX, los dos o tres últimos dígitos de estas designaciones indican el porcentaje de carbono después de dividirlos entre 100, salvo en el caso 9XX de las calidades SAE. Las XX de las calidades SAE designan el esfuerzo de fluencia mínima en ksi.

En los aceros aleados los dos primeros dígitos indican los principales elementos de aleación y sus rangos. A veces se intercalan letras después de los dos primeros dígitos para indicar otra característica como la B que indica que se le a agregado boro, L indica que se le a agregado plomo. También se pueden emplear prefijos como la M que indica calidad corriente, la E indica horno eléctrico y la H indica que puede ser endurecido (templabilidad).

2.1.2 Sistema de designación AISI para aceros inoxidables

Se utiliza un sistema de números para identificar los aceros inoxidables, conforme a cuatro grupos o series. Este sistema utiliza tres dígitos; el primero es indicativo del grupo o serie a que pertenecen y los dos últimos se refieren al tipo, como se aprecia en la tabla 2.3.

Las letras de sufijo pueden indicar la presencia de un elemento adicional o indicar alguna característica especial, como se indica a continuación:

- L – Disminución del contenido de carbono.
- S – Disminución de contenido de carbono y níquel.
- N – Adición de nitrógeno para mayor resistencia.
- LN – Bajo carbono y adición de nitrógeno.
- F – Adición de azufre y fósforo favorecedores a la maquinabilidad.
- Se – Adición de selenio para mejor mecanizado.
- H – Mayor contenido de carbono.
- Cu – Adición de cobre.
- B – Adición de silicio para evitar descamado.

CAPÍTULO 2 DISPONIBILIDAD Y SUMINISTRO DE MATERIALES

Tabla 2.3 Designación AISI para aceros inoxidables

Grupo	Serie	Descripción
Austenítico	2XX	Aceros al cromo-níquel-manganeso, no maquinables y no magnéticos.
Austenítico	3xx	Aceros al cromo-níquel, no maquinables y no magnéticos.
Martensítico	4xx	Aceros al cromo, maquinables y magnéticos.
Ferrítico	4xx	Aceros al cromo, no maquinables y magnéticos.
Martensítico	5xx	Aceros al cromo, bajo cromo y resistentes al calor

2.1.3 Sistema de designación para aceros dúplex

Estos aceros no se encuentran dentro de la designación A.I.S.I., sin embargo, debido a la evolución que han tenido se hizo necesaria la aparición de la especificación ASTM y ASME.

Todos estos aceros se han incluido en las especificaciones ASTM para placa, lámina, tubos rolados y soldados. En el código ASME se han incluido en la Sección VIII, División 1.

CAPÍTULO 2 DISPONIBILIDAD Y SUMINISTRO DE MATERIALES

La primera generación de este tipo de acero, se caracteriza por un elevado contenido de carbono (hasta 0.2%), que reduce la resistencia a la corrosión en la soldadura por lo que necesita un tratamiento térmico postsoldadura para tener buenas propiedades mecánicas, pero posee una buena resistencia a la corrosión localizada por su alto contenido de cromo y molibdeno.

Los aceros de la segunda generación se desarrollaron para el mejoramiento de la soldabilidad y resistencia a la corrosión que sufrían los primeros. Tienen un bajo contenido de carbono, para evitar corrosión intergranular. También se les adiciona nitrógeno en cantidades mayores a 0.10% con el objeto de mejorar la resistencia a la corrosión por picaduras y hendiduras. Los aceros más empleados de estas dos generaciones están dados por la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Designación ASTM de los aceros inoxidable dúplex.

ASTM	Nombre comercial	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Otros
Primera generación							
A789, A790	3RE60	18.5	4.7	2.7			1.7Si
A240, A268	Tipo 329	26	4.5	1.5			
A743, A744	CD-4MCu	25	5	2	3		
Segunda generación.							
A182, A240, A789, A790	44LN	25	6	1.7		0.15	
A789, A790	DP-3	25	7	3	0.5	0.15	0.3W
A182, A240, A276, A789, A790	Aleación 2205	22	5	3		0.15	
A240, A479, A789, A790	Ferralium 255	25	6	3	2	0.20	
A240	7-Mo PLUS	26.5	4.8	1.5		0.20	

2.1.4 Sistema de designación ASTM

Todas las especificaciones ASTM llevan una designación, para identificar los diferentes tipos de materiales y métodos de prueba. Esta designación está compuesta generalmente de una letra prefijo seguida de un guión y dos números o de dos números y una letra, o dos números y el año entre paréntesis. La letra inicial indica el grupo general al cual pertenece la especificación:

- A – Metales ferrosos.
- B – Metales no ferrosos.
- C – Materiales a base de cemento, cerámica y concreto.
- D – Materiales asfálticos, productos del petróleo, materiales varios.
- E – Métodos de prueba.
- F – Materiales para aplicaciones específicas.
- G – Corrosión, deterioro y degradación de materiales.

El número que precede inmediatamente a la letra es un número de serie, el cual da el orden en que fue adoptada la especificación, y por lo tanto, no guardan ninguna relación con los materiales que identifica. El número enseguida del guión, indica el año de adopción o de la última revisión. En lo que se refiere a materiales ferrosos, tanto AISI y SAE clasificaron a los aceros en función de su composición química, la ASTM los clasifico por usos.

Este criterio que estableció la ASTM tiene la ventaja de proporcionar el o los aceros más adecuados para una determinada aplicación, pero la desventaja es que un acero sirve por ejemplo para hacer tubos para servicio en refinería, tubos sin costura para caldera, tubos con costura para calderas y tubos sin costura para servicio a temperatura elevada. La ASTM elaboró cuatro normas diferentes que utilizan la misma aleación.

Por otra parte hay normas como la A-108 para barras de acero que incluyen todos los aceros al carbono de la serie AISI-SAE (1010 a 1095). Por lo tanto, significa que si se pide un acero ASTM A-108 es un error porque no se encuentra especificando un acero sino una familia de aceros, ya que todos son usados para hacer barras.

Otro punto importante es que existen normas que contienen requisitos generales para un determinado producto, como la norma ASTM A-6 para placas, lámina y barras para uso estructural, por lo tanto, no contienen características de ningún metal en específico sino sólo requisitos generales.

Finalmente hay usos para los cuales sólo interesan las propiedades mecánicas y no la composición química, como por ejemplo la fundición gris, la cual se clasifica en la norma ASTM A-28 en función de su resistencia a la tracción. Esto significa que todo material que sea fundición gris, y que cumple con los requisitos mecánicos de la norma, es adecuado para los usos que marca la norma o son requeridos sin importar su análisis químico.

Por lo anterior no es posible por medio de un análisis químico encontrar una norma ASTM con la que cumpla el material, ya que puede haber muchas normas con las cuales cumpla, incluyendo las que no especifican requerimientos químicos.

2.2 Formas de suministro y aplicaciones

La construcción de cada elemento constitutivo de los cambiadores de calor estará regida por la disponibilidad comercial de los materiales en sus diferentes formas de suministro, así como de las características de cada parte constitutiva del equipo.

Las formas de suministro de los materiales son las siguientes:

Placa.

Se utiliza principalmente en la condición de acabado en caliente (laminado en caliente). Sus propiedades de resistencia y tenacidad se mejoran por laminación en caliente controlada, por templado y revenido. Puesto que estas propiedades sufren menoscabo cuando el contenido de carbono es alto, la mayor parte de las placas de acero tienen un contenido de carbono de bajo a medio, y predominan las calidades de acero no aleado de bajo carbono.

También se producen placas de acero aleado, pero a veces se someten a tratamientos térmicos para conseguir propiedades mecánicas superiores a las del producto acabado en caliente. La calidad normal es la calidad más común de placa de acero al carbono simple con un máximo de 0.33%.

La calidad normal se pide habitualmente con base en límites de composición estándar, no se produce ordinariamente con arreglo a requisitos de propiedades mecánicas, debido a que no hay restricciones en cuanto a desoxidación, tamaño de grano, uniformidad química, solidez interna o ausencia de imperfecciones superficiales.

Es empleada en la fabricación de las mamparas, soportes, tapas formadas y planas, placas divisorias, soleras, placas de choque, espejos y secciones cilíndricas (envolvente, canales y cuellos de boquillas), cuando el diámetro de éstas sea mayor de 457 mm (18 pulg).

También se utiliza en la fabricación de bridas, cople y, en algunos casos, espejos y tapas planas, cuando el espesor de éstos sea mayor de 63.5 mm (2 $\frac{1}{2}$ pulg).

Tubo de calibre (tubing).

En el tubo de calibre, el diámetro exterior coincide con el diámetro nominal, el espesor de pared se identifica por calibres del 1 al 30 según B.W.G., las tolerancias tanto del diámetro exterior como del espesor de pared son muy estrictas, el rango de fabricación es de 6.35 mm (1/4 pulg) hasta 101.6 mm (4 pulg), pudiendo ser con o sin costura.

El tubo calibre es empleado en los cambiadores de calor, como tubo de transferencia y en algunos casos se fabrican con estos tubos los tubos espaciadores.

Forja.

Se utiliza en la fabricación de bridas, coples y en algunos casos para la fabricación de espejos y tapas planas, cuando el espesor de éstos sea mayor de 63.5 mm ($2\frac{1}{2}$ pulg).

Tubo de cédula (pipe).

En éste, el diámetro exterior no coincide con el diámetro nominal, con excepción de diámetros de 356 mm (14 pulg) y mayores, el espesor de la pared se identifica por cédulas, las tolerancias tanto del diámetro exterior como del espesor de pared son más amplias que para el tubo calibre, se fabrica a partir de 3.3 mm (1/8 pulg) y sin costura hasta 406 mm (16 pulg) y con costura todos los diámetros.

Para la fabricación de los cambiadores de calor, los tubos de cédula se utilizan en cuellos de boquillas, envolventes y canales, siempre y cuando el diámetro nominal de éstas sea menor o igual a 457 mm (18 pulg), también pueden ser aplicados como tubos espaciadores.

Tubo aletado.

El tubo aletado es un elemento de alta eficiencia para la transferencia de calor y usado en la fabricación de cambiadores de calor enfriados por aire, serpentines, condensadores, entre otros.

Las aletas pueden ser integrales, donde la aleta es formada por el mismo material del tubo, que por lo general es bimetálico y el material interior imparte resistencia al tubo, las aletas se unen al tubo liso en forma mecánica y por lo general se construyen con un material diferente al del tubo (comúnmente de aluminio), la aleta se puede apoyar o incrustar.

Barra.

Ésta es empleada para la fabricación de espárragos, tornillos y varillas tensoras, existiendo una gran variedad de medidas comerciales.

Accesorios.

Los accesorios son los elementos disponibles comercialmente, como son las bridas, tapas, codos, conexiones, tornillos de ojo, entre otros.

CAPÍTULO 3 CORROSIÓN Y OTROS TIPOS DE DAÑOS

El principal problema que se tiene que enfrentar para el diseño de los cambiadores, es la selección de materiales adecuados para las condiciones de operación, para el manejo de fluido de proceso y principalmente para resistir la corrosión.

La corrosión es la degradación de un material debido a la reacción química o electroquímica con su medio. En su mayoría la corrosión es producida por la acción electroquímica o galvánica.

La superficie de los materiales puede corroerse, ya sea en una atmósfera común o en otros medios corrosivos como el agua salada. La corrosión de la superficie puede combinarse con esfuerzos estáticos o de fatiga para provocar una acción más destructiva que la que pudiera esperarse con las acciones de la corrosión y del esfuerzo por separado.

3.1 Formas de la corrosión

La corrosión ocurre en muchas formas y están basadas en los siguientes factores:

1. **Naturaleza de las sustancias corrosivas.** La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.
2. **Mecanismos de corrosión.** Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.

3. Apariencia del metal corroído. La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

3.1.1 Corrosión general o uniforme

El ataque uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química, y no están acompañados por la manifestación de picadura, rotura o erosión.

Es la forma más fácil de medir, por lo que las fallas inesperadas pueden ser evitadas por simple inspección regular.

Es necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura para ser controlada; en ocasiones es más práctico y económico emplear inhibidores, es por eso que debe especificarse un aumento de espesor en los materiales.

El aumento de espesor está en función de la velocidad de corrosión del metal especificado, manejando el fluido de proceso; o de una tolerancia a la corrosión mínima especificada por los códigos, estándares o especificaciones del diseño.

A continuación se da los rangos en su medio de servicio de metales expuestos a este tipo de corrosión:

- *Satisfactorio.* El rango de corrosión es menor a 0.127 mm/año (5 mpy). Los materiales que se encuentran en este rango son apropiados para aplicarse en partes críticas, como tubos de transferencia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- *Adecuado.* El rango de corrosión se encuentra entre 0.127 a 0.508 mm/año (5 a 20 mpy). Los materiales son apropiados para partes donde un rango de corrosión se prevé desde el diseño, como son el envolvente, canal, tapas, boquillas y partes estructurales.
- *No recomendable.* El rango de corrosión es mayor a 0.508 mm/año (20 mpy).

3.1.2 Corrosión galvánica

Este tipo de corrosión ejerce una acción localiza que puede sobrevenir cuando una junta de unión entre dos metales diferentes está sumergida en una solución que puede obrar como electrolito, como se puede ver en la figura 3.1.

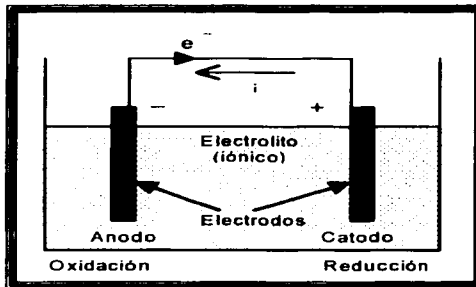


Figura 3.1 Formación de una celda electroquímica (corrosión galvánica).

CAPÍTULO 3 CORROSIÓN Y OTROS TIPOS DE DAÑOS

En un medio corrosivo, los dos metales diferentes forman unos electrodos cortocircuitados y constituyen una celda electroquímica, resultando la disolución del electrodo anódico, mientras que el cátodo permanece inalterable. El potencial variará según la posición ocupada por los metales y aleaciones según la serie galvánica de la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Serie galvánica en agua de mar.

Más nobles (cátodo)	Material
	Platino
	Oro
	Grafito
	316 pasivado
	304 pasivado
	Titanio
	410 pasivado
	Níquel pasivado
	Cobre
	Bronce almirantazgo
	Níquel activo
	Estaño
	Plomo
	316 activo
	304 activo
	410 activo
	Hierro fundido
	Hierro dulce
	Aluminio
	Hierro galvanizado
	Zinc
	Aleaciones de magnesio
	Magnesio
Menos nobles (ánodo)	

Hay ciertos factores que influyen en la corrosión galvánica y aún empleando distintos metales no significa que la corrosión sea inevitable, por lo que se incluye lo siguiente:

- a) **Conductividad del circuito:** Tiene que existir el contacto entre metales diferentes en una solución de alta conductividad para que se produzca el ataque galvánico.
- b) **Potencial entre ánodo y cátodo:** La posición que ocupa cada metal en la serie galvánica determina el potencial y la dirección del flujo de corriente cuando se compone una celda. El metal que ocupa la posición más alta en la serie constituye el cátodo. El otro metal es el ánodo y, debido a esto, es que resulta atacado por la acción de la celda.

El potencial se incrementa cuanto más apartadas unas de otras son las posiciones ocupadas por cada metal en la serie. Los aceros inoxidables en estado pasivo figuran en la serie justo a continuación de la plata, del grafito y del oro. Así, en una solución oxidante, los aceros inoxidables pasivos suelen constituir el cátodo, mientras que serán los otros metales los que serán atacados.

Cuando la solución se vuelve reductora, el acero inoxidable se vuelve activo y los metales faltantes como el cobre y el bronce constituirán el cátodo y acelerarán la corrosión el acero inoxidable.

- c) **Polarización:** Este efecto es el que se produce sobre los electrodos de una celda galvánica por el depósito sobre los mismos de los gases liberados por la corriente.

La evolución de los iones de hidrógeno puede cambiar de pasiva en activa la superficie del acero inoxidable, acelerando así la corrosión del ánodo.

- d) **Áreas relativas del cátodo y ánodo:** El área relativa de las superficies ejerce un efecto pronunciado sobre el daño producido por la acción galvánica. Un pequeño ánodo con cátodo grande produce una corriente de elevada densidad y acelera la corrosión en el ánodo. Deberán evitarse las pequeñas áreas del metal menos noble. No se utilizarán piezas de sujeción de aluminio para el acero inoxidable. En cambio, el empleo de piezas de sujeción de acero inoxidable para aluminio da resultados satisfactorios.
- e) **Relación geométrica entre superficies de distintos metales:** Un borde o una esquina del metal menos noble no deberá estar en contacto con el centro de un área de gran superficie del metal que ha de constituir el cátodo si llega a formarse una celda galvánica.

3.1.3 Corrosión intergranular o cristalina

Para entender mejor este tipo de ataque, se citará el siguiente ejemplo, cuando un metal fundido se cuela en un molde, su solidificación comenzó con la formación de núcleos al azar, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce como granos o cristales.

Debido a la nucleación al azar, los planos de los átomos en las cercanías de las fronteras de granos no encajan perfectamente bien y el espacio entre ellos recibe el nombre de límite de grano. Los límites de grano son a veces atacados preferentemente por un agente corrosivo y el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite.

La corrosión generalmente ocurre porque el agente corrosivo ataca el límite de grano o una zona adyacente a él que ha perdido un elemento importante para tener una resistencia a la corrosión, como se puede apreciar en la figura 3.2.

En un caso severo de este tipo de corrosión granos enteros se desprenden debido al deterioro completo de los límites y la superficie se verá rugosa, sintiéndose al tacto una superficie rasposa debido a la pérdida de los granos.

El límite de grano es sensible al calor por lo que la corrosión de este tipo es una consecuencia de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos; puede ser corregido por otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada.

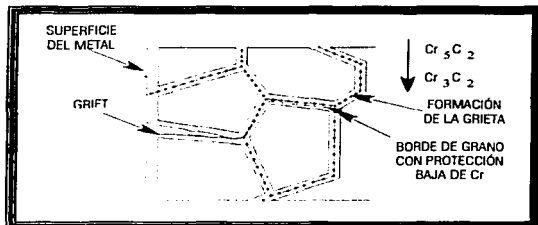


Figura 3.2 La corrosión en los límites de grano genera la aparición de grietas que hacen fallar el material.

Ocurre más en los aceros inoxidables al someter el material a temperaturas entre 427°C y 871°C (800°F y 1600°F); salvo que se modifiquen las aleaciones, esta forma de corrosión sólo se puede evitar con tratamiento térmico.

En los aceros inoxidables austeníticos, el problema principal es la sensibilización en las fronteras de grano. Cualquier incremento en la temperatura (por ejemplo durante el proceso de soldadura), dentro del rango de 450 a 90°C (842 a 1652°F), el carbono se difunde hacia las fronteras del grano y precipita en forma de carburo de cromo, ocasionando que sea susceptible a la corrosión intergranular y se dice que ha sido sensibilizado.

En algunos casos, se confunde la corrosión uniforme con la intergranular debido al aspecto "grabado" de las superficies expuestas a ella. Incluso en los aceros inoxidables ideales con tratamiento térmico se puede notar un ataque ligeramente acelerado en los linderos de los granos, pues estas zonas son más reactivas que los granos en sí.

3.1.4 Corrosión por erosión

Este tipo de corrosión se genera cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste mecánico, como se ve en la figura 3.3.

La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión, es a menudo difícil de establecer y varía grandemente de una situación a otra, y el mecanismo de la erosión generalmente se atribuye a la remoción de películas superficiales protectoras, como las películas de óxido formadas por el aire o por productos adherentes de la corrosión.

La corrosión por erosión tiene la apariencia de picaduras poco profundas de fondo terso y el ataque puede presentar también una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal.

Prospera en condiciones de alta velocidad, turbulencia, choque, entre otros. Los líquidos con suspensión conteniendo partículas sólidas puede igualmente causar este tipo de problema; puede ser evitada por cambios de diseño o por selección de materiales más resistentes.



Figura 3.3 Corrosión por erosión del tipo generado por cavitación.

En el lado envolvente se puede presentar una combinación de daño por choque y erosión corrosión por lo que es común instalar una placa de choque en la boquilla de entrada para proteger los tubos de transferencia; de forma alternativa algunos tubos que se encuentran frente a la boquilla pueden ser reemplazados por barras sólidas o por tubos huecos sellados con el mismo diámetro.

Debido al flujo turbulento a la entrada de los tubos, origina que sean más susceptibles a sufrir un ataque combinado de erosión y corrosión en los extremos de los tubos y se manifiesta generalmente en forma de picadura y con un desgaste en general.

En los calentadores recuperadores de calor con gases a alta temperatura en la entrada, se origina un desgaste por oxidación de vapor en el exterior de los tubos cerca del espejo; si el ataque está limitado al extremo de los tubos, este puede ser reducido mediante la inserción de ferrules.

La corrosión por cavitación y desgaste son formas especiales de este tipo de corrosión.

- **Corrosión por cavitación.**

Es causada por la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie del metal, esto es, cuando se genera una combinación de flujo y carga estática se forman fuerzas de tensión dentro del líquido y formando las burbujas que provocan esfuerzos alternativos de tensión y compresión en el metal, originando un daño por fatiga y sensibilidad a la picadura.

Las altas presiones producidas por este colapso pueden disolver el metal o remover las partículas protectoras.

En los cambiadores de calor este daño puramente mecánico es excepcional, pero una baja carga efectiva puede desarrollar en los tubos superiores de enfriadores con aire, originándose una formación de burbujas que dañan la capa protectora formada y se produce corrosión por picadura.

- ◆ **Corrosión por desgaste.**

Ocurre cuando las piezas de metal se deslizan una sobre la otra, causando daño mecánico a una o ambas piezas, y el deslizamiento es generalmente un resultado de la vibración. La corrosión por deslizamiento se atenúa utilizando materiales de construcción más duros, empleando lubricación o bien incrementando la fricción hasta un punto tal en que el deslizamiento es imposible.

La corrosión se cree que juega uno de los siguientes papeles: el calor de la fricción oxida el metal y a continuación el óxido se desgasta, o bien, la remoción mecánica de las partículas protectoras de óxido, o los productos de la corrosión resultantes, dan como resultado la exposición de superficies limpias del metal al medio agresivo, en tal forma que el fenómeno corrosivo se acelera.

3.1.5 Corrosión por agrietamiento

Las condiciones ambientales en una grieta, pueden con el tiempo volverse muy diferentes de las existentes en una superficie limpia y abierta, por lo que en un medio de ambiente corrosivo puede causar corrosión en las grietas.

Las grietas o hendiduras se encuentran generalmente en los empaques, traslapes, tornillos, remaches, también pueden formarse por depósitos de suciedad, productos de la corrosión y raspaduras en las películas de recubrimiento.

Se atribuye a los siguientes factores:

- a) Cambio de acidez en la grieta o hendidura.
- b) Escasez de oxígeno en la grieta.
- c) Desarrollo de iones diferentes en la hendidura.
- d) Agotamiento de inhibidor en la grieta.

Al igual que todas las formas de corrosión localizada, la corrosión por agrietamiento no ocurre en todas las combinaciones metal-agente corrosivo, y algunos materiales son más susceptibles para producirla que otros, como aquéllos que dependen de las películas protectoras de óxido formadas por el aire para adquirir su resistencia a la corrosión, tal y como ocurre con el acero inoxidable y el titanio.

Estos materiales pueden ser aleados para mejorar su resistencia y el diseño deberá hacerse de tal manera que reduzcan las hendiduras, tratando de mantener las superficies limpias para combatir este tipo de corrosión.

3.1.6 Corrosión por picadura

Se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente poco atacada y las picaduras pueden tener varias formas, como se ve en la figura 3.4.

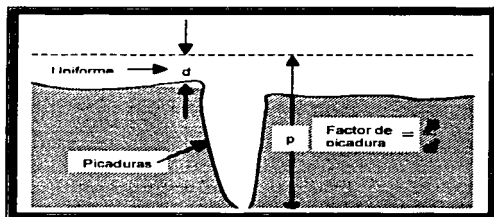


Figura 3.4 Grieta ocasionada por corrosión por picadura.

La forma de una picadura es a menudo responsable de su propio avance, por las mismas razones mencionadas en la corrosión por agrietamiento, es decir, una picadura puede ser considerada como una grieta o hendidura formada por sí misma.

Es un proceso lento que puede llevarse meses y años antes de ser visible, pero que naturalmente, causará fallas inesperadas. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales.

Los cloruros ácidos, tales como el cloruro férrico y el cloruro sódico son particularmente peligrosos, pero cualquier cloruro en concentración apreciable puede ser la causa posible de perturbaciones. El contenido de molibdeno en los tipos 316 y 317 aumentan la resistencia a la picadura.

3.1.7 Corrosión de fractura por esfuerzos

La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, dará como resultado en algunos casos, la fractura de un material, la mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque, pero afortunadamente el número de combinaciones aleaciones-corrosivo que causan este problema son relativamente pocas.

Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, tratamiento térmico, o pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo. Pueden seguir caminos intercristalinos o transcristalinos que a menudo presentan una tendencia a la ramificación. Para combatir la corrosión de fracturas por tensión es necesario realizar el relevado de esfuerzo o seleccionar un material más resistente.

La mayoría de las fallas ocurridas en equipos de proceso fabricados con acero inoxidable son debidas a corrosión bajo esfuerzo, por lo que se debe de considerar la combinación aleación-medio ambiente susceptible al fenómeno.

Un caso típico son los condensadores con tubos de transferencia de acero inoxidable, en donde aún cuando el agua de alimentación tenga un contenido muy bajo de cloruros, no se puede evitar tener contracciones en lugares cercanos al espejo, sobre todo en holguras entre el espejo y tubos, así como en los retornos de tubos en "U" de la parte externa del condensador.

El contenido de níquel juega un papel importante en la resistencia a la corrosión por esfuerzos de tensión de aceros inoxidables en presencia de cloruros, de tal manera que los aceros inoxidables con un contenido de níquel menor de 2% (aceros inoxidables ferríticos) y aquellos con un contenido de níquel de más de 45% (aleaciones de alto contenido de níquel), son totalmente inmunes a la corrosión por esfuerzos.

El esfuerzo mínimo necesario para que ocurra la grieta dependerá de la temperatura, la composición química de la aleación y el medio ambiente.

El agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos esta influido por la relación entre la dirección del esfuerzo y la dirección de los granos del metal; los esfuerzos transversales son los más dañinos que los longitudinales.

Según los estudios que se han realizado a las distintas manifestaciones de la corrosión se tiene la tabla 3.2 donde el efecto de la corrosión bajo tensión es más común.

Tabla 3.2 Porcentaje de la frecuencia con que se presentan los tipos de corrosión.

Tipo de corrosión	%
Corrosión bajo tensión	21
Corrosión uniforme	20
Corrosión – fatiga	18
Corrosión por picaduras	10
Corrosión – erosión	7
Corrosión en hendiduras	6
Corrosión a alta temperatura	6
Fluencia	4
Corrosión intergranular	3
Fragilización por hidrógeno	1
Corrosión galvánica	1
Otros casos	3

A continuación se dan las fuentes principales de esfuerzos localizados y elevados en un material:

- Proceso térmico. Los más comunes son los generados por soldaduras, debido a que se generan esfuerzos residuales de tensión por la contracción del material durante el enfriamiento. También puede ser por la solidificación de fundiciones y en tratamientos térmicos inadecuados.
- Concentradores de esfuerzos. Pueden ser geométricos o entalladuras debidas al diseño, debidas al daño mecánico o golpes de arco eléctrico accidentales, grietas provocadas por tratamiento térmico inadecuado o deficiencias en pre y postcalentamiento en soldaduras, irregularidad superficial dañinas generadas por desgaste o por maquinado grueso.

- Fabricación. Pueden generarse por esfuerzos residuales altos por resultado de dobleces, estampado, estirado y otras operaciones de formado en frío. Puede generar esfuerzos de tensión perjudiciales el rolado de expansión de los tubos de cambiadores de calor o condensadores.
- Operación. Se pueden generar durante la operación del material debido al desgaste localizado, fricción, erosión, cavitación y corrosión localizada, así como la exposición cíclica de ciertas partes del metal a altas y bajas temperaturas.

3.1.7.1 Efecto del medio ambiente

La corrosión causada por el agrietamiento bajo esfuerzos es favorecida por iones que se encuentran como impurezas en el medio ambiente en el que opera. El agrietamiento debido a la corrosión bajo esfuerzos se acelera con un incremento de la temperatura.

Del mismo modo es de gran importancia el estado físico del medio ambiente, debido a que si se tiene por ejemplo una aleación expuesta a medios acuosos, tiende a ser menos atacada que los metales que se encuentran a la misma temperatura y esfuerzo pero que están sujetos a condiciones de humectación y secado alternativos.

Un metal va a tener en su sensibilidad ciertos factores de acuerdo al medio ambiente:

- ❖ Los materiales con un alto grado de pureza serán menos propensos a este tipo de falla, que los metales y las aleaciones comerciales.

- ❖ Cualquier metal con un tamaño de grano pequeño es mucho más resistente a este tipo de falla que un material igual al anterior pero con un tamaño de grano más grueso.
- ❖ La sensibilidad de aceros al carbono y de baja aleación con contenidos de carbono menor a 0.10%, generalmente aumenta conforme disminuye el contenido de este elemento, sin embargo, el hierro puro y los aceros descarbonizados son más resistentes al agrietamiento.

También los aceros que tienen esfuerzos de cedencia cercanos a 14.085 kg/cm² (200 000 psi) o mayores, son muy sensibles a esta falla.

3.1.8 Corrosión inducida por contaminación del agua

Las aguas naturales son medios complejos que se encuentran en evolución permanente y que se pueden considerar en una primera aproximación como disoluciones de diferentes especies químicas en agua.

Las especies más abundantes son los iones, cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} , entre otros, y iones como HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , entre otros, así como gases, O_2 , CO_2 , entre otros, y a veces H_2S .

La agresividad de un agua depende de su capacidad para conducir la corriente eléctrica. Un agua poco conductora ocasionará que la actividad de las pilas de corrosión que se puedan formar en la misma sea pequeña, ya que el circuito eléctrico que se cierra a través de ella presenta una resistencia eléctrica elevada.

En el agua de mar, cuya conductividad es muy alta por la gran cantidad de iones presentes, la actividad de los procesos de corrosión es tan alta, que en lapsos muy cortos se pueden originar fenómenos muy graves.

Un agua dulce y una de mar constituyen casos extremos, y entre ambos existen una gran variedad de aguas cuya agresividad frente a los metales varía en función de su composición y factores como la concentración de oxígeno disuelto, pH, temperatura, concentración de cloruros y sulfatos, agitación y velocidad del medio, entre otros.

El agua de mar se caracteriza por la gran estabilidad de sus propiedades fisicoquímicas, y sobre todo por su salinidad, que varía entre 30 y 37%.

3.1.8.1 Corrosión bacteriana

Desde hace mucho tiempo se conoce el papel que desempeñan las bacterias en los procesos de corrosión metálica.

La corrosión microbiana puede definirse como un proceso metabólico bacteriano que origina o acelera la destrucción de los metales.

Los microorganismos influyen sobre los procesos de corrosión a través de mecanismos que les permiten adquirir la energía necesaria para las actividades vitales. Esta energía puede adquirirse a través de tres medios:

- a) *Respiración aerobia*, que consiste en la eliminación progresiva de hidrógeno de los substratos orgánicos. El hidrógeno es oxidado por el oxígeno del aire.

- b) *Respiración anaerobia*, en la cual el substrato orgánico es también oxidado por eliminación de hidrógeno y éste reduce los compuestos inorgánicos.
- c) *Fermentación*, proceso anaerobico en el cual el substrato orgánico no es completamente oxidado.

Al igual que la corrosión, los procesos metabólicos se basan en la transferencia de iones de hidrógeno o de electrones. La actividad de los microorganismos corresponde a valores de pH del medio que es también muy favorable a la corrosión, de esta manera tenemos a continuación la designación de la corrosión debida al tipo de organismo:

Se piensa que la corrosión de los metales se debe a las bacterias anaerobias, por ejemplo el desulfovidrio, sin embargo, existen diversos tipos de bacterias que hay que tener muy en cuenta desde el punto de vista de la corrosión, como las bacterias del hierro la thiobacterias y las bacterias aerobias que producen ácido sulfhídrico.

Los cultivos microbianos son casi siempre sistemas fuertemente reductores. El potencial de oxidación de las bacterias se puede medir, y la intensidad de la oxidación se caracteriza por la pérdida de electrones. No hay dificultad en medir estas ganancias o pérdidas de electrones con la ayuda de un potenciómetro, utilizando un electrodo de platino como punto cero y un electrodo de referencia como el cloruro mercurioso.

Cuando una sustancia puede ceder electrones a un electrodo inerte y la sustancia se oxida puede recibir electrones de ese electrodo por lo que se dice que es una sustancia electroactiva.

3.2 Método de evaluación de la velocidad de corrosión

La velocidad de flujo de los diferentes electrolitos, impacta en forma directa en el tipo y velocidad de corrosión de los metales. La velocidad de corrosión puede verse incrementada o retardada en función de las condiciones de flujo.

Es importante mencionar que la velocidad de corrosión no necesariamente se ve incrementada por el aumento de la velocidad del fluido.

Para poder determinar la acción de los parámetros de transporte, se debe evaluar si el material tiene una tendencia a la pasivación o sólo exhibe una cinética por activación. En el caso que el metal tienda a formar una capa pasiva, la influencia de la velocidad será diferente al caso en el que el material es totalmente activo.

Es importante estudiar la hidrodinámica del sistema para determinar la influencia de la velocidad de flujo y tipo de corrosión. Los parámetros principales son:

1. La geometría del material sujeto a evaluación.
2. El Número de Reynolds.
3. El tipo de electrolito a evaluar.
4. La temperatura de trabajo.

El método utilizado tradicionalmente y que se viene creando hasta la fecha para evaluar la velocidad de flujo, es el de medida de la pérdida de peso, que consiste en determinar la pérdida de peso que ha experimentado un determinado metal o aleación en contacto con un medio corrosivo. Las unidades más utilizadas para expresar esa pérdida de peso son: miligramos decímetro cuadrado día (mdd), milímetro por año (mm/año), pulgadas por año o milipulgadas (mpy, abreviatura en inglés).

Sin embargo, cuando no se tiene una pérdida grande de material, como en el caso de la corrosión uniforme, se necesita medir la variación de las propiedades mecánicas. Se puede tener el control de dichos cambios mediante la aplicación de un ensayo de tracción que permitirá determinar la resistencia del metal atacado en comparación con una probeta del mismo material que no haya sido sometida a las condiciones del medio agresivo.

3.4 Daños debido a vibraciones

Dependiendo del tipo de servicio en el que se encuentren operando, gran parte de los cambiadores de calor están sujetos a vibraciones en mayor o menor grado. Estas pueden causar adelgazamiento en el espesor del tubo al friccionarse o golpearse con los baffles y originar fallas por fatiga.

También pueden ocurrir daños por fatiga en la unión tubo-espejo o aplastamiento de tubos intermedios debido a choques con tubos contiguos; flujos considerables pueden producir daño en los soportes del equipo y tuberías.

Las causas más comunes que pueden ocasionar la generación de vibraciones son:

- ❖ La longitud de tubo sin soportar mayores que las máximas remendadas por el estándar T.E.M.A.
- ❖ Daño en un mayor número de tubos es más probable que ocurra cuando se manejan gases o vapores por el lado envolvente, especialmente si la presión de operación es mayor de 7 kg/cm^2 (100 lb/pulg^2).

- ❖ Daños por vibraciones debidas al flujo son comúnmente limitadas a los tubos localizados en áreas de alta velocidad.

Para evitar que se presenten estos problemas de vibraciones se recomienda realizar lo siguiente:

- ❖ El diseño de un cambiador de calor más resistente a los daños por vibración es aquel con mamparas segmentadas. Si la caída de presión es un problema debido a las mamparas segmentadas, puede ser incrementando el paso.
- ❖ Un aumento en el espesor de las mamparas reduce el grado de desgaste en los tubos, de la misma manera un control más riguroso de las tolerancias de los barrenos en la mampara reduce el daño.
- ❖ Rigidizar el haz de tubos uniendo las mamparas por medio de placas soldadas.
- ❖ Colocar varillas tensoras lo más cerca posible del corte de mamparas.

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

La vida útil de los equipos de proceso en la industria petrolera se acorta substancialmente como resultado de la corrosión, y aunque en los últimos años se han tenido grandes adelantos en su detección y control, es casi imposible eliminarla.

El recubrimiento es el método más usado para combatir la corrosión, permitiendo a los diseñadores, fabricante y usuarios una mayor facilidad o libertad en la selección adecuada de los materiales.

El recubrimiento trabaja sobre el principio de separar completamente el metal base del corrosivo o disminuir la reacción que puede ocurrir entre el metal base que se protege y el corrosivo, siendo ésta la mejor respuesta a los problemas corrosivos. Se tiene que especificar un incremento de espesor como tolerancia a la corrosión, erosión o para daños mecánicos.

La corrosión permisible para cambiadores de calor se deberá especificar individualmente del lado de la envolvente, así como para el lado de los tubos, aplicándose esto a todos los componentes que se encuentren sujetos a presión y para cada superficie que se encuentre en contacto con los fluidos de proceso, agregándose dicha corrosión permisible al espesor mínimo requerido por el cálculo de esfuerzos. La tolerancia a la corrosión no deberá ser menor de 3mm (0.125 pulg) en ninguno de los casos, para componentes de acero al carbono y de baja aleación será de 1.5mm (0.0625 pulg), para las aleaciones de cobre, aceros inoxidable y aleaciones no ferrosas 0 mm.

4.1 Prevención de las reacciones corrosivas

El fenómeno de corrosión bajo esfuerzos puede ser prevenido o reducido, aplicando uno o más de los siguientes métodos.

- ❖ **Disminuyendo el valor de esfuerzos residuales a un nivel mínimo.**
Esto se puede lograr por medio de un tratamiento de relevado de esfuerzos. Los aceros al carbono se pueden someter a un relevado de esfuerzos a temperaturas entre 595 y 650°C (1103 y 1202°F). Los aceros inoxidables austeníticos generalmente se relevan de esfuerzos a temperaturas entre 815 y 925°C (1500 y 1691°F).
- ❖ **Eliminando los compuestos nocivos del medio ambiente.**
Se puede realizar a través de la desgasificación, desmineralización o destilación.
- ❖ **Cambio de aleación.**
Es una alternativa cuando no es posible modificar el medio ambiente ni los esfuerzos en el material. Aunque los aceros al carbono son menos resistentes a la corrosión que los aceros inoxidables, son más resistentes al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos que estos, por lo que en condiciones que tienden a producir este daño, generalmente son más recomendados que los inoxidables.
- ❖ **Inhibidores.**
Se han empleado inhibidores orgánicos e inorgánicos como un medio para reducir los efectos de agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos en ambientes medianamente corrosivos.

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

Aunque, como en todo suministro de inhibidores se debe proveer de suficiente inhibidor al sistema con el fin de prevenir la posibilidad de corrosión localizada o por picaduras.

Para que exista un proceso de corrosión, debe formarse una pila o celda de corrosión y, por lo tanto, un ánodo, un cátodo, un conductor metálico y una solución conductora, además de una diferencia de potencial entre los electrodos o zonas anódicas y catódicas; la eliminación de alguno de los componentes esenciales de la mencionada pila, podría llegar a detener el proceso.

Para esto, existen tres maneras de lograr lo anterior y por tanto de luchar contra la corrosión:

1) Aislamiento eléctrico del material.

Esto se puede lograr mediante el empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente o por aplicación de recubrimientos diversos. De esta forma, se puede lograr aislar el metal del contacto directo con el medio agresivo (agua, suelo y atmósfera por lo general).

2) Cambiando el sentido de la corriente en la pila de corrosión.

Por ejemplo, conectando eléctricamente el acero con un metal activo (zinc o magnesio) podemos llegar a suprimir la corrosión del acero, ya que dejará de actuar como ánodo y pasará a comportarse como cátodo, dejando el papel de ánodo al metal más activo. Este es el principio de la protección catódica.

3) Polarización del mecanismo electroquímico.

Esto se puede lograr eliminando el oxígeno disuelto mediante la adición en el medio agresivo de ciertas sustancias llamadas inhibidores.

Por medio de ellos se logra polarizar uno de los electrodos de la pila de corrosión y por lo tanto, llegar a detener o cuanto menos disminuir sus efectos.

Estos procedimientos de protección son de suma importancia en cuanto a la eficiencia de la protección contra la corrosión, tanto el espesor, porosidad, como la naturaleza misma de las capas obtenidas son función del procedimiento de aplicación. Por ejemplo, los recubrimientos electrolíticos que tienen espesores de algunos micrones, se reservan generalmente para su utilización en medios poco agresivos. Los recubrimientos obtenidos por inmersión en un metal fundido tienen espesores mayores y los recubrimientos obtenidos mediante proyección permiten obtener espesores más grandes y perfectamente controlables, se utilizan especialmente en condiciones severas de corrosión.

4.2 Recubrimientos metálicos

Los recubrimientos son un excelente medio de protección para el hierro y acero al carbono, usados como metal base en la mayoría de los equipos, metales puros y en algunos casos sus aleaciones se pueden aplicar a la gran mayoría de los equipos de proceso. Los rangos de aplicación de recubrimientos van desde 0.051mm (0.002 pulg) a más de 6.35mm(1/4 pulg) de acuerdo al método utilizado. Por lo común el espesor del metal aplicado como recubrimiento será el acabado final, pero en algunos casos funciona como base para recubrimientos adicionales.

El carácter económico es influenciado en la elección de los materiales recubiertos debido a que es más costoso seleccionar una placa maciza que resista la corrosión que la que se cubrió con anticorrosivo, además de poder emplear un material base como el acero al carbono que tiene buena resistencia mecánica y que se puede emplear con espesores menores.

Para la construcción de cambiadores de calor de tubo y envolvente, estos materiales se utilizan en la fabricación de espejos, envolvente, canal, tapas, boquillas y en ocasiones también se recubre la parte expuesta al fluido corrosivo, incluyendo la cara de asentamiento de las bridas.

4.2.1 Inmersión en caliente

En esta técnica se sumerge el artículo o pieza que se recubrirá en un baño con el metal de recubrimiento fundido, el cual tiene un bajo punto de fusión, esta operación se realiza después de una adecuada preparación superficial como un decapado ácido; el recubrimiento del acero puede hacerse con zinc (galvanizado), aluminio (aluminizado), estaño y plomo.

La técnica del galvanizado es la más utilizada cuando un recubrimiento relativamente delgado es requerido, cuando la pieza o parte a recubrir no es compleja, o cuando el espesor uniforme no es importante. Después del enfriamiento, las piezas ya recubiertas pueden someterse a un tratamiento complementario de pasivación en ciertos casos.

4.2.2 Por explosión

El proceso de explosión CLAD es el más usado por su alto rango de aplicación y calidad. El material CLAD es la composición de dos o más materiales similares o disímiles.

En este proceso los metales a unir se sueldan metalúrgicamente mediante un movimiento de alta velocidad producido por la detonación controlada de un explosivo plástico, líquido, o granulado.

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

Se coloca uniformemente sobre el metal que se ha de unir y la otra pieza de metal se coloca sobre una base de acero o concreto armado para metales delgados y un lecho de arena para los metales gruesos.

Las variables importantes que se tienen que controlar en este proceso son la velocidad y el ángulo mínimo de colisión, así como la distancia entre superficies y cantidad de explosivo, entre otras.

Aunque ninguno de los metales se funde durante el proceso, los dos metales que se unen, se limpian dinámicamente cuando se aplica la fuerza producida por la explosión, lográndose casi una unión perfecta, obteniéndose de esta manera una buena resistencia a la corrosión del metal no ferroso, economía y resistencia mecánica del material base.

El espesor del material base, generalmente acero al carbono o acero de baja aleación, debe ser por lo menos el doble del espesor del metal de recubrimiento y normalmente no menor de 13 mm (1/2 pulg), no teniéndose límite superior de espesores, como se puede ver en la tabla 4.1.

El código ASME II y el estándar ASTM ha incluido en sus especificaciones el material CLAD, incluyendo las pruebas destructivas y no destructivas que se realizan en esos materiales.

Además el código ASME VIII DIV. 1 incluye toda la normativa para fabricación de equipos de proceso con este tipo de material.

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

Tabla 4.1 **Espesor del metal de recubrimiento por explosión.**

Material de recubrimiento	Espesor	
	Mínimo	Máximo
Aluminio	6.0 mm (1/4 ")	51 mm (2 ")
Latones/bronces	1.6 mm (1/16 ")	16 mm (5/8 ")
Cobre y sus aleaciones	1.6 mm (1/16 ")	22 mm (7/8 ")
Hastelloy	1.6 mm (1/16 ")	13 mm (1/2 ")
Níquel y sus aleaciones	1.6 mm (1/16 ")	21 mm (13/16 ")
Platino	A convertir	
Acero inoxidable	1.6 mm (1/16 ")	25.4 mm (1 ")
Tantalio	A convertir	
Titanio	1.6 mm (1/16 ")	21 mm (13/16 ")

A continuación se dan unos ejemplos de estos materiales tipo CLAD:

- ASTM B-432

Placas de acero al carbono con CLAD de cobre o aleación de cobre

- ASME SA-264

Placas de acero al carbono con CLAD de acero inoxidable

- ASME SA-265

Placas de acero al carbono con CLAD de níquel o aleaciones de níquel

4.2.3 Deposito de soldadura

La aplicación de recubrimientos puros en superficies, consiste en depositar continuamente alguna clase de aleación especial sobre una parte metálica con la finalidad de obtener una superficie que resista la corrosión, la erosión, el impacto o algunas combinaciones de estos.

Los procedimientos de soldaduras más utilizados en la fabricación de equipo son:

- 1) Manual: por oxiacetileno o por arco eléctrico.
- 2) Semiautomático: con arco abierto, arco sumergido o arco metálico protegido.
- 3) Automático: con arco abierto o sumergido.

El recubrimiento por soldadura adecuado se selecciona dependiendo de los siguientes factores:

- ◆ Tipo de desgaste.
- ◆ Temperatura.
- ◆ Corrosión.
- ◆ Composición del metal base.
- ◆ Equipo disponible de soldadura.
- ◆ Acabado del recubrimiento.
- ◆ Entre otros.

Para aplicar el recubrimiento es necesario tomar las mismas precauciones que se toman en la soldadura, acero al carbono con un máximo de 0.28% se aplica el recubrimiento sin recalentamiento. Todos los metales deben ser base con más de 0.35% de carbono, deben calentarse antes y después de aplicar el recubrimiento para disminuir la fragilidad. El material base deberá estar libre de impurezas o suciedades, el espesor de un recubrimiento depende de su aplicación y va de 1.6 a 6.4 mm (1/16 a 1/4 pulg), cuando se requiere más de 6.4 mm (1/4 pulg) es recomendable utilizar varias capas con la finalidad de disminuir la difusión al mínimo, en caso contrario se puede variar la composición química del recubrimiento y de este modo sus propiedades mecánicas y anticorrosivas.

Lo anterior tiene una gran importancia debido a los problemas que pueden surgir debido a que se tiene un calentamiento muy alto y el material a recubrir puede deformarse y generar esfuerzos internos o residuales de gran magnitud en la unión metal base y metal de soporte. Así mismo, debido al calentamiento del metal base que generalmente es de acero al carbono y a la fusión del metal de aporte o de recubrimiento, se origina una dilución de los dos materiales.

Para la fabricación de cambiadores de calor con materiales recubiertos es necesario lo siguiente:

- ❖ Al fabricación de espejos o tapas recubiertas debe hacerse a partir de espesores de material base mayor o iguales a 51 mm (2 pulg), empleando el procedimiento de unir mediante soleras punteadas los dos espejos con el fin de reducir lo más posible la deformación debida al calentamiento durante el proceso.
- ❖ Las boquillas de 102 mm (4 pulg) de diámetro y menores usualmente son de aleación sólida; boquillas de diámetro mayores son generalmente recubiertas.

Otro factor de gran importancia es cuando las uniones soldadas son la parte más débil en un equipo fabricado de acero inoxidable, por lo que en la práctica, el soldador deberá ser el encargado de dar una buena resistencia a la corrosión, para esto se debe de seguir las siguientes recomendaciones.

1. Si es posible, se deberá fabricar por separado las partes hechas de acero al carbono y las de acero inoxidable.

2. Evitar contaminación al momento de fabricarse el acero inoxidable con acero al carbono y otras impurezas, como el utilizar cuerdas de nylon en lugar de cadenas de acero para levantar los equipos, entre otros.
3. No emplear las mismas herramientas en la fabricación de piezas de acero inoxidable y de acero al carbono.
4. Seguir las indicaciones del proveedor del material de soldadura, como el elegir el material de aporte adecuado, la aplicación de calor adecuada, control de temperatura, entre otros.

4.2.4 Recubrimiento mediante laminas

Este es otro método para suministrar un recubrimiento protector para los cambiadores de calor mediante soldadura. El espesor de las láminas de aleación se encuentran entre 1.6 a 3.2 mm (1/16 a 1/8 pulg). Las láminas pueden ser unidas a la placa base mediante dos tipos de soldadura.

Por medio de láminas soldadas en los extremos. Cintas de 914 a 1524 mm (36 a 60 pulg) de longitud por 76 a 152 mm (3 a 6 pulg) de ancho, dependiendo de la temperatura de servicio se emplean de la siguiente manera, las más angostas se utilizan para temperaturas altas uniéndose a la pared del cambiador con soldadura continua alrededor de los extremos.

La soldadura entre las cintas oscila entre 6 a 13 mm (1/4 a 1/2 pulg) de ancho. El metal de la soldadura de relleno, deberá ser de la misma composición química del material de recubrimiento.

El segundo método es mediante láminas punteadas, donde las láminas se unen a la pared del cambiador de calor por medio de soldadura de resistencia por puntos sobre un espaciamiento cuadrado de 38 x 38 mm (1.5 x 1.5 pulg) para temperaturas de hasta 427 °C (800 °F). Para temperaturas mayores serán de 38x25.4 mm (1.5x1 pulg).

La ventaja de este tipo de soldadura es que existe una unión entre el metal base del cambiador de calor y el material de recubrimiento.

Debido a que el material de recubrimiento tiene un coeficiente de expansión térmica diferente a la del metal base, el recubrimiento podrá deformarse bajo las condiciones de temperaturas de operación. De esta manera se evitará que el metal de recubrimiento se deforme y la sección del recubrimiento se comportará elásticamente.

4.2.5 Placa de choque

La placa de choque es un elemento que se instala para la protección contra la erosión que se pudiera ocasionar debido a la incidencia de los fluidos a alta velocidad, como puede ser fluidos que contengan partículas sólidas en suspensión o mezclas de líquido-vapor, estos elementos protegen a los tubos de transferencia que se encuentran ubicados debajo de la proyección de la boquilla de entrada.

Las condiciones para las cuales es necesario el empleo de las placas de choque son las siguientes:

- ❖ $\rho V^2 > 2250 \text{ kg/m} - \text{s}^2 (1500 \text{ lb/pies} - \text{s}^2)$ para fluidos de una sola fase, no corrosivos y no abrasivos.

- ❖ $\rho V^2 < 750 \text{kg/m} - \text{s}^2 (500 \text{lb/ pie} - \text{s}^2)$ para fluidos de dos fases, incluyendo líquidos en punto de ebullición.
- ❖ Para gases y vapores, incluyendo vapores saturados y mezclas de vapores.

Donde se tiene que: ρ = densidad del fluido a la entrada kg/m^3 (lb/pie^3)

V = velocidad de fluido a la entrada m/s (pie/s)

Para ninguno de los casos el valor de ρV^2 podrá ser mayor de $6000 \text{kg/m} - \text{s}^2$ ($4000 \text{lb/pie} - \text{s}^2$), por problemas de vibración, debiendo reducir el valor del producto, mediante el incremento del diámetro de la boquilla de entrada.

Las placas de choque podrán ser circulares o rectangulares, con curvatura o plana, debiéndose cubrir como mínimo una proyección de 1.25 veces el diámetro interior de la boquilla y localizada frente a la boquilla, a una distancia igual a 0.25 veces el diámetro interior de la boquilla.

Quando no es conveniente o necesario el empleo de placas de choque, se emplean domos de distribución o cinturones de distribución, donde el envolvente realiza a la vez la función de placa de choque reduciendo la velocidad del fluido.

4.3 Recubrimientos no metálicos

Se puede incluir dentro de éstos las pinturas, barnices, lacas, resinas naturales o sintéticas. Grasas, ceras y aceites, empleados durante el almacenamiento o transporte de materiales metálicos ya manufacturados y que proporcionan una protección temporal.

4.3.1 Recubrimientos orgánicos

Los recubrimientos orgánicos pueden ser utilizados para la protección de algún elemento de los cambiadores de calor, principalmente contra aguas muy agresivas, pero en menor grado contra corrientes de proceso corrosivas.

El recubrimiento de resina epóxica es aplicado a canales y algunas veces a espejos de enfriadores y condensadores operando con agua de mar o salobre. En el caso de tubos, estos podrán ser recubiertos interna o externamente mediante resina fenólica o epoxifenólica.

Se aplica en varias capas, endureciendo mediante temperatura cada capa; cuando el espesor requerido y acabado se alcanzan, se le da un cocido final a alta temperatura cerca de 200°C (392°F). Las resinas epóxicas pueden ser usadas hasta 70°C (158 °F), y resinas fenólicas hasta 80°C (176 °F) en servicio húmedos y 120°C (248 °F) en ambientes secos.

4.3.2 Inhibidores de la corrosión

Los inhibidores son sustancias químicas que protegen al metal contra el ataque electroquímico de soluciones agresivas.

Son usados ampliamente por la industria para modificar el comportamiento de las aguas, a efecto de tener un mejor control de la corrosión.

El comportamiento de los inhibidores puede ser muchas veces peligroso, ya que en función de la concentración o de las circunstancias, pueden jugar tanto el papel de inhibidores como de estimuladores de la corrosión. Los hay de dos tipos, aunque a veces se utiliza una combinación de ambos:

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

- Inhibidores anódicos- hidróxido sódico, carbonato, silicato y barato de sodio, ciertos fostatos, cromato sódico, nitrito y benzoato de sodio, entre otros.
- Inhibidores catódicos- sulfato de zinc, sulfato de magnesio y bicarbonato de calcio, entre otros.

El empleo de los inhibidores de la corrosión, entra dentro del control de ésta por modificación del medio ambiente. Los ambientes más comunes asociados con la corrosión son de tres tipos: aguas, la atmósfera y los suelos.

La disolución del acero en aguas de pH neutro tiene lugar en ánodos asociados con defectos en la capa superficial del óxido formado sobre el acero. En cambio, la reacción catódica puede ocurrir en cualquier lugar de la superficie. La combinación de ánodos muy pequeños y una gran superficie catódica, conduce a la llamada corrosión localizada (picaduras). Los inhibidores anódicos actúan formando un compuesto insoluble (óxido férrico), el cual precipita en los lugares anódicos, evitando la reacción anódica y de este modo inhibiendo más la corrosión.

En cambio, los inhibidores catódicos actúan sobre toda la superficie y son menos eficaces. Reducen la corrosión mediante la formación de una capa o película de alta resistencia eléctrica que funciona como una barrera para la corriente de corrosión.

Uno de los principales problemas de los inhibidores anódicos es que tienen que estar presentes en una concentración suficiente, con el objeto de asegurar que cualquier posible defecto en la película de óxido será cubierto, ya que, de lo contrario puede ocurrir una corrosión por picaduras (localizadas) muy intensas.

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

Este riesgo se puede minimizar utilizando los llamados sistemas de inhibidores de efecto sinérgico, que son básicamente mezclas de inhibidores anódicos y catódicos. El constituyente catódico disminuye la velocidad de corrosión y así permite al constituyente anódico "sellar" la capa de óxido con una concentración mucho menor que si estuviera actuando solo.

Para el control de corrosión de la corrosión de aguas los inhibidores son de este tipo por ejemplo el sistema cromato/polifosfato de zinc.

En los medios ácidos, los cuales disuelven la película superficial protectora de óxido formada sobre el acero, se emplean los llamados inhibidores de adsorción específica –moléculas orgánicas- que aíslan al metal del medio ácido, protegiendo la superficie por adsorción. Algunos inhibidores de adsorción actúan predominantemente sobre la reacción anódica, mientras otros lo hacen sobre la catódica.

Hay que tener muy presente cuando se emplean estos inhibidores que los procesos de adsorción, muy a menudo son muy específicos y están afectados por muchos factores, como la temperatura, la velocidad de flujo del medio y las impurezas presentes en la superficie metálica. Todos estos factores deben ser evaluados cuidadosamente, antes de recomendar el uso de un inhibidor de adsorción.

En el caso del agua hay que tener en cuenta todos los aspectos de la composición de ésta. Todas las aguas que están en contacto con metales, tanto en los procesos industriales como de otra naturaleza, provienen sea del agua de mar, sea del agua de lluvia. Por tanto, puede haber una gran variación en su composición química.

El principal método de tratamiento de aguas para control de la corrosión es la eliminación del oxígeno disuelto, junto con la adición de inhibidores. La presencia de oxígeno disuelto en el agua acelera la reacción catódica y, de este modo, la velocidad de corrosión aumenta en proporción a la cantidad de oxígeno disponible en el cátodo.

4.3.3 Pintura

Las superficies externas que se han fabricado en aceros al carbono de los cambiadores de calor, con la excepción de la cara de asentamiento de empaques en las bridas, se deberán pintar con un recubrimiento primario anticorrosivo, después que se han realizado todas las pruebas requeridas.

Para preparar la superficie se debe realizar una limpieza con chorro de arena. Las superficies que se deberán pintar deben de estar libres de óxido, escamas de laminación, restos de soldadura o escoria, grasas, aceites y cualquier otra sustancia extraña que pudiera perjudicar la adherencia de la pintura.

El tipo de pintura que se utilizará será primario de zinc 100% inorgánico tipo postcurado o autocurante. Se deberá aplicar en el momento en que las condiciones ambientales tengan como mínimo lo siguiente:

- Una temperatura ambiente mayor de 4°C (40°F) y menor de 43°C (110°F).
- Una humedad relativa menor de 60% aún para la temperatura antes referida.
- Las condiciones de viento y polvo no sean extremas, o que se realicen operaciones de limpieza con chorro de arena cerca del lugar de aplicación de la pintura.
- La temperatura del metal no debe estar próxima al punto de rocío del aire.
- Las superficies deberán pintarse el mismo día de la preparación de la superficie.

Se debe cuidar que la capa de pintura no presente reblandecimiento, ampollas, cuarteaduras o pérdidas de adhesión.

4.3.4 Recubrimientos cerámicos

Los metales han sido y son hasta el momento considerados como los materiales de ingeniería más importantes, sin embargo, es muy importante hacer notar que los materiales cerámicos son actualmente más abundantes y los más ampliamente usados.

Un material cerámico es un compuesto inorgánico que consiste en un metal (o semimetal) y uno o más no metales. Las propiedades generales de los productos cerámicos que los hacen útiles como productos de ingeniería son alta dureza, buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico, estabilidad química y altas temperaturas de fusión, así como una alta resistencia a la corrosión. Están integrados por silicatos, nitruros, carburos, óxidos, carbonatos, entre otros como el molibdeno, tungsteno, columbio y el tantalio. Los materiales cerámicos empleados para los tubos de transferencia de los cambiadores de calor son los siguientes:

Grafito. Es empleado en diseños especiales de cambiadores de calor, sometidos a severas condiciones de servicio. Posee una excelente resistencia al ataque de una amplia variedad de sustancias químicas, orgánicas e inorgánicas. En general, solamente aquellas sustancias que exhiben características fuertemente oxidantes, tal como el ácido nítrico, ácido sulfúrico concentrado y cloro húmedo, no pueden ser manejados. Por ejemplo, en aplicaciones con químicos inorgánicos se tiene el calentamiento de ácidos en el desoxidado y tratamiento de metales (formación de capas protectoras y baños anodizantes), calentamiento y enfriamiento de ácido clorhídrico, sulfúrico y fosfórico.

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

Los cambiadores de calor de grafito son también empleados como hervidores y condensadores en la destilación por evaporación de ácido clorhídrico y en la concentración de ácido sulfúrico débil.

La principal limitación en la aplicación de equipos de grafito estriba en las resinas sintéticas utilizadas en la sintetización del grafito. Una descomposición ocurre a temperaturas mayores a 180 °C (356 °F), y este es el límite superior al cual el grafito puede generalmente ser expuesto. Disminuir el límite de máxima temperatura, es necesario cuando el grafito está en contacto con ciertas sustancias corrosivas con características de solventes.

Las resinas sintéticas empleadas en la compactación del grafito, son atacadas por varios solventes orgánicos. Sin embargo, se dispone de una variedad de resinas furánicas, las cuales son más resistentes a los solventes orgánicos. Cambiadores impregnados con estas resinas son adecuados en la industria de la química orgánica. En adición a la resistencia a la corrosión, el grafito no origina ninguna contaminación del fluido, lo que es muy importante en equipos para la industria alimentaria y farmacéutica.

Carbón sinterizado y de electrografito. El electrografito se diferencia mucho del carbón sinterizado ya que es bastante blando y puede trabajarse con más precisión.

Presenta una muy buena conductividad térmica, que es mayor que la de la mayor parte de los metales que se utilizan, y es el utilizado cuando se requiere disipar calor a través de la pared. En cuanto a la insensibilidad a los cambios bruscos de temperatura, el electrografito no es inferior al carbón sinterizado.

CAPÍTULO 4 PROCEDIMIENTOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN

Ambos se presentan en el mercado en bloques y placas de diferentes dimensiones. Los materiales también se venden en forma cilíndrica o esféricas, al igual que los materiales cerámicos. Además de las placas y bloques se preparan también barras con diferentes perfiles, tubos y cilindros macizos y huecos de gran tamaño hasta de más de 1000 mm de diámetro.

Los productos de carbón artificial son empleados como revestimiento de recipientes y como materiales para la construcción de diversos aparatos químicos. Debido a su elevado precio en comparación con las placas cerámicas, se emplean sólo como revestimientos de recipientes cuando se satisfagan las condiciones presentes.

En relación con el desgaste químico los carbones artificiales aventajan a los materiales cerámicos sobre todo por su estabilidad frente al ácido fluorhídrico y álcalis. Esta última característica es muy importante cuando se utilizan alternativamente ácidos y álcalis, de forma que no se pueden emplear ni recipientes de acero ni revestimientos cerámicos.

La ventaja de los aparatos construidos exclusivamente de material de carbono sería su buena ductilidad. En los recipientes de acero se pueden efectuar fácilmente transformaciones posteriores, como el montaje de injertos adicionales.

El electrografito impregnado con resinas sintéticas se utiliza sobre todo en la construcción de cambiadores de calor, bombas, válvulas, tuberías, etc. La conductividad térmica del electrografito es unas cinco veces mayor que la de los aceros especiales, se consigue una buena transmisión de calor en los cambiadores de calor grafitados.

El programa de los diferentes fabricantes comprende aparatos de haces de tubos, cambiadores de calor de placas y de bloque, así como otros tipos de cambiadores de calor.

4.4 Protección contra la corrosión galvánica

Como un medio de protección contra la corrosión galvánica, se deberá instalar ánodos de magnesio de 203x102x203 mm (8x4x8 pulg), uno por compartimento, y que se encontrarán bajo las siguientes condiciones:

- Cuando se utilice agua como un medio de enfriamiento o cualquier fluido que presente características electrolíticas.
- Si el espejo y los tubos de transferencia son de un material diferente al del canal.
- Si el diámetro interior del canal es de 406 mm (16 pulg) o mayores.
- Si la profundidad del canal es 356 mm (14 pulg) o mayor.
- Si la altura del compartimento del canal es 203 mm (8 pulg).

Es preferible instalar los ánodos sobre las placas divisoras, sin afectar el área de flujo requerido para la circulación del fluido. De esta manera, las uniones realizadas entre el material base y los recubrimientos en la superficie para asiento de empaques en contacto con el agua de enfriamiento o de cualquier otro fluido con características electrolíticas, deberán ser protegidas de la corrosión galvánica aplicando un recubrimiento con resina epóxica sobre las uniones.

4.5 Pasivado de cambiadores de calor de acero al carbono para manejo de agua de enfriamiento

El agua de enfriamiento de cambiadores de calor que generalmente se emplea por el lado de tubos, origina que el acero al carbono esté sujeto a corrosión y se formen depósitos sobre la superficie de los tubos. Esto puede evitarse o disminuir mediante la utilización de tratamientos adecuados que garanticen un mayor tiempo de operación y una eficiente transferencia de calor. De esta manera se puede controlar la corrosión mediante la formación de una película inhibidora de la corrosión en la superficie del metal.

Generalmente, la superficie metálica contiene grasa, aceite, rebabas, como resultado de la fabricación. Estos contaminantes deberán ser removidos antes de la formación de la película protectora. El tratamiento para la formación de la película protectora consta de dos pasos:

- ❖ Limpieza de la superficie metálica.
- ❖ Pasivado de la superficie con un inhibidor químico de la corrosión.

Antes de poner en operación un cambiador de calor, generalmente es limpiado con chorro de agua para remover materiales extraños en su superficie. Pero pueden existir incrustaciones y otros contaminantes adheridos que no son fáciles de eliminar.

Ya que se ha limpiado se le agrega al agua de enfriamiento un inhibidor de la corrosión con una determinada concentración para establecer la protección contra la corrosión.

La experiencia ha demostrado que los métodos de limpieza utilizados son insuficientes y no es posible que la película protectora sea aplicada uniformemente, pudiendo ocasionar un ataque localizado por picadura al tener una película no uniforme.

Este método es empleado en las refinerías, pero con el fin de eliminar los problemas por corrosión en tubos de acero al carbono es muy común el uso de tubos de admiralty y bronce naval aunque su costo es considerablemente mayor, sin embargo, se tiene una excelente resistencia a la corrosión en agua de enfriamiento.

4.5.1 Tratamiento por recirculación.

El tratamiento mediante recirculación requiere de un tanque de calentamiento de la solución y una bomba de circulación. Después de la instalación del cambiador de calor, éste se debe limpiar mediante chorro de agua, por un tiempo aproximado de 15 minutos, utilizando agua de enfriamiento o agua de servicio.

Se debe preparar la solución para limpieza del tanque y calentador entre un rango de 54 a 57°C (130 a 170°F); determinando la cantidad de sustancia química (PO_4^{3-}) para tener una concentración de 10000ppm o 1% en la solución de limpieza. Se ajusta el pH de la solución a un valor de 6.0 a 7.0, prácticamente la limpieza con polifosfato es más efectiva. Después de drenar el cambiador de calor y el tanque para eliminar la solución de limpieza, se prepara la solución de pasivado con cromato de zinc y se calienta en un rango de 54 a 57°C (130 a 170°F), determinando la cantidad de sustancia química (CrO_4^{2-}) requerida para obtener una solución de pasivado con una concentración de 1 000 ppm que se deberá circular por un mínimo de 2 horas.

Ya realizado lo anterior el cambiador de calor está listo para entrar en operación. Si éste no va ser utilizado durante un tiempo se deberá sellar el cambiador lleno con solución de pasivado como medida de seguridad para evitar la corrosión; en el momento que sea puesto en servicio, se drenará la solución y se conectará al sistema.

4.5.2 Tratamiento por agitación.

Se puede emplear el sistema por agitación con aire y vapor sobrecalentado cuando no se dispone del sistema de circulación. Este procedimiento comienza con una limpieza del cambiador de calor con agua de enfriamiento durante 15 minutos, después se prepara la solución de limpieza con polifosfato y se bombea dentro del cambiador de calor. Un depósito de 200 litros es ideal para preparar la solución y llenar el cambiador de calor usando una bomba neumática o manual.

El cambiador deberá ser venteado y llenado rápidamente con agua fría y promover la mezcla con el limpiador.

Comenzar la inyección a baja presión y aire comprimido, para calentar y agitar la solución limpiadora manteniendo la temperatura de la solución en un rango de 54 a 77°C (130 a 170°F), mediante la inyección intermitente de vapor un mínimo de 4 horas, drenar el cambiador para el pasivado.

Bompear la solución con el inhibidor de corrosión basado en cromato de zinc dentro del cambiador de calor promoviendo rápidamente la mezcla, comenzar la inyección de vapor a baja presión y agitar con aire comprimido, mantener la solución con inhibidor de la corrosión a una temperatura de 54 a 77°C (130 a 170°F) durante 2 horas.

CAPÍTULO 5 SERVICIOS COMUNES

5.1 Servicios no corrosivos

El acero al carbono es el material más utilizado de acuerdo a su alta resistencia y bajo costo, para los servicios con fluidos no corrosivos o que poseen un bajo grado de corrosión.

El empleo de los aceros al carbono y de baja aleación para temperaturas muy bajas no son recomendados debido a la fragilidad que presentan, los materiales como los aceros inoxidables austeníticos (serie 300), metales no ferrosos como las aleaciones de aluminio son más utilizados a temperaturas muy bajas (criogenia) que van de -267 a -101 °C (-450 a -150 °F), debido a que no muestran pérdida de resistencia al impacto a muy bajas temperaturas.

Debido al desempeño satisfactorio de las pruebas realizadas a bajas temperaturas de -101 a 0 °C (-150 a 32 °F), se recomienda el empleo de aceros de baja aleación y de aceros al carbono con microestructura de grano fino. Para el rango de temperaturas intermedias que van de 1 a 426 °C (33 a 800 °F), el material empleado es el acero al carbono debido a la buena resistencia a la corrosión.

La estructura del acero al carbono por arriba de 426 °C (800 °F), regresa a sus dimensiones iniciales cuando las cargas aplicadas son retiradas y el esfuerzo máximo a la tensión se encuentra por debajo del punto de fluencia. Para servicios a temperaturas elevadas por arriba de los 426 °C (800 °F) es un problema muy complejo debido a que se generan cambios notables en las propiedades mecánicas de los materiales que comienzan a darse debido a la composición química y al tamaño de grano.

Para temperaturas intermedias y bajas se prefiere el manejo de un grano fino, debido a que se genera una alta resistencia a la tensión, a la fatiga y al impacto, mejorando la resistencia a la corrosión. Para la operación a elevadas temperaturas, el principal requerimiento es tener una alta resistencia a la ruptura por deformación plástica por lo que es preferible tener una microestructura de grano grueso.

Para que los materiales de construcción empleados en los servicios no corrosivos tengan un buen desempeño se tiene que llevar a cabo lo siguiente:

1. Deben ser evaluados aquellos aceros que estén operando a temperaturas por debajo de $-254\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-425\text{ }^{\circ}\text{F}$), como son los inoxidables tipo 304, 304L y 347, al igual que los aceros con contenido de níquel de 36%.
2. Se debe determinar la temperatura límite de diseño mediante el comportamiento del metal en el ambiente al cual esté expuesto, así como mediante sus propiedades mecánicas correspondientes.
3. Los materiales para accesorios estructurales, tales como silletas, que van soldados directamente a partes que se encuentran sometidas a presión y transmiten cargas durante la operación, deben ser del mismo grado que las partes a presión. Todos los accesorios que van directamente soldados en aceros que contienen 9% de níquel, deben ser del mismo material o de un acero inoxidable austenítico que no sea endurecible mediante tratamiento térmico.
4. Si el acero SA 36 es utilizado a bajas temperaturas por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (32°F), debe tener una microestructura de grano fino.

5.2 Servicios a bajas temperaturas.

La fragilización es el principal problema que se enfrenta en los servicios a bajas temperaturas, ya que los materiales seleccionados para la construcción de equipos deben presentar características mecánicas adecuadas debido a que estas cambian cuando son sometidos a bajas temperaturas. Por tal motivo, es necesario tomar muestras de los materiales que se utilizarán para la fabricación de los componentes del equipo y continuar con la realización de las pruebas de impacto charpy.

El ensayo de impacto charpy no contempla solamente la cuestión de los esfuerzos inducidos, sino también considera la transferencia, absorción y disipación de la energía.

La energía de un golpe sobre un elemento del equipo o directamente sobre el equipo puede observarse de varias maneras:

- A través de la deformación elástica de las partes de un sistema.
- A través de las deformaciones plásticas de las partes.
- A través de la fricción entre las partes.

La siguiente descripción del ensayo de impacto Charpy se basa en los requerimientos de la ASTM E-23; el péndulo consiste en una barra ligera y rígida, situándose un pesado disco en el extremo, el péndulo está suspendido de una flecha corta que gira en rodamientos de balines y se balancea hasta la mitad de la distancia entre dos postes verticales, cerca de la base están los soportes o yunques de las probetas. El percutor está ligeramente redondeado y debe alinearse de modo tal que establezca contacto con la probeta contra su peralte total en el instante del impacto.

La probeta estándar para ensayos de flexión es una pieza de 10x10x50 mm ranurada, en varias especificaciones comerciales se requiere una ranura en forma de ojo de cerradura o de U.

La probeta se carga como una viga simple, se coloca horizontalmente entre los dos yunques, de modo que el percutor golpee el lado opuesto de la ranura a la mitad del claro.

El péndulo es elevado hasta su posición más alta y sostenido por un tope ajustado para dar una altura de caída constante para todos los ensayos; luego se le suelta y permite caer y fracturar la probeta. En su movimiento ascendente el péndulo lleva el indicador de fricción sobre una escala semicircular graduada en grados o pie-libras.

Los ensayos de impacto Charpy para determinar la resistencia al impacto de los metales a bajas temperaturas son comúnmente realizados sumergiendo las probetas en algún líquido fresco en una vasija de boca ancha con 1plg de líquido arriba y debajo de las probetas.

Para temperaturas desde la ambiente hasta $-78.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (-109°F), este líquido es usualmente alcohol o acetona, enfriado a la temperatura deseada mediante la adición de pequeños trozos de hielo seco, aunque para temperaturas más bajas se utiliza el nitrógeno líquido en cuyo caso el líquido para la inmersión sería alcohol, isopentano, o el mismo nitrógeno líquido. Los termómetros adecuados para determinar la temperatura del enfriador son del tipo mercurial o del tipo de pentano para temperaturas más bajas.

Las probetas deben mantenerse a una temperatura por 15 minutos y la temperatura del baño debe mantenerse constante dentro de $+0, -19.4^{\circ}\text{C}$ (-3°F) durante los últimos 5 minutos del ensayo, el ensayo debe completarse dentro de 5 segundos después de retirar la probeta del enfriador.

Para poder calcular la resistencia al impacto o energía absorbida al romper la probeta es igual a la diferencia entre la energía del péndulo antes y después del impacto. La diferencia de energía es una función de la disminución de la velocidad de rotación y puede determinarse por el peso y la altura de la caída del péndulo antes del impacto y la altura de elevación después.

Las pruebas de impacto realizadas antes de comenzar la construcción de los equipos proporcionan la tenacidad más baja o mínima que pueden tener los materiales con diferentes puntos de fluencia para evitar que ocurra una falla por la temperatura a la que se encuentre en operación y en conjunto con pequeños concentradores de esfuerzos que se formen al realizar las uniones de cada parte integrante del equipo, de esta manera se podrá establecer los límites de aplicación de ciertos materiales para operar a una temperatura específica de diseño, ya que sería extremadamente peligroso emplear un material por debajo de su temperatura de transición ya que no absorbería la energía de un impacto sin llegar a fracturarse.

En general, los materiales tienen mayor tenacidad en altas temperaturas que en bajas, de hecho, existe una brusca disminución de tenacidad en muchos aceros cuando éstos son enfriados por debajo de la temperatura ambiente. La temperatura a la cual ocurre este brusco decremento se llama temperatura de transición, que es la temperatura a la cual un material cambia de un comportamiento dúctil a uno frágil.

La composición química del acero también tiene una gran influencia sobre la temperatura de transición, por ejemplo, incrementando el contenido de manganeso tiende a reducirse la temperatura de transición, también tiene buen control de los sulfuros.

El molibdeno minimiza la fragilización, el níquel es empleado para aumentar la tenacidad del acero y la combinación del níquel con el molibdeno contribuyen a mejorar la templabilidad, de tal manera que un acero con 2.5%Ni es adecuado hasta -60°C (-75°F), un acero con 3.5%Ni hasta -101°C (-150°F), un acero con 5%Ni hasta -128°C (-200°F) y un acero con 9%Ni hasta -196°C (-320°F).

Un factor importante para la selección de aceros es el de cuidar el contenido de carbono debido a que la resistencia al impacto se afecta al incrementarse éste. A continuación se darán algunas recomendaciones para aceros al carbono.

1. Un alto contenido de carbono aumenta la dureza pero disminuye la resistencia en áreas de concentración de esfuerzos. Esto se debe a que por cada incremento de 0.01 % en el contenido de carbono, se tendrá un incremento de 2.8°C (5°F) de la temperatura de transición.
2. Es recomendable el empleo de materiales con microestructuras de grano fino, que se pueden obtener mediante la adición de pequeñas cantidades de aluminio.
3. En los aceros rolados en caliente se producen microestructuras con grano grueso, por lo que es necesario que todo lo que se fabrique con este tipo de proceso se someta a un normalizado.

4. La adición de manganeso hasta en 1.5 %, reduce la temperatura de transición en la prueba de impacto Charpy en $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($10\text{ }^{\circ}\text{F}$) por cada incremento de 0.1% de Mn. De esta manera, al incrementar el contenido de manganeso se puede aumentar el contenido de carbono, por lo tanto, el material resistirá una menor temperatura con la misma energía de impacto absorbida.
5. Al añadir suficiente níquel, la temperatura de transición casi desaparece por lo que es posible conservar la tenacidad hasta temperaturas muy bajas.

5.3 Servicios a altas temperaturas

Debido a un incremento de temperatura, cualquier material comenzará a perder resistencia, por lo que su deformación comenzará a ser plástica, se observará la aparición de fractura bajo la acción de fuerzas, fatiga y cambios en las fases de las aleaciones y que causarán cambios en las propiedades mecánicas en los materiales.

Debido a la deformación plástica generada, el criterio para el diseño a una temperatura particular de trabajo se basa en la resistencia a la fluencia o a la termofluencia (Creep) en un intervalo determinado de tiempo.

Estos se observan comúnmente en ambientes gaseosos, como son: hidrógeno, oxígeno, vapor de agua, monóxido de carbono, metano, compuestos de azufre, cloro, cloruro de hidrógeno, entre otros.

Para la construcción de cambiadores de calor, los aceros de baja aleación al cromo-molibdeno (hasta 3%Cr – 1%Mo) y aceros de media aleación (hasta 9% Cr – 1% Mo), pueden ser usados hasta una temperatura de $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1200\text{ }^{\circ}\text{F}$), cuando es necesaria una resistencia a la grafitización o al ataque por hidrógeno.

Estos aceros poseen mejores cualidades a la ruptura por termofluencia que los aceros al carbono y son una opción económica para equipos sujetos a altas presiones y temperaturas superiores a las 343 °C (650 °F), además tienen una excelente resistencia a la corrosión.

Los aceros inoxidables austeníticos son una alternativa para temperaturas del orden de 650 a 815 °C (1200 a 1500 °F), un decremento en la resistencia a la oxidación limita su utilidad arriba de estas temperaturas. Para temperaturas arriba de 815 °C (1500 °F), se requieren aleaciones especiales, tales como: aceros inoxidables del tipo 310 e incoloy.

Debido a las temperaturas elevadas se originan cambios de fase en una aleación; por ejemplo, si se forman carburos y estos cambian de forma o se disuelven pueden debilitarla, además puede formarse nuevas fases como la sigma, que es un ejemplo de la reacción de temperaturas elevadas en una aleación y que puede causar fragilización.

Los constituyentes de la fase sigma son generalmente frágiles y contienen un alto porcentaje de elementos de transición como el vanadio o cromo, además de magnesio, hierro, cobalto y níquel.

La formación de la fase sigma puede ocasionar daños en aleaciones de níquel si se tiene una temperatura entre 760 y 927 °C (1400 y 1700 °F). En aceros inoxidables ferríticos ocurre la formación de esta fase con mayor facilidad. Por ejemplo, en el acero inoxidable 430 se forma más rápido que en un acero inoxidable austenítico. La temperatura de formación de la fase sigma en aceros inoxidables está entre 595 y 870 °C (1103 y 1598 °F).

Los constituyentes de la fase sigma son generalmente frágiles, contienen un alto porcentaje de elementos de transición como el cromo, además de manganeso, hierro, cobalto y níquel. En los aceros inoxidable austeníticos ocurre más lentamente la aparición de ésta fase debido a que también presentan regiones ferríticas.

La aparición de ésta fase origina una disminución de la ductilidad y para poder evitarse es necesario emplear un alto contenido de níquel, evitar emplear aceros inoxidable ferríticos y usar austeníticos, y si se manejan fluidos corrosivos, se debe asegurar el empleo de una aleación en la que no se precipiten carburos durante los servicios a altas temperaturas.

5.4 Servicios con agua de enfriamiento

El principal medio de enfriamiento utilizado en las plantas de proceso es el agua debido a la relativa facilidad de conseguirla, ya que puede obtenerse de los ríos, lagos o pozos. La corrosividad del agua depende de factores tales como minerales disueltos, acidez o alcalinidad, también puede ser por presencia de oxígeno disuelto, la velocidad del flujo, temperatura y condiciones ambientales.

Por lo anterior, el manejo de agua de enfriamiento puede generar depósitos en algunos elementos constitutivos de los cambiadores de calor. Estos depósitos son incrustaciones y lodos que aparecen aún cuando se le da un tratamiento para su empleo.

Las incrustaciones que se forman son sales precipitadas debido a la disminución de la solubilidad de éstas en el agua, como son: carbonato de calcio, sulfato de calcio y silicatos, como se puede apreciar en las figuras 5.1 y 5.2.

Usualmente se llevan a cabo tratamientos relativos al control de pH, que normalmente se realizan adicionando ácido sulfúrico al agua con el fin de neutralizar la alcalinidad y bajar el nivel de pH, permitiendo también un aumento en la solubilidad de sales duras.



Figura 5.1 Fotografía de una tubería bastante reducida por la incrustación.



Figura 5.2 Pedazo de incrustación retirada del tubo de gas de un condensador de evaporación.

Los lodos son formados en el agua debido a los sólidos en suspensión como son: arena, arcilla, aceites y materia microbiológicas (algas y limo), pueden introducirse al sistema, principalmente en las torres de enfriamiento donde tienden a sedimentarse en las áreas de bajo flujo como en la base de las torres de enfriamiento, en tubos de cambiadores de calor y en las cajas enfriadoras.

El agua de enfriamiento se maneja generalmente del lado de tubos debido a que si se maneja por el lado de envolvente se generan bajas velocidades que causan un rápido asentamiento de precipitados por lo general en las partes adyacentes de las mamparas.

Es por eso que se emplean boquillas para limpieza química, permitiendo eliminar los residuos que se concentran principalmente en los tubos de transferencia para poder evitar la corrosión por picadura.

Debido a que los depósitos que se forman aceleran la corrosión, reducen el área de flujo del sistema y a la vez pueden actuar como aislantes reduciendo el coeficiente de transferencia de calor, viéndose reflejado por el incremento de los costos de operación, es necesario el empleo de materiales que resistan este efecto debido a que el metal perdido a través de la corrosión forma depósitos adicionales que, al mismo tiempo, crean nuevas células diferenciales y que resultan en más corrosión, generándose una corrosión muy rápida que puede implicar la perforación completa del metal, como se muestra en la figura 5.3.

Se recomienda emplear aleaciones de cobre como los almiralties (70 a 73% Cu) inhibidos, y en caso de altas temperaturas, se recomienda aleaciones cobre-níquel.

No es recomendable el uso del acero al carbono debido a la facilidad de aparición de corrosión causada por efecto galvánico entre el agua de enfriamiento y la superficie metálica en la parte inferior del depósito, formándose una celda diferencial entre la parte superior del depósito con un nivel alto de concentración de oxígeno.



Figura 5.3 Formación de corrosión por picadura debido a depósitos porosos.

Para prevenir los daños ocasionados por la corrosión se recomienda:

- La eliminación del oxígeno y del anhídrido carbónico mediante un desgasificador.
- La neutralización del oxígeno restante por medio de un agente desoxigenador.
- La neutralización de la acidez mediante métodos químicos, aumentando el pH del agua.
- La acidez del agua determina la velocidad de ataque, mientras que el contenido de oxígeno o anhídrido carbónico fija el alcance de este ataque.

5.5 Servicios con hidrógeno

Los daños causados por el hidrógeno pueden producir un deterioro en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de cambiadores de calor, debido a las diferentes temperaturas y presiones en la que se presenta el hidrógeno, como se aprecia en la figura 5.4.



Figura 5.4 Muestras de materiales que han sufrido ataque de hidrógeno

El problema principal por presencia de hidrógeno es la disminución de tenacidad en numerosas aplicaciones, tanto en aleaciones ferrosas como no ferrosas. La interacción inicial puede provenir tanto de los procesos de fabricación como de los procesos de uso de servicio. Esta caída de tenacidad es fuente de grandes perjuicios económicos, por lo que es de gran interés su estudio para las industrias químicas, petroquímicas y sistemas de generación de energía.

A altas temperaturas, el hidrógeno puede atacar de dos formas a los aceros al carbono y de baja aleación, ya que el contenido de carbono es el determinante de la resistencia máxima y la dureza:

1. Descarburización de la superficie. Se origina por la combinación de altas temperaturas y presiones bajas de hidrógeno, produciéndose fisuras en la superficie de los materiales y a la vez un adelgazamiento, reducción localizada en la resistencia y dureza, incrementándose la ductilidad.
2. Descarburización interna. Se debe a la combinación de bajas temperaturas que están por encima de 221 °C (430 °F) y altas presiones de hidrógeno, produciéndose fisuras en el metal.



Esto se origina por la penetración del hidrógeno en el acero que genera metano en los límites de grano sin pérdida de material, el metano no se puede difundir fuera del acero por lo que permanece en vacío y genera altos esfuerzos que provocan fisuras, grietas o ampollas. La combinación de agrietarse y de la microdescarburización reduce la dureza a la fractura de los aceros.

Para poder disminuir el ataque de hidrógeno y evitar la descarburización se ha realizado la inclusión de estabilizadores de carburo en los aceros como el cromo o el molibdeno para hacer que el carbono sea más compacto. Al igual que otros elementos como el tungsteno, vanadio, titanio y niobio, reducen el número de sitios de nucleación al formarse carburos más estables que resisten la ruptura por hidrógeno y la reducción de la formación de metano, sin embargo, el inconveniente de la presencia de inclusiones no metálicas incrementa la aparición de fallas por ampollamiento.

El grado de ataque por hidrógeno depende de la temperatura, presión parcial del hidrógeno, tiempo de exposición, nivel de esfuerzos y variables metalúrgicas.

Los aceros inoxidables de la serie 300, tipos 304, 316 y 310, por el contenido de cromo que va de 16 a 26% que los hace muy resistentes al ataque por hidrógeno a elevadas temperaturas.

Hay otros materiales empleados para servicios de hidrógeno como los aceros inoxidables al cromo-molibdeno 1.25Cr-0.5Mo (SA387C), 2Cr-0.5Mo (SA387D), 3Cr-0.5Mo (SA387E), 6Cr-0.5Mo (SA357), al igual que el acero al carbono-molibdeno 0.5Mo (SA204) y el acero al carbono SA516.

También se utilizan otras aleaciones resistentes al ataque por hidrógeno como los aceros con carbono controlado y los de baja aleación, ya que contienen estabilizadores de carburo que resisten la descarburización.

La gráfica de Nelson (curvas del API 941, titulada "Aceros para Servicio en Hidrógeno a Elevadas Temperaturas y Presiones en Refinerías de Petróleo y Plantas Petroquímicas").

Es una carta donde se encuentran marcados los límites de operación para los componentes o elementos construidos de acero al carbono que funcionan en ambientes de hidrógeno, aceros con contenido de molibdeno y aceros con contenido de cromo-molibdeno, el Molibdeno le imparte al acero aproximadamente cuatro veces la resistencia al efecto del hidrógeno, la gráfica se aprecia en la figura 5.5.

La curva punteada en la gráfica, representa la tendencia a la descarburización en la superficie, la curva continua representa la tendencia de aceros a la descarburización interna con agrietamiento debido a la formación de metano. De esta manera, los materiales que se han listado anteriormente no sufren ataque por hidrógeno si la temperatura de operación y la presión parcial del hidrógeno se encuentran sobre, debajo o a la izquierda de la curva asignada a cada tipo de acero.

El daño por ataque de hidrógeno también se puede presentar a bajas temperaturas, ya que también puede penetrar en el acero debido a los diferentes mecanismos de corrosión u operaciones de trabajo del metal como son soldadura o procesos electroquímicos.

A continuación se darán las formas de ataque por hidrógeno a bajas temperaturas en los materiales para construcción de cambiadores de calor:

1. Fragilización por hidrógeno (HE).
2. Agrietamiento debido a esfuerzos por hidrógeno (HSC).
3. Agrietamiento debido a esfuerzos por sulfuro (SSC).
4. Ampollamiento debido al hidrógeno (HBC).
5. Agrietamiento inducido por hidrógeno debido a esfuerzos orientados (SOHIC).

Básicamente estos tipos de ataques dependen mucho de factores como de microestructuras susceptibles, en la cual se tiene como medida preventiva la inclusión de bajas cantidades de azufre (0.006%S máx. y 0.002%S mín.) en el acero, realizándose de forma controlada y no controlada respectivamente para mejorar la resistencia al ataque por HBC y SOHIC.

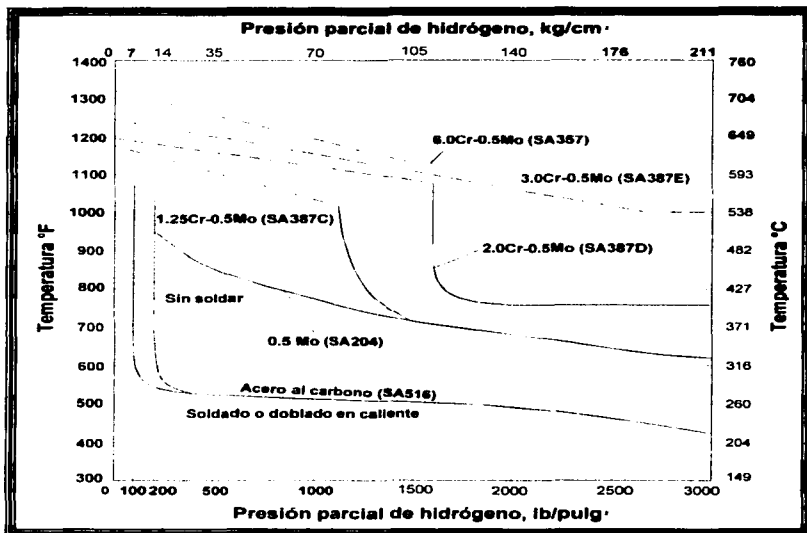


Figura 5.5 Gráfica de Nelson para aceros en servicios de hidrógeno a alta temperatura.

Otro factor importante es sobre los altos esfuerzos residuales donde se ha establecido el mejoramiento en los diseños mecánicos, una adecuada selección de materiales, técnicas de soldadura y tratamientos térmicos post-soldadura para incrementar la resistencia al HSC y SOHIC.

Por último se tiene las reacciones de la corrosión, que son las generadoras de ampollamiento en los aceros debido al hidrógeno (HBC) y que como una forma de prevención se emplea ciertos aceros inoxidable como el tipo 316 que protege contra fluidos corrosivos como sulfuros, amoníaco, cianuros y agua.

5.6 Servicios con agua de mar

La agresividad de un tipo de agua va a depender de su capacidad para poder conducir la corriente eléctrica. En este caso, el agua de mar posee una alta conductividad debido a la gran cantidad de iones presentes, dando por resultado que la actividad de los procesos de corrosión sea muy alta y se produzca en tiempos muy cortos fenómenos muy graves. De manera aproximada, la composición química "tipo" de un agua de mar esta dada por la tabla 5.1.

El efecto que ocasiona sobre cualquier material es diverso debido a la presencia de distintas formas de corrosión como son:

Corrosión general. Cuando la superficie del metal se corroe en una forma uniforme. Es la forma más benigna o menos peligrosa pues el material se va gastando gradualmente extendiéndose en forma homogénea sobre la superficie del metal.

Corrosión por picadura. Las picaduras son una parte localizada de corrosión en la que el ataque esta confinado a muchas cavidades pequeñas en la superficie del metal. Pueden contribuir de manera importante a una falla general, en componentes sujetos a esfuerzos muy altos, dando como consecuencia la falla por corrosión bajo tensión.

Tabla 5.1 Composición química del agua de mar.

Compuesto	Concentración (gramos-litro)	
Cloruro de Sodio	NaCl	27.0
Cloruro de Magnesio	MgCl ₂	3.2
Sulfato de Magnesio	MgCl ₂	1.6
Sulfato de Calcio	CaSO ₄	1.3
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	0.8
Cloruro de Potasio	KCl	0.5
Carbonato de Calcio	CaCO ₃	0.1
Varios(bromuros, fosfatos)		0.5
Total		35.0

Corrosión galvánica. Se puede producir un daño severo por corrosión cuando dos o más metales distintos se acoplan eléctricamente, resultando una diferencia de potencial entre los metales acoplados que causa un flujo de corriente entre ellos. El metal más activo padece una corrosión más acelerada que los miembros menos activos que se retarda o elimina.

Corrosión por hendidura. Es un tipo que se presenta en espacios confinados o hendiduras que se forman cuando los componentes están en contacto estrecho. Para que se presente la corrosión por hendidura, la hendidura debe ser cerrada, con dimensiones menores a un milímetro.

Corrosión bajo esfuerzo. Es una falla corrosiva en la que se forman las grietas de un componente bajo la acción combinada de esfuerzos mecánicos y un medio ambiente agresivo.

Prácticamente las características fisicoquímicas como la salinidad, la temperatura, pH, sales disueltas, oxígeno y bióxido de carbono disueltos, las características biológicas que puedan favorecer más la presencia de flora bacteriana, la velocidad o condiciones de flujo, así como la composición de los ductos se encuentran entre otros factores del agua de mar que genera el deterioro de diversos equipos y sistemas.

El agua de mar, en la proximidad de las costas, puertos y lagunas costeras pueden estar muy contaminadas. Hay que señalar que la velocidad media de corrosión en agua de mar no contaminada es de $0.12 \mu\text{m/año}$. Así, la contaminación desempeña un papel determinante en la agresividad de una determinada agua frente a los metales.

El acero y el acero galvanizado son especialmente atacados en estas condiciones, ocasionándose problemas en todas aquellas estructuras sumergidas que no estén suficientemente protegidas (por ejemplo, con protección catódica). Si bien la corrosión microbiana o bacteriana no es un problema nuevo en los fondos marinos, su incidencia en la falla de muchos sistemas ha crecido debido al aumento de la contaminación en las zonas cercanas a la costa.

5.7 Servicios con ácidos y álcalis

Una parte importante de la aparición de la corrosión es debido a los ácidos, álcalis y sus derivados que la originan debido a que son sustancias muy tóxicas y altamente corrosivas. Un ácido es una sustancia que contiene hidrógeno conjuntamente con un no metal o un radical no metálico, capaz de producir iones de hidrógeno en solución acuosa y un álcali es una sustancia que contiene (en comparación con un ácido) características básicas, se aplica a los hidróxidos de amonio, litio, potasio y sodio.

Por lo general, los álcalis no causan corrosión severa en las aleaciones de níquel, pero suelen causar agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC) en algunas aleaciones. El acero al carbono puede resistir concentraciones mayores al 50% de hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH) sin que se presente un agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos, aunque las temperaturas se deben conservar lo suficientemente bajas para evitar el ataque. Pero a elevadas temperaturas el NaOH puede causar SCC en los aceros al carbono, en aceros inoxidable 304 y 316, aleación 400 (65Ni-32Cu) y aleación 600 (76Ni-15Cr-8Fe).

El níquel es el material más recomendado para equipos que manejan soluciones cáusticas puras. El níquel aleación 200 (99Ni-25Cu) es recomendable para ambientes con soluciones cáusticas a temperaturas por debajo de 316 °C (600 °F) para evitar gratificación y un posible ataque intergranular.

Los aceros inoxidable 304 y 316 presentan agrietamiento en servicios con soluciones cáusticas, por lo que se limitan para el manejo de concentraciones mayores al 50% y temperaturas mayores de 93 °C (199°F).

Los ácidos más comunes empleados en la industria petrolera para la construcción de cambiadores de calor son el ácido sulfúrico, el nítrico, el clorhídrico, fluorhídrico y fosfórico. Para evitar oxidación debido al ataque de ácidos, es recomendable emplear aceros inoxidable debido a que su contenido de cromo forma una capa protectora de óxido haciéndolos resistentes a este ataque.

Las aleaciones de titanio, aleación 400 y níquel 200 son recomendadas únicamente para ambientes de ácido clorhídrico a bajas concentraciones. El acero al carbono se recomienda para ambientes de ácido sulfúrico concentrado en un 78 a 98%, a temperatura ambiente.

**CAPÍTULO 6
FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE
MATERIALES**

6.1 Información requerida

Es evidente que si se hace una correcta selección de los materiales de construcción, ésta influirá mucho en el buen o mal comportamiento de los equipos de proceso. Un mal comportamiento se refleja en pérdidas económicas y causando efectos negativos como la disminución del tiempo de vida por corrosión, pérdidas de eficiencia por ensuciamiento, pérdidas de producto por contaminación, daños a otros equipos, accidentes y altos costos de mantenimiento

De este modo, el ingeniero de materiales debe efectuar una selección donde considere factores como propiedades físicas y mecánicas del material, resistencia a la corrosión, disponibilidad, facilidad de trabajo, entre otros, además de los aspectos económicos, antes que pensar en el material en sí mismo. La selección debería realizarse conforme al material más económico, pero que reúna la combinación de propiedades necesarias para el uso que se le va a dar.

Para realizar una selección óptima de los materiales con los que se construirán los elementos que integran un cambiador de calor es necesario tener los datos que nos proporcionarán los siguientes documentos:

- ◆ Diagrama de flujo de proceso. Es la representación esquemática de cada uno de los equipos de proceso y su interrelación, mostrándose los instrumentos básicos de control de proceso y un cuadro sinóptico de balance de materia y energía.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

- ◆ **Balace de materia y energía.** En este documento se incluyen las condiciones de operación, flujos y composición de las corrientes indicadas en el diagrama de flujo de proceso, conteniendo también la concentración de los componentes de las corrientes.

- ◆ **Información de proceso para el diseño de cambiadores de calor.** Este documento contiene la información de proceso necesaria para efectuar el diseño de cambiadores de calor, indicando número de equipos, condiciones de operación y de diseño, carga térmica, sobrediseño requerido, factores de ensuciamiento y materiales de construcción propuestos, indicando las sustancias corrosivas que existen en las corrientes de proceso.

- ◆ **Hoja de datos de cambiadores de calor.** Aquí están contenidos los resultados del diseño térmico, necesarios para efectuar del diseño mecánico de los cambiadores de calor. Contiene además los materiales propuestos para cada uno de los elementos principales de cambiadores de calor.

- ◆ **Condiciones de operación.** Para tener una correcta evaluación y selección de materiales, la información requerida debe fijarse a las condiciones de operación a las que estará trabajando como son:
 - Características del fluido.
 - Velocidad del fluido.
 - Presión y temperatura.
 - Variación en las condiciones de operación.

6.2 Características del material

Las características de los materiales son fundamentales para poder realizar una buena selección de ellos, ya que debido a las condiciones a las que estarán expuestos ocasionará que pierdan o disminuyan sus propiedades físicas, mecánicas y químicas, originándose una falla durante la operación del equipo.

6.2.1 Propiedades físicas

Para que un material tenga un buen desempeño ante las condiciones de servicio a las que estará expuesto, es necesario establecer que sus propiedades deben tener el comportamiento idóneo para evitar un mal funcionamiento y rendimiento del equipo.

Las propiedades físicas deben ser consideradas también importantes debido a que los materiales no solamente van a operar o funcionar con esfuerzos mecánicos, se debe satisfacer una serie de funciones que garanticen el servicio óptimo como el de conducir o prevenir la conducción, aislamiento de calor, entre otros. En este tipo de propiedades se buscará que el material deseado tenga coeficiente de dilatación o de expansión térmica.

❖ Densidad.

En ingeniería, la densidad de un material es su peso por unidad de volumen, su símbolo es ρ y sus unidades: $g \cdot cm^3$ [lb \cdot pulg³]

Para poder seleccionar un metal para una determinada aplicación, se debe de considerar la densidad y la resistencia, debido a que las dos propiedades se relacionan con frecuencia en la razón de resistencia al peso, en aplicaciones donde importa mucho el peso y la energía, así como su incremento de su costo al ser más pesado, su traslado, su instalación, entre otros.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

❖ Coeficiente de expansión térmica.

La densidad de un material es una función de la temperatura. Esto es debido a que la densidad disminuye conforme va aumentando la temperatura.

De este modo se define como el efecto de la temperatura y el cual mide el cambio en longitud por grado de temperatura mm/mm/°C (pulg/pulg/°F), esto es, el cambio en las dimensiones del material por unidad de longitud.

Debido a que los cambiadores de calor operan con fluidos a temperaturas diferentes, las dimensiones de los componentes y del equipo en general cambian, se van a encontrar en una constante expansión y contracción por lo que es de gran importancia su consideración.

De esta manera, el cambio en la longitud correspondiente a un cambio de temperatura esta dado por:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1 (T_2 - T_1)$$

donde: α = coeficiente de expansión térmica °C (°F)

L_1 y L_2 son las longitudes mm (pulg) correspondientes a las temperaturas

T_1 y T_2 °C (°F)

Para poder evitar en cierta forma estas deformaciones en los cambiadores de calor, se coloca un cabezal flotante que absorberá las expansiones y contracciones del haz de tubos.

También mediante el uso de juntas de expansión para equipos con espejos fijos, se puede absorber las expansiones y contracciones sobre el haz de tubos.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

❖ Conductividad térmica.

Se origina la transferencia de energía térmica dentro del material, de molécula a molécula sin ninguna transferencia de masa, por lo que podemos definir que es la capacidad que posee un material para transferir calor a través de su propio cuerpo.

Se denota por k y sus unidades son: $J/seg - mm - ^\circ C (BTU/pulg - hr - ^\circ F)$. El coeficiente de conductividad térmica es generalmente alto en los metales y bajo en otros materiales como los cerámicos y plásticos.

La función de la conductividad térmica es la de disipar el calor que se ha producido, por lo que es muy importante que los materiales empleados para la construcción de cambiadores de calor tengan un alto coeficiente de conductividad térmica.

6.2.2 Propiedades mecánicas

La importancia que tienen las propiedades mecánicas es debido a que el buen funcionamiento y desempeño de los productos van a depender de la capacidad que se tenga para resistir deformaciones bajo los esfuerzos generados en servicio.

De esta manera, las propiedades mecánicas de los materiales van a mostrar el comportamiento de estos al someterse a esfuerzos mecánicos. En estas propiedades se encuentra el módulo de elasticidad, ductilidad, dureza y varias medidas de resistencia, que son las propiedades principales para poder establecer los esfuerzos de diseño para el material en cuestión.

Para que el comportamiento mecánico de los materiales sea adecuado se deben de tomar muy en cuenta los dos puntos siguientes:

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

- Se deben de emplear los valores de esfuerzos permisibles en función de la temperatura de operación, contenidos en la subsección "C" de la sección VIII, División I del código ASME
- Se deben respetar los límites de temperatura establecidos para cada aplicación a la que se asignan los materiales.

El segundo punto es de gran importancia porque es necesario conocer el grado de estabilidad de las características mecánicas del material, debido a las altas temperaturas a las que pueden estar expuestos, así como tratamientos térmicos, combinaciones de trabajo mecánico y tratamientos térmicos y procesos de fabricación, entre otros, que afectan notablemente a las propiedades mecánicas, la microestructura y la resistencia a la fragilización, entre otros. El estudio de las propiedades mecánicas de un material puede verse más claramente empleando el diagrama esfuerzo-deformación de la figura 6.1.

❖ *Módulo de elasticidad.*

Ubicados en la región elástica del diagrama esfuerzo-deformación de la figura 6.1, donde el material recobra su longitud original cuando es liberada la carga (esfuerzo), se tiene la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, esta

relación se conoce como módulo de elasticidad.
$$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación}} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

El módulo de elasticidad es una constante de proporcionalidad cuyo valor es distinto para cada tipo de material y que sirve para medir la rigidez de un material. De esta manera, un material con una pendiente más pronunciada en su curva de esfuerzo-deformación será más rígido y se deformará menos bajo una carga que un material que tiene una pendiente menos pronunciada.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

❖ *Límite elástico.*

Es el esfuerzo máximo que un material puede soportar antes de deformarse plásticamente, esto es, que no podrá regresar a su forma original después de retirar la carga, como se aprecia en la figura 6.1.

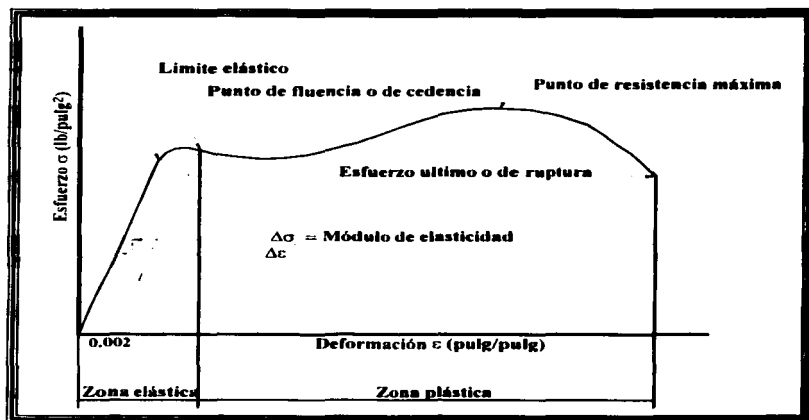


Figura 6.1 Diagrama esfuerzo-deformación para determinar las propiedades mecánicas de un material

Para los cambiadores de calor es necesario que los materiales utilizados tengan un límite elástico elevado debido a las grandes cargas a las que son expuestos y que éstas se mantengan en la zona elástica para evitar fallas alguna.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

❖ *Punto de fluencia o cedencia.*

Al incrementarse el esfuerzo el material comenzará a ceder, esto se puede ver claramente en el diagrama esfuerzo-deformación de la figura 6.1, donde ocurre un cambio en la pendiente al final de la región lineal.

De esta manera, nos proporcionará el cambio de la zona elástica a la plástica y por lo tanto, el material comenzará a tener una deformación plástica. Como no se sabe con gran exactitud el momento en que se inicia la cedencia de un material debido a que no ocurre de manera brusca como es representada en el diagrama, se define como el esfuerzo que provoca una deformación de 0.2% (0.002 pulg/pulg) con respecto a la línea recta, se conoce como límite de fluencia al 0.2% y se denota por $\sigma_{0.2}$

❖ *Resistencia máxima a la tensión.*

Cuando la carga se ha incrementado pasando por encima del punto de fluencia, el material sigue alargándose con mayor rapidez. Cuando la carga aplicada alcanza su valor máximo se le llama esfuerzo máximo a la tensión en donde el material puede seguir soportando la carga aplicada sin fracturarse.

Debido a que el material sigue deformándose se genera una elongación localizada (cuello) en donde la carga comienza a descender hasta que este se fractura. La resistencia que se calcula momentos antes de que se fracture se le conoce como esfuerzo de ruptura.

❖ *Ductilidad.*

Cuando los metales se rompen, su fractura puede clasificarse como dúctil o frágil. La ductilidad mide el grado, o bien, la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse.

Esta se puede medir como la elongación o reducción de área del material. Un material dúctil se estira y cede antes de fracturarse, por lo que se origina una notoria disminución en el área de la sección transversal en la sección fracturada, es por eso que para realizar un diseño se opta por tener un material dúctil para que cuando se presente un esfuerzo elevado sobre algún componente este se deforme antes de fracturarse.

Por otra parte, un material frágil se fracturará de repente con poco o ningún cambio en el área de la sección fracturada. Los materiales dúctiles se prefieren para piezas que soportan cargas repetidas o que se someten a carga de impacto debido a que, por lo general, son más resistentes a la fractura por fatiga y porque absorben mejor la energía de impacto. Un metal que presenta un porcentaje de alargamiento mayor del 5.0% se considera dúctil.

6.2.3 Propiedades químicas

La corrosión a nivel mundial, viene a ser uno de los fenómenos más trascendentales en la economía de toda la sociedad humana. En términos generales puede estimarse que los perjuicios causados por la corrosión equivalen del 1.5 al 3.5% del Producto Nacional Bruto en numerosos países.

Las propiedades químicas de un material son de gran importancia para realizar una correcta selección, una de las principales es la de poder tener la capacidad de resistir la corrosión por ataque de especies químicas, procedentes del proceso o de cualquier medio que afecte la resistencia del material.

La principal propiedad química a considerar en el material es que tenga una buena resistencia a la corrosión. Un material mal seleccionado causará muchos daños y problemas que acarrearán consecuencias como:

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

- a) **Reposición del equipo corroído.** Un material que no resista un ataque corrosivo puede corroerse en poco tiempo de servicio.

- b) **Sobre diseño en las dimensiones.** Para materiales poco resistentes al ataque corrosivo puede ser necesario dejar un excedente en los espesores.

Si se deja ese rango para la corrosión traerá como consecuencia que los componentes de los equipos resulten más pegados.

- c) **Mantenimiento preventivo.** Para proteger un equipo de un medio corrosivo es necesario emplear pinturas protectoras.

- d) **Paros debido a la corrosión de equipos.** Un equipo que ha sido atacado por la corrosión necesariamente debe ser retirado de operación, lo cual implicará pérdidas en la producción.

- e) **Contaminación o pérdida del producto.** Cuando en las paredes metálicas de los componentes de un equipo se ha producido perforaciones, los productos de la corrosión contaminan el producto, el cual en algunos casos es corrosivo.

- f) **Pérdida de eficiencia, ya que los coeficientes de seguridad sobre diseño de equipo y productos de corrosión por ejemplo, decrecen la velocidad de transmisión de calor.**

Dentro de los aspectos humanos y sociales tenemos:

- a) **La seguridad, ya que fallas violentas pueden producir incendios, explosiones y liberaciones de productos tóxicos.**

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

- b) Condiciones insalubres por ejemplo, contaminantes debido a productos del equipo corroído o bien un producto de la corrosión misma.
- c) Agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales como en combustibles usados para su manufactura.

6.3 Costo de materiales

Los aspectos económicos de un equipo de proceso están relacionados con el capital de inversión inicial y los costos de mantenimiento durante el tiempo de vida útil del equipo.

Por lo que el factor económico, en la mayoría de las veces, es el que va a decidir la elección entre varios materiales que satisfagan los requerimientos del proceso, ya que un alto costo del material corresponde a un alto costo de fabricación.

Un equipo de proceso que tenga recubrimiento interior aplicado por medio de las técnicas de inmersión en caliente, rociado de metal, por explosión o por depósito de soldadura, pueden tener un costo inicial muy elevado pero que durante un periodo de 10 años de vida obtiene una gran confiabilidad en su funcionamiento, un bajo costo de mantenimiento y con la mayor relación costo-eficiencia.

6.4 Características de fabricación

Es de gran importancia analizar las características que poseen los materiales al momento de su fabricación, debido a que es necesario saber si es fácil o difícil poder transformarlos al someterse a un proceso de manufactura.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

A parte de los procesos por los que va a pasar el material para ser fabricado, estará sometido a otros procesos que corresponden al momento de que un cambiador de calor se construye, por esta razón es necesario saber las limitaciones de cada uno de los materiales para ser sometidos a los distintos tipos de procesos necesarios en la construcción de cambiadores de calor.

Soldabilidad. Los materiales empleados para la construcción de cambiadores de calor deben poseer buenas propiedades de soldabilidad, debido a que una gran parte de los elementos que lo integran son de construcción soldada.

Una buena soldabilidad se va a caracterizar por la gran facilidad con la que es posible obtener el proceso de soldadura, por la ausencia de defectos en el proceso y con una buena resistencia, ductilidad y dureza en la unión que se ha soldado. Hay ciertos factores que afectan la soldabilidad como son:

- ♦ El proceso de soldadura. Dependiendo de los materiales empleados se tendrá el tipo de proceso de soldadura como la soldadura de arco eléctrico, soldadura con oxígeno y gas combustible, entre otros.
- ♦ Las propiedades del material base. Estas afectan el rendimiento de la soldadura como son el punto de fusión, la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica.
- ♦ El metal de relleno. El metal de aporte empleado debe ser compatible con el o los metales base para que los elementos mezclados en el estado líquido y en el momento de solidificarse no provoquen ningún problema.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

- Las condiciones de la superficie. Esto se refiere a lo siguiente, por ejemplo si se tiene humedad en el metal base, puede ocasionar porosidad en la zona de fusión, así como la formación de óxido en la superficie del metal evitan el contacto adecuado impidiendo la fusión.

Con los puntos anteriores se puede decir que para materiales con elementos de aleación, se deberán tener mayores precauciones durante los procedimientos de soldadura.

Esto es debido a que deben conservar las características que proporcionan los elementos aleantes. En el caso de que se tengan que soldar materiales diferentes, se deberá cuidar que sean compatibles.

Maquinabilidad. Este término nos indica la facilidad con la cual se puede maquinar un material mediante el empleo de herramientas y condiciones de corte apropiados.

Es necesario maquinar ciertos elementos constitutivos del cambiador de calor, como es el caso de las bridas, espejos, tapas planas, entre otros, para darles la forma, dimensiones y acabados requeridos.

Las propiedades mecánicas de un material de trabajo que afectan la maquinabilidad son la dureza y la resistencia.

Su composición química tiene un efecto importante, por ejemplo, si se tiene un alto contenido de carbono se tiene un aumento en la resistencia y dureza reduciendo el desempeño del maquinado.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

También elementos de aleación como el cromo, molibdeno y el tungsteno forman carburos en los aceros por lo que se reduce su maquinabilidad y un aumento en el desgaste del herramienta.

La fabricación de determinado elemento, resultará de mayor costo si se utilizan materiales difíciles de maquinar, ya que se requieren procedimientos y herramientas especiales. El desempeño del maquinado es llamado como índice de maquinabilidad, y se toma como referencia el índice de maquinabilidad de 1.00 (100%) del acero AISI B1112 como material base, por lo tanto, los materiales que tengan un índice de maquinabilidad mayor al 1.00 son materiales muy fáciles de maquinar.

- Formabilidad. Ciertos elementos de un cambiador de calor, como la envolvente, canal, tapas, entre otros, son sometidos a procesos de rolado y formado, siendo necesario evaluar la facilidad de los materiales a ser sometidos a dichos procesos.

Las características de formabilidad de los materiales están en función del tamaño de grano que presenten. Es recomendable un grano fino en los materiales que van a ser formados.

Las propiedades necesarias para el formado de los materiales son una baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad, pero estas son afectadas por la temperatura debido a que la ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando la temperatura de trabajo se aumenta.

CAPÍTULO 6 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DE MATERIALES

El tratamiento térmico de normalizado le imparte a los materiales propiedades de formabilidad. Dependiendo del tipo de material y del espesor, el formado de placas puede ser en frío o en caliente.

6.5 Disponibilidad de Materiales

Un factor de importancia para el diseño, construcción o reparación de un dispositivo o equipo, es que se tenga la facilidad de adquirir materiales o la disponibilidad de éstos en el mercado con las características requeridas para un determinado servicio de acuerdo a los requerimientos de operación que se establezcan.

En una economía impulsada por el mercado, el costo y la disponibilidad son dos términos que van siempre juntos. Por lo tanto, la cantidad y la estandarización tienen una estrecha relación con el costo.

La reducción de costos y tiempo podría verse obstaculizados por la adquisición de materiales importados, pero puede ser evitado mediante la sustitución de un material de mercado nacional o algún equivalente que se encuentre disponible con las características requeridas.

**CAPÍTULO 7
REQUERIMIENTOS DE MATERIALES**

7.1 Requerimientos específicos para cambiadores de calor de tubos y envolvente

Todos los materiales empleados para la construcción de cambiadores de calor de tubos y envolvente deberán ser los adecuados para el manejo de los fluidos de proceso y que soporten las reacciones corrosivas sobre su superficie, no excediéndose de 0.3 mm (0.012 pulg) por año, y así evitar una pérdida mayor a la permisible del material en la superficie de contacto con los fluidos.

Tubos de transferencia.

De acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM los tubos de transferencia se deberán suministrar en condiciones de tratamiento térmico como lo es el recocido, normalizado o normalizado y templado con revenido. Dependiendo de las condiciones de servicio se podrá emplear tubos de transferencia con costura, si se utilizan estos tubos el proveedor tendrá que inspeccionar cada tubo con "corrientes de Eddy" y por prueba hidrostática antes de instalar los tubos y debe de cumplir con las pruebas mecánicas y de certificaciones que la norma ASTM A-450 indica.

Espárragos y tuercas.

Para las uniones exteriores de cambiadores de calor, los espárragos y tuercas empleados deben ser materiales de la especificación ASTM. De este modo, se debe de tener que los espárragos y tuercas que se empleen para unir en la parte interior de los cambiadores deben ser compatibles con el material interior de la envolvente, sea material sólido o recubrimiento apropiado para el fluido corrosivo.

Por ejemplo, para presiones de servicio inferiores a 2068 KN/m² (300 lb/pulg²) o temperaturas inferiores a 280°C (500 °F), se puede utilizar acero al carbón igual o mejor que el grado B de la especificación ASTM A307. Para servicio de alta temperatura 593°C (1100 °F) se recomienda aleaciones de acero ASTM A193 grado B14 o B16.

Para temperatura de -101°C a -143°C (-150 °F a -225 °F) se recomienda la ASTM A320 grados L7, 9, 10.

Bridas.

Cuando se fabrican envolventes y cabezales en acero al carbono y con uniones bridadas, las bridas deberán ser de un material similar a los de los componentes. Para este tipo de uniones y según las condiciones de diseño, las bridas podrán ser diseñadas con acero al carbono recubierto con material de aleación en las partes que estén en contacto con el fluido de proceso y de superficies de asentamiento de empaques.

Conexiones.

Las bridas empleadas en conexiones se deberán fabricar en acero forjado, no se permite el empleo de bridas fabricadas en acero fundido o placa.

Los cuellos de las conexiones se deberán fabricar de tubos sin costura o de placa rolada con soldadura longitudinal cuando no se disponga en las dimensiones solicitadas.

Para cambiadores de calor cuyas boquillas sean de aleación, se podrán usar bridas deslizables con recubrimientos, siempre y cuando las condiciones de servicio lo permitan.

Empaques.

Los empaques para uniones bridadas, excepto para boquillas, se deberán elegir de acuerdo con los tipos recomendados por la norma TEMA y código ASME Sección VIII, División I. Si los materiales de los empaques no se encuentran indicados en las hojas de datos, se deberá designar los apropiados para el manejo de los fluidos a las condiciones de proceso especificadas.

Los empaques de las uniones con bridas de los cambiadores deberán ser del tipo "asbesto enchaquetado de metal", a menos que las condiciones de servicio requieran un material sólido. El material de enchaquetado de los empaques deberá ser apropiado para resistir la corrosión de fluidos de proceso y compatible con el de las caras de asentamiento en bridas, tapas y espejos.

Mamparas.

Se seleccionan principalmente de acero al carbono, ya que son elementos que no están sujetos a presión.

Aunque en ocasiones se seleccionan de un material similar al de los tubos para el caso en que el fluido de lado envolvente sea un buen electrolito.

Placa divisoria.

Se selecciona del mismo material de los cabezales y placas a los cuales van soldadas. Sin embargo, en los casos en donde la placa divisoria sean de acero al carbono y los espejos en donde van empacadas sean de materiales distintos, debe ser indispensable proporcionar en el extremo de la placa divisoria un material igual o similar al del espejo.

Protección con recubrimiento de aleación.

Se usará recubrimientos de aleación resistentes a la corrosión sobre los componentes que tengan material base de acero al carbono, debido a que son propensos a que se forme una corrosión severa.

Los recubrimientos resistentes a la corrosión aplicados a envolvente, cabezales, espejos y tapas planas, deberán ser del tipo "placa integral" mediante soldadura por explosión, rolado en caliente del material y del recubrimiento y por depósito de soldadura.

No se permiten los recubrimientos con aplicación de soldadura capilar en frío o cualquier otro proceso en el que no se lleve a cabo fusión entre metal base y recubrimiento.

Los recubrimientos con materiales de aleación para las caras para asentamiento de empaques de bridas, cabezales flotantes y tapas planas deben ser por depósito de soldadura con espesores no menores a 3mm (0.12 pulg). Cuando no sea posible recubrir el interior de boquillas por depósito de soldadura se deberá recubrir mediante una chapa de aleación sobrepuesta y con puntos de soldadura. Cuando se usen recubrimientos de aleación en cabezales con placas divisoras, éstas deberán ser de material sólido igual al del recubrimiento.

7.2 Esfuerzos permisibles de diseño

El esfuerzo máximo permisible o de trabajo para los materiales de construcción se establecerán basándose a sus características como su resistencia máxima a la tensión, punto de fluencia, punto de ruptura y la variación de estos debido al cambio de temperatura.

CAPÍTULO 7 REQUERIMIENTOS DE MATERIALES

De este modo, el esfuerzo máximo permisible de un material puede ser proporcionado de la siguiente manera:

1. Como un porcentaje del esfuerzo de fluencia.

Para obtener la precisión de los esfuerzos calculados de las cargas aplicadas, determinar la uniformidad del material, el riesgo de peligro si ocurre la falla, así como concentraciones locales de esfuerzo, impacto, fatiga y corrosión.

2. Como un porcentaje del esfuerzo último de tracción.

Se ha establecido debido a que los materiales frágiles sufren una carencia de zona plástica.

Los valores de los esfuerzos permisibles de los materiales que se manejan con más frecuencia para la construcción de cambiadores de calor, se pueden encontrar en el código ASME Sección VIII, División I.

Cuando los valores de los esfuerzos permisibles máximos de los materiales no se encuentran tabulados en el código ASME, pero en caso de no ser así, se deberán obtener conforme a lo antes mencionado y que se encuentra estructurado en la tabla 7.1.

Para materiales que sean sometidos a temperaturas bajas los esfuerzos permisibles se pueden considerar con el 25% de la resistencia a la tensión o el 62.5% de la resistencia a la cedencia a la temperatura de operación, como se indica en la tabla 7.1. Los materiales que se empleen en el rango de temperatura de -28.88 a 204.44 °C (-20 a 400 °F) se considera que es un 20% de la resistencia a la cedencia.

Tabla 7.1 Valores de esfuerzos permisibles

Materiales	Resistencia a la tensión mínima especificada		Punto de fluencia mínimo especificado	
	Temperatura ambiente	Temperatura de diseño	Temperatura ambiente	Temperatura de diseño
Ferrosos	$\frac{1}{4} S_r$	$\frac{1}{4} S_r$	$\frac{5}{8} S_r$	$\frac{5}{8} S_r$
No ferrosos	$\frac{1}{4} S_r$	$\frac{1}{4} S_r$	$\frac{2}{3} S_r$	$\frac{2}{3} S_r$

S_r = Resistencia a la tensión mínima especificada.

S_y = Punto de fluencia mínimo especificado.

Un análisis más detallado de esfuerzos, permite considerar esfuerzos permisibles mayores en lugar de usar un factor de seguridad elevado, debido a que un factor de seguridad elevado refleja una falta de conocimiento de los esfuerzos reales.

De esta manera, el diseñador debe de familiarizarse con los diversos tipos de esfuerzos y cargas para poder lograr un diseño seguro y económico.

7.3 Soldadura

Para la selección de los electrodos que deben ser utilizados a fin de lograr una buena soldadura, se recomienda lo siguiente:

- La resistencia (química y mecánica) de la unión soldada, debe ser al menos igual a los requerimientos mínimos del metal base más débil.

- ◆ **Es deseable que el coeficiente de expansión del metal utilizado para soldar sea igual o intermedio a los de ambos metales base, particularmente cuando tiene una diferencia grande.**

- ◆ **Cuando la corrosión sea un factor que debe ser considerado, la soldadura no debe ser tan diferente a los metales base que forme una celda de corrosión del tipo conocido como "pequeño ánodo-gran cátodo".**

Por ejemplo, emplear un tornillo de acero al carbono (pequeño ánodo) en un tanque de acero inoxidable (gran cátodo), da por resultado que el tornillo sufra corrosión acelerada.

- ◆ **Para servicio de alta temperatura es deseable que el metal utilizado para soldar no produzca o permita lo siguiente:**
 - 1. Difusión extensiva a través de la interfase de la soldadura, tal como la migración de carbono.**
 - 2. Grandes diferencias en resistencia al medio ambiente, tales como la oxidación.**
 - 3. Esfuerzos o deformaciones plásticas resultantes de aplicación prolongada de cargas a altas temperaturas (termofluencia).**
- ◆ **Al seleccionar un metal ferrítico para soldar, la mejor selección es la del metal que tenga la mínima tendencia a endurecerse al enfriarse, y además que cubra los aspectos señalados en los incisos anteriores.**

7.3.1 Relevado de esfuerzos en las soldaduras

El relevado de esfuerzos en las soldaduras tiene como objetivo lo siguiente:

- Retirar o atenuar esfuerzos térmicos generados durante la operación de soldar.
- Elimina zonas endurecidas por enfriamiento brusco.
- Difunde el posible hidrógeno disuelto en la unión soldada.
- Reduce la dureza del material como resultado del ciclo de enfriamiento controlado.

En general el relevado de esfuerzos se aplica a aceros al carbono, desde 19 mm (0.748 pulg) de espesor y esfuerzos mínimos de tensión de 2800 a 5280 kg/cm² (39825 a 75098 lb/pulg²), y aceros C-Mo; C-Cr y C-Cr-Mo de 13 mm (0.512 pulg) de espesor o mayor. Para poder realizar el relevado de esfuerzo se llevan a cabo las siguientes fases:

Prealemtamiento. Siempre es necesario un prealemtamiento antes de soldar, para reducir los efectos de esfuerzos de contracción y térmicos, así como superficies duras, facilitando el proceso de soldadura.

Por lo general, es recomendable para aceros al carbono con resistencia mínima a la tensión de 4930 kg/cm² (70120 lb/pulg²); para aceros C-Mo, Cr-Mo, Cr-V y aceros al níquel. El prealemtamiento comprende temperaturas hasta de 260°C (500°F).

Control de la velocidad de calentamiento.

Como los esfuerzos térmicos son causados por la expansión del material en una zona localizada, si la temperatura de relevado se incrementara rápidamente, se podrían generar esfuerzos tan grandes como los alcanzados con la temperatura del arco eléctrico, distribuidos de forma irregular y muy apartados de la unión soldada. Para evitar esto, es necesario tener un control sobre la velocidad de calentamiento la cual debe ser baja para imprimir en el material un calentamiento lento.

Temperatura y tiempo de relevado.

La temperatura de relevado se encuentra aproximadamente por debajo del límite crítico o de transformación, que es el intervalo de temperatura en el cual se forma austenita al momento de calentarse el material. Este depende de la composición química del material y de la velocidad de cambio de la temperatura, principalmente durante el enfriamiento.

El límite crítico se encuentra a más baja temperatura durante el enfriamiento que durante el calentamiento y el tiempo de relevado depende del espesor del material.

El tiempo de relevado es de 1 hora por cada 25 mm (0.984 pulg) de espesor para proporcionar una distribución uniforme de calor en todo el espesor del material.

Control de la velocidad de enfriamiento.

La velocidad de enfriamiento debe ser lenta para poder reducir las contracciones severas que propiciarían a formar zonas tensas en el material, y de esta manera proporcionar una reducción a la dureza del material en forma uniforme.

Post-calentamiento.

El calentamiento después de soldar viene siendo más necesario a medida que se incrementa el diámetro, el espesor de las piezas y/o su tendencia al endurecimiento.

De esta manera, en los materiales menos endurecibles el post-calentamiento se requiere solamente arriba de cierto diámetro y espesor mínimos.

Muchas soldaduras en aceros inoxidable austeníticos no se sujetan a post-calentamiento, lo mismo que las que se hacen entre aceros disímiles ferríticos y austeníticos, excepto cuando el metal base, ferrítico es de 5% Cr o más alto y si el espesor de pared excede de $\frac{1}{2}$ pulgada.

El relevado de esfuerzos de las soldaduras es específico en cada caso y se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- El diseño estructural.
- Las condiciones de operación.
- Las propiedades de los fluidos a manejar.
- La composición química del material.
- El espesor y la longitud de las uniones.

7.4 Requerimientos de operación y mantenimiento

El factor relacionado con la operación y mantenimiento de cambiadores de calor tiene un papel muy importante para la selección de materiales para poder tener una vida óptima de operación.

La durabilidad de los componentes es el factor encargado de ver cual es el tiempo en el que los materiales desempeñarán las funciones requeridas bajo las condiciones ambientales de trabajo.

Las propiedades analizadas para determinar o estimar la duración de los materiales son la resistencia a la corrosión, a la oxidación y al desgaste, la termofluencia, así como la fatiga por corrosión bajo cargas dinámicas.

La serie de requerimientos que se debe tomar en consideración son los siguientes:

- Vida estimada del equipo
- Variedad de materiales
- Disponibilidad y tiempo de entrega del material
- Costo del material y costo de mantenimiento e inspección

Es de gran importancia tomar en cuenta los factores relacionados con la operación y mantenimiento de cambiadores de calor.

Como se ha mencionado anteriormente sobre el costo del material, la disponibilidad y tiempo de entrega del material nos implica poder decidir que tipo de material nos resultará adecuado sin tener pérdidas excesivas.

Respecto a la vida estimada del equipo, es que un equipo de proceso se diseña para un tiempo determinado de vida útil, por lo que nuevamente no se descarta en ningún momento que se debe de realizar la selección óptima del o los materiales que se utilizarán.

Se puede ver, por ejemplo que para la construcción de los haces de tubos de cambiadores de calor hechas de acero al carbono tienen una vida útil estimada de 5 a 10 años y para las envolventes se tiene una estimación de 20 años.

Para esto, las propiedades analizadas son la resistencia a la corrosión, a la oxidación y al desgaste, la termofluencia, así como la fatiga o fatiga por corrosión bajo cargas dinámicas.

La variedad de materiales debe ser evitada lo más posible y tratar de emplear materiales que sean similares, a fin de que se pueda para evitar del mismo modo la generación de corrosión.

Hay otros tipos de requerimientos para la selección de materiales como son los factores físicos que son el tamaño, la forma, el peso del material, así como el espacio disponible para el componente.

Estos factores están relacionados con el tratamiento del material, por ejemplo, el tamaño y la forma pueden restringir el tratamiento térmico del material.

El efecto del tamaño, al que a veces se le llama efecto de masa, es debido a que los materiales presentan distintas resistencias conforme varía el área de la sección transversal de una pieza. Las piezas con secciones más grandes por lo general tienen resistencia menor y las de tamaño más reducido poseen una resistencia más elevada.

Las cargas a las que estará sometido el equipo van a ser uno de los factores primordiales para que un equipo opere adecuadamente, debido a que el material puede sufrir cambios considerables en sus propiedades causando fallas.

Existe una gran variedad de tipos de carga que pueden causar graves daños a los materiales de construcción de un cambiador de calor y que se mencionan a continuación.

1. Cargas generales.

- Carga por compresión: presión interna, presión externa, presión de vacío, presión hidrostática y presión de diseño.
- Cargas por momento: sismo, montaje, transporte.
- Cargas de tensión: peso propio del equipo instalado, plataforma, tubería.
- Cargas térmicas: temperatura ambiente y temperatura de los fluidos de operación.

2. Cargas estables.

Por presión, por peso propio, por contenido, por tubería y equipo, por soporte, térmicas, por viento.

3. Cargas inestables.

Por prueba hidrostática, por sismo, montaje, transportación, térmica, arranque y paro.

Cuando un cambiador tiene un mantenimiento adecuado las posibilidades de fallas son mínimas, reduciendo con esto el mantenimiento correctivo, el cual como se sabe es altamente costoso por ser imprevisto, provocando el paro inclusive de las líneas de producción.

En sí, el mantenimiento de estos equipos es muy sencillo. En términos generales se sugiere lo siguiente:

- Un cambiador bien diseñado debe ser revisado cada año haciendo una inspección visual del interior del equipo. Antes de desarmar no debe olvidarse revisar la instrumentación para observar su caída de presión y el cambio de temperatura, ya que esto puede indicar en que estado se encuentra por dentro el equipo.
- Si se encuentran incrustaciones de sales estas pueden ser removidas con una solución ácida hasta del 3%, haciendo circular esta solución por los tubos durante 24 Hrs.

De esta manera se evitará que se formen capas de suciedad que aislen los tubos, que origine un excesivo consumo de químicos, que se realicen altos promedios de purga de lodos, un prematuro reemplazo de tubos, un incremento en la caída de presión y un aumento excesivo en los costos de mantenimiento.

Para esto, es necesario considerar el tipo de material debido a que cuando se realiza una limpieza de los tubos de transferencia por medio de químicos estos pueden generar un ataque corrosivo debido a que son sustancias muy corrosivas para quitar los contaminantes que obstruyen los tubos.

CAPÍTULO 8

SELECCIÓN DE MATERIALES EN PLANTAS DE PROCESO

Es importante decir que cualquier cambio en las condiciones del diseño original de la planta altera el comportamiento de los materiales utilizados. La experiencia que se tenga en las diferentes unidades de proceso juega el papel principal en la selección de cuáles materiales van a tener un buen comportamiento en servicio.

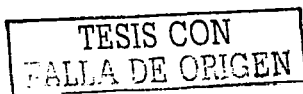
8.1 Refinación de crudo

Para poder obtener los productos derivados del petróleo, éste debe pasar por diversos procesos de refinación y así eliminar contaminantes como compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno, compuestos de oxígeno, sal, agua y algunos compuestos metálicos. Las calidades de los crudos mostrarán una variación considerable en rendimiento debido a las diversas etapas por la que pase para obtener productos como el gas combustible (para consumo de la refinería), gas L.P. (gas líquido de petróleo), nafta, gasolina, solventes, querosina (para jet y calefacción), gasóleo (diesel y calefacción), combustóleo, coque, aceites lubricantes, parafinas, asfalto y otros derivados de estos, como se ilustra en la figura 8.1.

Para lograr esto, el petróleo crudo debe pasar las siguientes etapas:

Primera etapa.

Destilación (atmosférica y al vacío). Consiste en la separación física del crudo debido a la volatilidad de los diferentes compuestos que van desde el gas licuado hasta el asfalto.



Su separación en columnas de destilación se logra aprovechando las diferencias de temperatura de condensación de cada uno de ellos, obteniéndose productos con características correspondientes a la del gas licuado, gasolina, querosina y combustibles diesel.

Segunda etapa.

Conversión de aceite pesado (desintegración). Aquí se realiza el rompimiento de los componentes más pesados (alto peso molecular) a más ligeros para la obtención de lubricantes o para convertirlos en productos comerciales. Estos a su vez se obtendrán de dos formas.

Catalítica.

- Desintegración catalítica.
- Hidrodesintegración.

Térmica

- Reducción de viscosidad.
- Coquización.

Tercer etapa.

Conversión de calidad (proceso de purificación). En esta parte del proceso se realiza una reestructuración de las moléculas de los destilados ligeros para elaborar productos de alta calidad y valor, se eliminan las impurezas para satisfacer las especificaciones de los clientes. La reestructuración se lleva a cabo por reformación catalítica, alquilación e isomerización y la purificación por hidrotratamiento y tratamiento químico.

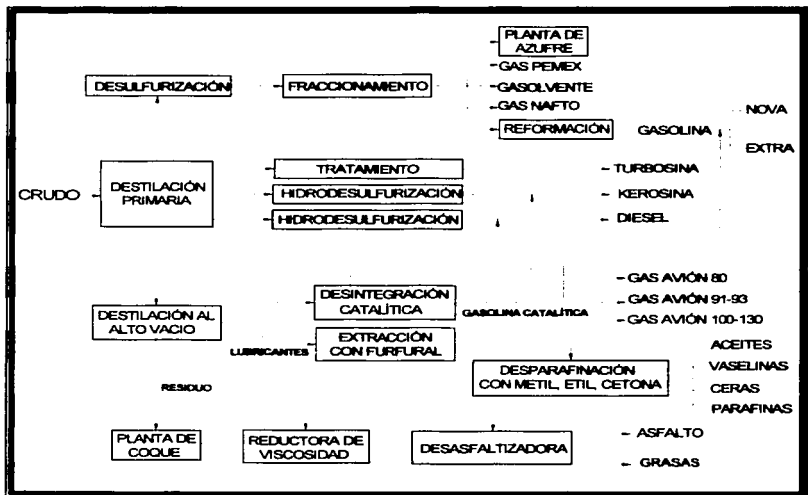


Figura 8.1 Diagrama del proceso de refinación del petróleo.

Estas etapas se llevarán a cabo por medio de las unidades o plantas de refinación, que son las siguientes:

Destilación atmosférica y de vacío

- Destilación atmosférica.

Función: Separa las principales fracciones de crudo para su posterior tratamiento.

Productos: Gas combustible, gasolina primaria, nafta, turbosina, gasolina, diesel, gasóleo y crudo reducido.

- Destilación de vacío.

Función: Realizar la máxima extracción de productos de gasóleos (ligeros y pesados de vacío) a partir del crudo reducido de destilación atmosférica.

Hidrotratadora de gasóleos de coquización

Función: Eliminar compuestos de azufre, nitrógeno y metales pesados en corrientes de gasóleos de coquización para preparar carga a la planta catalítica y diesel de bajo azufre.

Productos: Diesel de calidad con bajo contenido de azufre para alimentación catalítica.

Desintegración catalítica FCC

Función: Obtener gasolina de alto octano al desintegrar térmicamente los gasóleos pesados de vacío en un lecho fluidizado en presencia de catalizador.

Productos: Gasolina catalítica, propano, propileno, butano-butileno, aceite cíclico ligero y aceite decantado.

Reformadora de naftas

Función: Eliminar compuestos de azufre, oxígeno, nitrógeno y metales pesados en corrientes de gasóleos de coquización para preparar carga a la planta catalítica y diesel de bajo azufre.

Productos: Diesel de calidad con bajo contenido de azufre y gasóleo pesado con un contenido de 0.2 por ciento de azufre para alimentación catalítica.

Hidrodeshulfuradora de destilados intermedios

Función: Eliminar compuestos de azufre, oxígeno, nitrógeno y metales pesados, olefinas saturadas y reducir el contenido de aromáticos en corrientes de destilación intermedias por adición de hidrógeno en presencia de un catalizador para formar ácido sulfhídrico.

Productos: Turbosina desulfurada, gasolina y gas.

Hidrodeshulfuradora de naftas.

Función: Eliminar compuestos de azufre, oxígeno, nitrógeno y metales pesados, olefinas saturadas y reducir el contenido de aromáticos en corrientes de naftas de destilación atmosférica por adición de hidrógeno en presencia de un catalizador para formar ácido sulfhídrico.

Productos: Gasolina hidrodeshulfurada y gases amargos.

MTBE

Función: producir MTBE que es un componente oxigenado para gasolina a partir de butanobutileno y metanol.

Productos: MTBE (Metil-terbutil-éter) y como producto refinado que sirve de carga para alquilación.

Alquilación

Función: Producir alquilado, componente para gasolina de alto octano; a partir de butano e isobutano.

Productos: Alquilado, propano, butano.

Hidrógeno

Función: Producir hidrógeno a partir de la reformación del gas natural.

Producto: hidrógeno con pureza de 99.5 a 99.9 por ciento que se emplea en las unidades hidrosulfuradas.

Fracionadora de ligeros

Función: Sección de fraccionamiento con gas L.P. y nafta ligera.

Producto: Gas L.P., propano-propileno, butanos-butilenos, isopentano, gas nafta y hexano.

Plantas agotadoras de aguas amargas

Función: Eliminar el ácido sulfhídrico y amoniaco contenido en el agua de desecho para su reutilización.

Producto: Agua desflamada y gas ácido.

Recuperación de azufre.

Función: Recuperar el azufre de las corrientes ácidas provenientes de las unidades de hidrosulfuración y desintegración catalítica.

Producto: Azufre líquido y sólido.

Los productos que se han obtenido durante el refinamiento del petróleo crudo en cada una de las unidades, van a ser los determinantes para realizar una selección de materiales óptima.

8.2 Lista de equipos y materiales aplicados para la reconfiguración de la refinería de Minatitlán, Veracruz.

Planta de destilación combinada U-10000

CLAVE	SERVICIO	ENVOLVENTE				
		Material	Diam. (mm)	T. dis. (°C)	P. dis. (kg/cm ²)	Espesor (mm)
E-10003	Intercambiador de crudo/Domos 2da. Etapa de condensación	SA-516-70	1270	85	31.07	28
E-10004	Intercambiador de crudo/Domos 2da. Etapa de condensación	SA-516-70	1270	85	31.07	28
E-10005	3er. Intercambiador crudo/GOPA	SA-516-70	1016	100	31.07	22
E-10006	3er. Intercambiador crudo/GOPA	SA-516-70	1016	100	31.07	22
E-10007	2do. Intercambiador crudo/Diesel	SA-516-70	1067	105	31.07	25
E-10008	2do. Intercambiador crudo/Diesel	SA-516-70	1067	105	31.07	25
E-10009	Intercambiador de crudo/Recirculación de GOL V	SA-516-70	838	160	25.5	19
E-10010	Intercambiador de crudo/Recirculación de GOL V	SA-516-70	838	160	25.5	19
E-10011	Intercambiador de crudo/Domos 1ra. Etapa de condensación	SA-516-70	1499	135	31.07	32
E-10012	Intercambiador de crudo/Domos 1ra. Etapa de condensación	SA-516-70	1499	135	31.07	32
E-10013	Intercambiador de crudo/Recirculación querosina	SA-516-70	991	160	31.07	22
E-10014	Intercambiador de crudo/Recirculación querosina	SA-516-70	991	160	31.07	22
E-10015	2do. Intercambiador de crudo/Recirculación de diesel	SA-516-70	1143	165	31.07	25
E-10016	2do. Intercambiador de crudo/Recirculación de diesel	SA-516-70	1143	165	31.07	25
E-10017	1er. Intercambiador crudo/diesel	SA-516-70	889	280	19.2	16
E-10018	1er. Intercambiador crudo/diesel	SA-516-70	889	280	19.2	16
E-10019	2do. Intercambiador de crudo/Recirculación de GOPA	SA-387-5 CL2	1092	285	18.9	16
E-10020	2do. Intercambiador de crudo/Recirculación de GOPA	SA-387-5 CL2	1092	285	18.9	16
E-10021	2do. Intercambiador de crudo/GOPA	SA-387-5 CL2	889	280	24.4	16
E-10022	2do. Intercambiador de crudo/GOPA	SA-387-5 CL2	889	280	24.4	16
E-10023	1er. Intercambiador de crudo/Recirculación diesel	SA-516-70	864	260	15.7	16
E-10024	1er. Intercambiador de crudo/Recirculación diesel	SA-516-70	864	260	15.7	16
E-10025	2do. Intercambiador crudo/Producto y recirculación de GOPV	SA-516-70 CLAD410S	914	305	23	19
E-10026	2do. Intercambiador crudo/Producto y recirculación de GOPV	SA-516-70 CLAD410S	914	305	23	19
E-10027	1er. Intercambiador crudo/GOPA	SA-516-70 CLAD410S	787	355	24.4	19
E-10028	1er. Intercambiador crudo/GOPA	SA-516-70 CLAD410S	787	355	24.4	19

E-10029	1er. Intercambiador crudo/Recirculación de GOPA	SA-516-70 CLAD410S	1118	330	18.9	19
E-10030	1er. Intercambiador crudo/Recirculación de GOPA	SA-516-70 CLAD410S	1118	330	18.9	19
E-10031	2do. Intercambiador crudo/Recirculación de lavado	SA-516-70 CLAD410S	838	335	16.8	16
E-10032	2do. Intercambiador crudo/Recirculación de lavado	SA-516-70 CLAD410S	838	335	16.8	16
E-10033	1er. Intercambiador crudo/Producto y recirculación de GOPV	SA-516-70 CLAD410S	1143	340	23	22
E-10034	1er. Intercambiador crudo/Producto y recirculación de GOPV	SA-516-70 CLAD410S	1143	340	23	22
E-10035	2do. Intercambiador crudo/Residuo de vacío	SA-387-11 CLAD304L	1321	355	40.2	35
E-10036	2do. Intercambiador crudo/Residuo de vacío	SA-387-11 CLAD304L	1321	355	40.2	35
E-10037	1er. Intercambiador crudo/Recirculación de lavado	SA-387-11 CLAD304L	1118	390	16.8	19
E-10038	1er. Intercambiador crudo/Recirculación de lavado	SA-387-11 CLAD304L	1118	390	16.8	19
E-10039	1er. Intercambiador crudo/Residuo de vacío	SA-387-11 CLAD304L	1295	400	40.2	44
E-10040	1er. Intercambiador crudo/Residuo de vacío	SA-387-11 CLAD304L	1295	400	40.2	44
E-10041	Intercambiador Salmuera/Agua para desalado	SA-516-70	737	121	22.2	16
E-10042	Intercambiador Recirculación de GOLV/Agua para desalado	SA-516-70	737	182	25.5	16
E-10043	Intercambiador querosina/Agua para desalado	SA-516-70	559	225	19.2	13
E-10044	2do. condensador de 2da. etapa de condensación	SA-516-70 REC.SB-127	864	85	3.5	10
E-10046	Enfriador de diesel producto	SA-516-70	965	145	19.2	16
E-10047	2do. Enfriador de querosina producto	SA-516-70	533	115	19.2	13
E-10048	2do. Enfriador de turbosina producto	SA-516-70	508	75	17.6	13
E-10049	2do. Enfriador de recirculación de GOLV	SA-516-70	991	80	25.5	19
E-10051	2do. Enfriador de combustóleo	SA-516-70	1168	230	40.2	32

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CLAVE	TUBOS							Pesos, kg		
	Material	No.	Long. (mm)	Diam. (mm)	BWG	T. Dis. (°C)	P. Dis. (kg/cm ²)	Haz de tubos	Envolvente	Unidad completa
E-10003	SB-338-2	648	8534	31.75	16	130		9,107	13,204	26,409
E-10004	SB-338-2	648	8534	31.75	16	130	V.T.β.5	9,107	13,204	26,409
E-10005	SA-179	508	8534	25.4	12	190	24.4	9,356	13,567	13,567
E-10006	SA-179	508	8534	25.4	12	190	24.4	9,356	13,567	13,567
E-10007	SA-179	584	8534	25.4	12	190	19.2	10,721	15,546	15,546
E-10008	SA-179	584	8534	25.4	12	190	19.2	10,721	15,546	15,546
E-10009	SA-179	428	8534	25.4	12	107	31.07	7,761	11,254	22,508
E-10010	SA-179	428	8534	25.4	12	107	31.07	7,761	11,254	22,508
E-10011	SB-338-2	958	6096	31.75	16	165	V.T.β.5	9,811	14,226	56,905
E-10012	SB-338-2	958	6096	31.75	16	165	V.T.β.5	9,811	14,226	56,905
E-10013	SA-179	546	8534	25.4	12	225	19.1	9,964	14,447	14,447
E-10014	SA-179	546	8534	25.4	12	225	19.1	9,964	14,447	14,447
E-10015	SA-179	716	8534	25.4	12	225	15.7	13,079	18,965	18,965
E-10016	SA-179	716	8534	25.4	12	225	15.7	13,079	18,965	18,965
E-10017	SA-179	460	7315	25.4	12	175	52.13	7,223	10,474	10,474
E-10018	SA-179	460	7315	25.4	12	175	52.13	7,223	10,474	10,474
E-10019	SA-213-T9	700	8534	25.4	12	210	52.13	12,726	18,452	18,452
E-10020	SA-213-T9	700	8534	25.4	12	210	52.13	12,726	18,452	18,452
E-10021	SA-213-T9	882	6096	25.4	12	170	52.13	6,343	9,197	9,197
E-10022	SA-213-T9	882	6096	25.4	12	170	52.13	6,343	9,197	9,197
E-10023	SA-179	438	7315	25.4	12	210	52.13	6,874	9,967	19,933
E-10024	SA-179	438	7315	25.4	12	210	52.13	6,874	9,967	19,933
E-10025	SA-213-T9	516	8534	25.4	12	245	52.13	9,349	13,556	40,668
E-10026	SA-213-T9	516	8534	25.4	12	245	52.13	9,349	13,556	40,668
E-10027	SA-268-405	384	6096	25.4	14	250	52.13	3,906	5,664	5,664
E-10028	SA-268-405	384	6096	25.4	14	250	52.13	3,906	5,664	5,664
E-10029	SA-268-405	788	7315	25.4	14	265	52.13	9,493	13,765	13,765
E-10030	SA-268-405	788	7315	25.4	14	265	52.13	9,493	13,765	13,765
E-10031	SA-268-405	428	8534	25.4	14	270	57.3	5,984	8,676	8,676
E-10032	SA-268-405	428	8534	25.4	14	270	57.3	5,984	8,676	8,676
E-10033	SA-268-405	826	6096	25.4	14	295	57.3	8,384	12,157	24,314
E-10034	SA-268-405	826	6096	25.4	14	295	57.3	8,384	12,157	24,314
E-10035	SA-213-304	878	6096	25.4	14	306	57.3	9,170	13,297	26,594
E-10036	SA-213-304	878	6096	25.4	14	306	57.3	9,170	13,297	26,594
E-10037	SA-213-316	804	7315	25.4	14	320	57.3	9,668	14,018	14,018

FESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

E-10038	SA-213-316	804	7315	25.4	14	320	57.3	9,668	14,018	14,018
E-10039	SA-213-316	844	7315	25.4	14	340	57.3	10,413	15,099	30,199
E-10040	SA-213-316	844	7315	25.4	14	340	57.3	10,413	15,099	30,199
E-10041	SB-338-7	492	7315	19.05	20	156	20.1	2,586	3,749	11,248
E-10042	SA-179	500	6096	19.05	14	162	22.2	3,814	6,674	13,349
E-10043	SA-179	266	4877	19.05	14	175	22.2	1,668	2,419	2,149
E-10044	SB-163-400	655	6096	19.05	16	60	5.6	4,018	5,826	23,304
E-10046	SA-179	948	6096	19.05	14	60	5.6	7,160	10,382	10,382
E-10047	SA-179	246	3658	19.05	14	60	5.6	1,190	1,725	3,451
E-10048	SA-179	226	7315	19.05	14	60	5.6	2,054	2,978	5,957
E-10049	SA-179	616	6096	25.4	12	60	5.6	8,086	11,724	23,448
E-10051	SA-179	824	7315	25.4	14	60	5.6	9,968	14,454	86,726

Planta de coquización retardada U-31000

CLAVE	SERVICIO	ENVOLVENTE				
		Material	Diam. (mm)	T. dis. (°C)	P. dis. (kg/cm ²)	Espesor (mm)
E-31001	HCGO Pump around/Feed heat exchanger	SA-516-70 CLAD410S	1168	337	24.6	12.7
E-31002	HCGO/BFW exchanger	SA-516-70	660	259	21.4	9.5
E-31006	HCGO Pump around steam generator	SA-516-70	1727	244	23.2	22
E-31007	HCGO Product steam generator	SA-516-70	1778	244	23.2	22
E-31008	Slop oil exchanger	SA-516-70	489	199	14.1	9.5
E-31009	Pump out cooler	SA-516-70	610	232	16.9	9.5
E-31014	Flushing oil cooler	SA-106-B	387	163	6.0	9.5
BN-31001	Blowdown drum bayonet heater	SA-516-70	889	163	3.5	9.5
E-31502	Depropanizer reboiler	SA-516-70	889	196	15.1	12.7
E-31503	Lean/Rich sponge oil exchanger	SA-516-70	940	177	16.5	12.7
E-31504	Sponge oil trim cooler	SA-516-70	864	77	24.6	12.7
E-31505	Debutanizer reboiler	SA-516-70	787	204	18.6	11
E-31507	Total nafta trim cooler	SA-516-70	533	77	18.6	9.5

CLAVE	TUBOS							Pesos, kg		
	Material	No.	Long. (mm)	Diam. (mm)	BWG	T. Dis. (°C)	P. Dis. (kg/cm ²)	Haz de tubos	Envolvente	Unidad completa
E-31001	SA-268-410S	1470	6096	19.05	16	367	18.6	8,780	12,731	12,731
E-31002	SA-179	423	6096	19.05	14	238	35.2	3,209	4,653	4,653
E-31006	SA-268-410S	3451	6096	19.05	16	351	18.6	20,452	29,655	29,655
E-31007	SA-268-410S	3677	6096	19.05	16	359	21.4	21,779	31,580	31,580
E-31008	SA-179	220	6096	19.05	14	343	23.2	1,678	2,433	2,433
E-31009	SA-179	356	6096	19.05	14	71	11.2	2,705	3,922	3,922
E-31014	SA-179	132	6096	19.05	14	71	8.8	1,012	1,467	1,467
BN-31001	SA-179	810	6096	19.05	14	343	23.2	6,114	8,865	8,865
E-31502	SA-179	810	6096	19.05	14	327	19.3	4,697	6,810	6,810
E-31503	SA-179	915	6096	19.05	14	238	24.6	6,899	10,004	30,013
E-31504	SA-179	761	6096	19.05	14	77	16.5	5,747	8,333	16,665
E-31505	SA-213-T11	621	6096	19.05	14	327	19.3	4,697	6,810	6,810
E-31507	SA-179	265	6096	19.05	14	77	12.7	2,019	2,927	5,854

Planta hidrotratadora de gasóleos U-11000

CLAVE	SERVICIO	ENVOLVENTE				
		Material	Diam. (mm)	T. dis. (°C)	P. dis. (kg/cm ²)	Esesor (mm)
E-11001	MP Steam feed preheater	SA-516-70	1524	200	11	13
E-11003	AB Reactor feed/Reactor effluent exchanger	SA-387-22 CL2 REC. 347	1473	379	158.7	92
E-11004	AB Feed oil/Reactor effluent exchanger	SA-387-22 CL2 REC. 347	1270	365	145.7	76
E-11005	AB Recycle gas/Hot HP vapor exchanger	SA-387-11 CL2	737	277	159.5	48
E-11007	Hot HP vapor trim cooler	SA-516-70	787	66	14	10
E-11009	AB HGO Product fractionator feed exchanger	SA-387-5 CL2	965	370	18.2	13
E-11010	HGO Product MP steam generator	SA-106-B	922/1290	234	24.5	22
E-11012	AB HGO Fractionator overhead trim cooler	SA-516-70	864	70	5	10
E-11015	A, B, S Make-up hydrogen compressor first stage cooler	SA-516-70	1143	100	20	16
E-11016	A, B, S Make-up hydrogen compressor second stage cooler	SA-516-70	889	120	25	16
E-11017	AB Make-up hydrogen compressor spillback cooler	SA-516-70	559	150	36.3	16

E-11018	ABC BFW Preheater	SA-516-70	660	265	18.2	13
E-11019	AB Diesel product trim cooler	SA-516-70	737	70	13.85	10
E-11021	Rich/Lean DEA exchanger	SA-516-70	1143	146	6.6	10
E-11022	AB DEA Regenerator reboiler	SA-516-70	1346/1854	150	4	10
E-11026	DEA Regenerator overhead trim condenser	SA-240-304	838	150	4	6
E-11029	LP Amine absorber feed cooler	SA-516-70	533	150	12.1	10
E-11034	Fractionator pump around MP steam generator	SA-516-70	965/1321	200.5	11.8	13
E-11035	Off gas cooler	SA-106-B	248	150	12	8
E-11036	A,B,S Off gas compressor first stage cooler	SA-516-70	1118	150	35	25

CLAVE	TUBOS							Pesos, kg		
	Material	No.	Long. (mm)	Diam. (mm)	BWG	T. Dis. (°C)	P. Dis. (kg/cm ²)	Haz de tubos	Envolvente	Unidad completa
E-11003	SA-179	1602	8534	25.4	12	350	22.6	24,505	35,532	35,532
E-11004	SA-213-347	1374	4877	25.4	10	438	146.7	9,640	15,907	31,8134
E-11005	SA-213-347	578	7315	25.4	10	289	162.1	6,348	10,474	20,948
E-11007	SA-213-347	326	3658	25.4	10	305	144.3	1,780	2,581	5,162
E-11009	SB-163-825	234	4877	31.75	14	170	142.2	2,120	3,074	3,074
E-11010	SA-213-T11	968	3658	19.05	14	314	18.2	3,815	5,532	5,532
E-11012	SA-179	400	7315	25.4	12	66	14	5,376	7,795	15,589
E-11015	SA-179	716	8534	25.4	12	66	6.6	11,118	16,120	16,120
E-11016	SA-179	460	7315	25.4	12	66	6.6	6,140	8,903	8,903
E-11017	SA-179	140	4877	25.4	12	66	14	1,321	1,916	3,831
E-11018	SA-516-70	418	6096	19.05	14	233	35.2	2,699	3,913	11,740
E-11019	SA-516-70	320	6096	25.4	12	65.6	14	3,591	5,206	10,413
E-11021	SA-213-304	810	6096	25.4	14	113	12	7,004	10,156	10,156
E-11022	SA-213-304	2060	7315	19.05	16	228	10.5	12,344	17,899	35,798
E-11026	SA-213-304	270	4877	19.05	16	65.6	14	1,394	2,021	2,021
E-11029	SA-179	226	3658	19.05	14	66	14	943	1,368	1,368
E-11034	SA-179	1000	6096	19.05	14	258	7.1	6,388	9,263	9,263
E-11035	SA-179	21	4877	19.05	14	66	14	135	195	391
E-11036	SA-268-405	788	7315	25.4	14	66	6.6	8,069	11,700	11,700

Planta de alquilación U-18000

CLAVE	SERVICIO	ENVOLVENTE				
		Material	Diam. (mm)	T. dis. (°C)	P. dis. (kg/cm ²)	Espesor (mm)
18000A-E-01	Olefin regenerant trim condenser	SA-516-70	457	175	39.2	10
18000A-E-02	Olefin regenerant heater	SA-516-70	457	260	42	10
18000A-E-03	Isostripper sidcut exchanger	SA-516-70	1473	120	16.7	15
18000A-E-04	Isostripper bottoms exchanger	SA-516-70	1143	120	17.7	15
18000A-E-05	Isostripper sidcut condenser	SA-516-70	1371	120	16.7	16
18000A-E-06	Isobutane recycle cooler	SA-516-70	1270	120	31.8	20
18000A-E-07	Isostripper upper reboilers	SA-516-70	990	150	15.1	12
18000A-E-08	Isostripper auxiliary reboiler	SA-516-70	279	150	15.1	10
18000A-E-09	Rectifier condenser	SA-516-70	152	120	9.4	10
18000A-E-10	Butane treater exchanger	SA-516-70	355	200	14.5	10
18000A-E-11	Butane treater heater	SA-516-70	177	393	67	10
18000A-E-12	Butane treater condenser	SA-516-70	584	145	14.5	10
18000A-E-13	HF Stripper feed condenser	SA-516-70	1473	120	17.6	18
18000A-E-14	HF Stripper reboiler	SA-516-70	711	120	21.1	10
18000A-E-15	Isobutane superheater	SA-516-70	330	393	67	10
18000A-E-16	Isobutane flush cooler	SA-516-70	431	120	14.2	10
18000A-E-17	Propane purge treater exchanger	SA-516-70	152	145	21.2	10
18000A-E-18	Propane purge treater heater	SA-516-70	101	393	67	10
18000A-E-19	Propane purge treater condenser	SA-516-70	279	120	14.2	10
18000A-E-20	Alkylate cooler	SA-516-70	1270	120	23.7	15
18000A-E-21	A/B Alkylation reactor coolers	SA-516-70	1320	120	20	22
18000B-E-01	Feed heater	SA-516-70	1498	178	41.2	17
18000B-E-02	Feed-Stripper bottoms exchanger	SA-516-70	1244	120	27.5	12
18000B-E-03	DME Stripper reboiler	SA-516-70	1117	120	11.9	10
18000B-E-04	DME Stripper bottoms trim cooler	SA-516-70	1168	120	13.5	15
18000B-E-05	DME Stripper overhead trim condenser	SA-516-70	1422	178	12.1	15

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

CLAVE	TUBOS							Pesos, kg		
	Material	No.	Long. (mm)	Diam. (mm)	BWG	T. Dis. (°C)	P. Dis. (kg/cm ²)	Haz de tubos	Envolvente	Unidad completa
18000A-E-01	SA-179	126	6100	25.4	12	120	26.2	1,411	2,257	2,257
18000A-E-02	SA-179	131	6100	19.05	12	393	67	1,139	1,822	1,822
18000A-E-03	SA-179	1196	6100	25.4	121	120	18.7	13,517	21,627	86,510
18000A-E-04	SA-179	738	6100	25.4	12	23.7	21.5	8,321	13,314	13,314
18000A-E-05	SB-111-443	1044	6100	25.4	12	120	11.2	11,787	18,859	113,153
18000A-E-06	SB-111-443	887	6100	25.4	12	120	21.2	10,020	16,033	96,196
18000A-E-07	SA-179	556	6100	25.4	12	176	15.1	6,267	10,027	40,108
18000A-E-08	SA-179	47	6100	25.4	12	240	23.7	529	847	847
18000A-E-09	SB-111-443	15	6100	25.4	12	135	14	165	264	264
18000A-E-10	SA-179	72	6100	25.4	12	260	14.5	812	1,299	1,299
18000A-E-11	SA-179	21	6100	19.05	12	260	14.5	178	285	285
18000A-E-12	SB-111-443	202	6100	25.4	12	120	9.7	2,269	3,631	3,631
18000A-E-13	SB-111-443	1198	6100	25.4	12	120	11.8	13,538	21,660	129,962
18000A-E-14	SA-179	304	6100	25.4	12	176	21.1	3,407	5,452	5,452
18000A-E-15	SA-179	65	6100	19.05	12	260	14.1	567	906	906
18000A-E-16	SB-111-443	109	6100	25.4	12	120	21.2	1,228	1,965	1,965
18000A-E-17	SA-179	14	6100	25.4	12	260	21.2	156	250	250
18000A-E-18	SA-179	5	6100	19.05	12	260	21.2	45	73	73
18000A-E-19	SB-111-443	51	6100	25.4	14	120	21.2	439	702	702
18000A-E-20	SB-111-443	899	6100	25.4	12	120	15.8	10,152	16,243	16,243
18000A-E-21	SB-111-443	981	9100	25.4	12	120	13.4	16,170	25,872	155,232
18000B-E-01	SA-213-T11	1225	1524	25.4	12	338	27.5	4,134	6,615	6,615
18000B-E-02	SA-179	857	1524	25.4	12	120	41.2	2,879	4,606	4,606
18000B-E-03	SA-179	694	1524	25.4	12	176	11.9	2,328	3,725	14,900
18000B-E-04	SA-179	755	1524	25.4	12	120	9	2,536	4,058	8,115
18000B-E-05	SA-179	1109	1524	25.4	12	120	8.5	3,737	5,979	47,835

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Planta de azufre U-23000

CLAVE	SERVICIO	ENVOLVENTE				
		Material	Diam. (mm)	T. dis. (°C)	P. dis. (kg/cm ²)	Espesor (mm)
E-701	Solution trim cooler	SA-240-410	609	100	13.0	13
E-702	Solution heat exchanger	SA-240-410	660	150	13.0	13
E-703	A/B Reboiler	SA-516-70	1030	160	4.0	13
E-501	Process gas cooler	SA-516-70	406	200	6.0	13
E-601	Process gas cooler	SA-516-70	406	200	6.0	13
EA-3001,4,5,6	Sulfur condenser	SA-516-70	1530	170	6.0	13
EA-3002	Sulfur condenser No. 2	SA-516-70	1530	170	6.0	13
EA-3003	Sulfur condenser No. 3	SA-516-70	1530	170	6.0	13
EA-3006	Reactor effluent cooler	SA-516-70	1830	170	6.0	13

CLAVE	TUBOS						Pesos, kg			
	Material	No.	Long. (mm)	Diam. (mm)	BWG	T. Dis. (°C)	P. Dis. (kg/cm ²)	Haz de tubos	Envolvente	Unidad completa
E-701	SA-213-316L	355	6096	19	16	100	10.0	1,824	2,645	2,645
E-702	SA-213-316L	423	6096	19	16	150	13.0	2,169	3,145	3,145
E-703	SA-178	1117	6000	25.4	14	200	4.0/V.T.	9,060	13,137	26,275
E-501	SA-178	146	6096	19	14	400	4.0	948	1,375	1,375
E-601	SB-178	146	6096	19	14	400	4.0	948	1,375	1,375
EA-3001,4,5,6	SB-178	1034	8534	38	12	424	1.05	23,417	33,955	135,821
EA-3002	SA-178	1034	8534	38	12	325	1.05	23,417	33,955	33,955
EA-3003	SA-178	1034	8534	38	12	255	1.05	23,417	33,955	33,955
EA-3006	SB-178	1246	6096	25	14	400	1.05	11,600	16,820	16,820

Planta catalítica FCC-2

CLAVE	SERVICIO	ENVOLVENTE				
		Material	Diam. (mm)	T. dis. (°C)	P. dis. (kg/cm ²)	Espesor (mm)
101-B	Stripper reboiler	SA-516-70	1340	343	19.3	19
102-B1/B2	Debutanizer reboiler	SA-516-70	1220	343	15.8	16
103-B	Stripper inter-reboiler	SA-516-70	1440	343	19.3	19
104-B	Depropanizer reboiler	SA-516-70	1360	343	20.7	19
105-B	Amine reactor reboiler	SA-516-70	1000	160	16.7	13
106-B	Sour water stripper reboiler	SA-516-70	610	185	14.6	10
107-B	Splinter reboiler	SA-516-70	1880	343	23.5	29
101-E1/E2	Fractionator overhead trim cooler	SA-516-70	1540	165	7	10
102-E	Lean oil/Rich oil exchanger	SA-516-70	700	343	21.9	13
103-E	HAGO/LCO Exchanger	SA-516-70	584	250	12.2	10
104-E	Fresh feed/Heavy cycle oil exchanger	SA-516-70	1290	343	21.5	19
105-E1/E2	Fractionator bottoms product/HAGO exchanger	SA-516-70	1290	343	18.2	10
106-E1/E2	Fresh feed/Fractionator bottoms p/a exchanger	SA-516-70	584	375	20.5	13
107-E1/E2	Fractionator bottoms steam generator	SA-516-70	1100	343	71	44
108-E	Fractionator bottoms/Boiler feed water exchanger	SA-516-70	398	343	95	34
109-E	Debutanizer bottoms trim cooler	SA-516-70	980	160	15.8	13
110-E	High pressure condenser	SA-516-70	1460	149	18.3	19
111-E	Wet gas compressor interstage trim cooler	SA-516-70	1400	149	7.7	10
112-E	Lean oil cooler	SA-516-70	1040	149	32.8	22
113-E	Debutanizer feed/Bottoms exchanger	SA-516-70	1030	343	17	13
114-E	Depropanizer feed/Debutanizer bottoms exchanger	SA-516-70	690	343	22	13
115-E	Depropanizer overhead condenser	SA-516-70	1740	149	19.7	22
116-E	Depropanizer bottoms cooler	SA-516-70	740	149	20.7	13
117-E	Absorber upper intercooler	SA-516-70	1000	149	24.7	16
118-E	Absorber lower intercooler	SA-516-70	790	149	24.8	16
119-E	Debutanizer overhead product cooler	SA-516-70	584	149	22	26
120-E	Amine reactor feed/Bottoms exchanger	SA-516-70	790	160	15.5	10
121-E	Amine reactor condenser	SA-516-70	890	149	7	10
122-E	Amine reactor bottoms cooler	SA-516-70	940	149	36	22
123-E	Sour water stripper bottoms/Feed exchanger	SA-516-70	438	165	13	19
124-E	Stripper water cooler	SA-516-70	780	165	13	10

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CLAVE	TUBOS							Pesos, kg		
	Material	No.	Long. (mm)	Diam. (mm)	BWG	T. Dis. (°C)	P. Dis. (kg/cm ²)	Haz de tubos	Envolvente	Unidad completa
101-B	SA-179	1680	7310	19.05	14	200	13.8	12,894	19,084	19,084
102-B1/B2	SA-213-T5	1100	7310	10.05	14	343	13.7	8,636	12,781	25,561
103-B	SA-179	1960	6100	19.05	14	200	13.8	12,682	18,769	18,769
104-B	SA-179	1670	4880	19.05	14	200	13.8	8,838	13,081	13,081
105-B	SA-249-316	764	7310	19.05	16	305	25/V.T.	4,777	7,071	7,071
106-B	SA-249-316	236	4880	19.05	16	305	22/V.T.	1,070	1,583	1,583
107-B	SA-179	920	4880	25.4	14	343	15.7/V.T.	7,742	11,458	11,458
101-E1/E2	SB-111-443	2020	7310	19.05	16	149	10.4	12,464	18,446	36,892
102-E	SA-179	358	7310	19.05	14	343	32.8	2,814	4,165	8,329
103-E	SA-179	296	6100	19.05	14	343	17.6	1,932	2,860	8,580
104-E	SA-179	1492	7310	19.05	14	343	13.7	11,494	17,012	17,012
105-E1/E2	SA-213-5	1492	7310	25.4	14	165	12.2	14,835	21,956	43,913
106-E1/E2	SA-213-5	200	7310	25.4	12	380	16.6	2,666	3,946	7,892
107-E1/E2	SA-213-5	672	7310	25.4	12	395	48	8,998	13,317	26,634
108-E	SA-213-5	125	4880	19.05	14	355	18.2	674	997	997
109-E	SB-111-443	820	7310	19.05	14	149	10.4	6,346	9,391	18,783
110-E	SB-111-443	1931	7310	19.05	14	149	12.2	14,863	21,997	43,994
111-E	SB-111-443	1700	7310	19.05	14	149	10.4	13,136	19,442	38,883
112-E	SB-111-443	880	7310	19.05	14	149	21.9	6,841	10,125	10,125
113-E	SA-179	550	7310	25.4	14	343	15.8	5,745	8,502	8,502
114-E	SA-179	342	4880	19.05	14	343	15.8	1,870	2,768	2,768
115-E	SB-111-443	2950	7310	19.05	14	149	13.2	22,565	33,396	66,792
116-E	SB-111-443	384	4880	19.05	14	149	13.8	2,108	3,119	6,239
117-E	SB-111-443	820	6100	19.05	14	140	16.5	5,387	7,973	15,946
118-E	SB-111-443	460	7310	19.05	14	135	16.6	3,612	5,346	10,692
119-E	SB-111-443	300	6100	19.05	14	149	14.7	1,956	2,894	5,789
120-E	SA-249-316	485	6100	19.05	12	160	23	4,124	6,104	12,208
121-E	SA-249-316	644	7310	19.05	12	149	10.4	6,467	9,572	9,572
122-E	SA-249-316	740	7310	19.05	12	149	24	7,415	10,974	10,974
123-E	SA-2649-316	160	6100	19.05	12	165	11	1,352	2,001	2,001
124-E	SB-111-443	468	7310	19.05	12	165	14	4,720	6,986	6,986
125-E	SA-249-316	622	7310	19.05	12	149	24	6,241	9,237	9,237

Planta hidrodesulfuradora profunda de diesel U-24000

CLAVE	SERVICIO	ENVOLVENTE				
		Material	Diam. (mm)	T. dis. (°C)	P. dis. (kg/cm ²)	Espesor (mm)
E-24001	Intercambiador de carga/Diesel producto	SA-516-70	787	200	5.4	10
E-24006	Intercambiador alimentación/Fondos de la estabilizadora	SA-516-70 REC.SS410	914	350	15	13
E-24007	Generador de vapor	SA-516-70	1092	250	25	19
E-24008	Precalentador de alimentación al generador de vapor	SA-516-70	559	262	15	10
E-24009	Enfriador de diesel producto	SA-516-70	864	100	15	13
E-24010	Enfriador de gas de colas	SA-516-70	635	120	5	10
E-24011	Enfriador de descarga del compresor del gas amargo	SA-516-70	356	100	15	10
E-24012	Enfriador de naftas	SA-106-B	304.8	70	15	8
E-24013	Enfriador del reactor	SA-516-70 CLAD410	1067	350	58	41
E-24014	Enfriador de agua amarga	SA-106-B	559	80	6.5	10
E-24015	Condensador de superficie	SA-516-70	2105	180	5	10
E-24016	Condensador de interfase	SA-516-70	1473	125	7.5	10
E-24017	Enfriador del sistema de lubricación	SA-106-B	203	120	15	8
E-24019	Condensador torre estabilizadora	SA-516-70	533	200	6.2	10
E-24071	Enfriador de amina pobre	SA-106-B	508	70	19.7	10
E-24072	Intercambiador de amina pobre/Rica	SA-516-70	914	150	6	10
E-24073	Rehervidor de la regeneradora de amina	SA-516-70	1650	150	6	10
E-24074	Segundo condensador de amina pobre	SA-516-70	533	150	6	10

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

CLAVE	TUBOS							Pesos, kg		
	Material	No.	Long. (mm)	Diam. (mm)	BWG	T. Dis. (°C)	P. Dis. (kg/cm ²)	Haz de tubos	Envolvente	Unidad completa
E-24001	SA-179	574	6096	19.05	14	250	15	3,591	5,207	5,207
E-24006	SA-268-405	818	7315	19.05	14	377	15	6,043	8,762	26,287
E-24007	SA-179	190	3658	25.4	14	377	15	890	1,291	1,291
E-24008	SA-179	252	4267	19.05	14	250	25	1,159	1,681	1,681
E-24009	SA-179	694	6096	19.05	14	66	6.6	4,340	6,293	12,586
E-24010	SA-179	389	4267	19.05	14	66	6.6	1,743	2,527	2,527
E-24011	SA-179	82	4877	19.05	14	66	6.6	440	638	638
E-24012	SA-179	78	4877	25.4	12	66	6.6	662	960	1,920
E-24013	SA-213-347	436	4267	31.75	12	415	86.6	4,310	6,250	6,250
E-24014	SA-179	294	3658	19.05	14	66	6.6	1,151	1,669	3,338
E-24015	SA-179	1394	6096	19.05	14	66	6.6	11,586	16,800	16,800
E-24016	SA-179	1707	6096	19.05	14	66	6.6	10,874	15,767	31,535
E-24017	SA-179	32	3658	19.05	14	66	6.6	129	187	187
E-24019	SA-179	224	6096	19.05	14	66	6.6	1,426	2,068	2,068
E-24071	SA-179	192	4877	19.05	14	66	13.1	1,007	1,460	1,460
E-24072	SA-213-304	792	4877	19.05	16	150	8.3	3,219	4,668	4,668
E-24073	SA-213-304	1012	7315	19.05	16	215	6	6,946	10,072	10,072
E-24074	SA-213-304	238	6096	19.05	16	66	6.5	1,204	1,746	1,746

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Planta tratadora de aguas amargas U-60000, U-65000, U-70000 y U-75000

CLAVE	SERVICIO	ENVOLVENTE				
		Material	Diam. (mm)	T. dis. (°C)	P. dis. (kg/cm ²)	Espesor (mm)
EA-60001 AB	Precalentador de carga/Fondos del agotador	SA-516-70	737	140	3.5	13
EA-60001 C	Precalentador de carga/Fondos del agotador	SA-516-70	737	140	3.5	13
EA-60002	Rehervidor del agotador	SA-516-70	1041	142	3.5	16
EA-60003	Enfriador de fondos del agotador	SA-516-70	737	85	11.2	16
EA-65001 AB	Precalentador de carga/Fondos del agotador	SA-516-70	737	140	3.5	13
EA-65001 C	Precalentador de carga/Fondos del agotador	SA-516-70	737	140	3.5	13
EA-65002	Rehervidor del agotador	SA-516-70	1041	142	3.5	16
EA-65003	Enfriador de fondos del agotador	SA-516-70	737	85	11.2	16
EA-70001 AB	Precalentador de carga/Fondos del agotador	SA-516-70	737	140	3.5	13
EA-70001 C	Precalentador de carga/Fondos del agotador	SA-516-70	737	140	3.5	13
EA-70002	Rehervidor del agotador	SA-516-70	1041	142	3.5	16
EA-70003	Enfriador de fondos del agotador	SA-516-70	737	85	11.2	16
EA-75001 AB	Precalentador de carga/Fondos del agotador	SA-516-70	737	140	3.5	13
EA-75001 C	Precalentador de carga/Fondos del agotador	SA-516-70	737	140	3.5	13

CLAVE	TUBOS							Pesos, kg		
	Material	No.	Long. (mm)	Diam. (mm)	BWG	T. Dis. (°C)	P. Dis. (kg/cm ²)	Haz de tubos	Envolvente	Unidad completa
EA-60001 AB	SA-213-316	530	4877	19.05	16	115	8	2,221	3,221	9,662
EA-60001 C	SA-179	530	4877	19.05	14	115	8	2,776	4,026	12,077
EA-60002	SA-179	1106	6096	19.05	14	165	5.6	7,098	10,293	10,293
EA-60003	SA-179	486	4877	19.05	14	65.5	6.6	2,574	3,732	7,464
EA-65001 AB	SA-213-316	530	4877	19.05	16	115	8	2,221	3,221	9,662
EA-65001 C	SA-179	530	4877	19.05	14	115	8	2,776	4,026	12,077
EA-65002	SA-179	1106	6096	19.05	14	165	5.6	7,098	10,293	10,293
EA-65003	SA-179	486	4877	19.05	14	65.5	6.6	2,574	3,732	7,464
EA-70001 AB	SA-213-316	530	4877	19.05	16	115	8	2,221	3,221	9,662
EA-70001 C	SA-179	530	4877	19.05	14	115	8	2,776	4,026	12,077
EA-70002	SA-179	1106	6096	19.05	14	165	5.6	7,098	10,293	10,293
EA-70003	SA-179	486	4877	19.05	14	65.5	6.6	2,574	3,732	7,464
EA-75001 AB	SA-213-316	530	4877	19.05	16	115	8	2,221	3,221	9,662
EA-75001 C	SA-179	530	4877	19.05	14	115	8	2,776	4,026	12,077

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

8.3 Aplicaciones de otros materiales

Debido a que la tecnología requiere de materiales con una variedad de propiedades y con un bajo costo, se ha tenido un gran avance en el mejoramiento y obtención de nuevos materiales para la industria en general.

Un ejemplo de materiales que han sido mejorados para aplicaciones donde existen ambientes altamente corrosivos son los aceros dúplex y los aceros microaleados, y que poco a poco se esta tratando de introducir a la industria petrolera mexicana, debido a las características que poseen para desempeñar una buena función en los servicios de refinación del petróleo.

8.3.1 Aplicaciones de los aceros dúplex

Las propiedades de los aceros dúplex son muy sensibles a variaciones en la composición química, especialmente de cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno. El molibdeno y el nitrógeno son importantes en determinar la resistencia a la corrosión por picadura y grietas, mientras que el níquel es fundamental para mantener el equilibrio ferrita/austenita de la aleación.

Los aceros dúplex 2304, 2205 y 2507 se pueden emplear en los tubos de transferencia de acuerdo a las características que presentan contra determinadas sustancias corrosivas que se encuentran en los servicios para el procesado del petróleo.

Dúplex 2304. Pertenece al grupo de aceros dúplex sin Molibdeno, combina las propiedades de los aceros ferríticos y austeníticos. Su alto contenido de cromo le proporciona resistencia a la corrosión por picadura, por grietas, corrosión uniforme y a la corrosión bajo tensión, que se presentan en los servicios con agua de mar como medio de enfriamiento y para plantas agotadoras de aguas amargas.

La resistencia a la corrosión uniforme, en ácido sulfúrico, es superior a la del acero 316, como se puede apreciar en las curvas de isocorrosión a 0.1 mm/año, como se muestra en la figura 8.2.



Figura 8.2 Curvas de isocorrosión a 0.1 mm/año de los aceros 2304, 316 y 304

La resistencia a la corrosión por picadura se expresa por la temperatura crítica (CPT) a la cual y sobre la cual se producen picaduras. Ésa depende del contenido de cromo, molibdeno y nitrógeno. La figura 8.3 muestra el comportamiento de varios materiales frente a una disolución de cloruro de sodio 58.5 g/L.

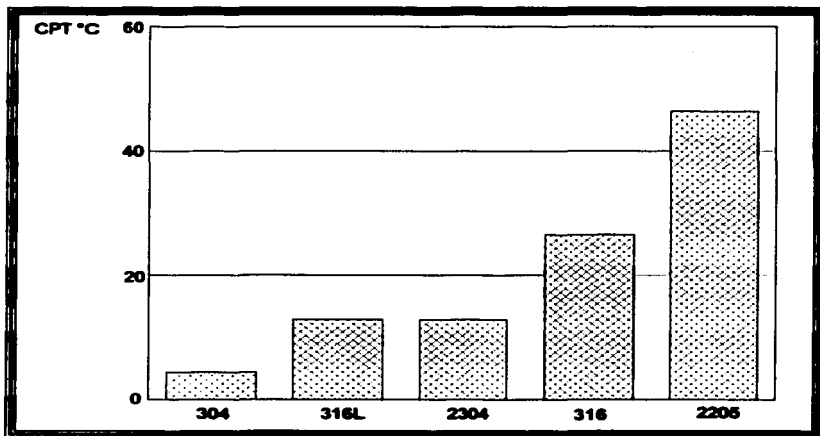


Figura 8.3 Comportamiento de aceros inoxidable y aceros dúplex ante disolución de cloruro de sodio 58.5 g/L.

En comparación con los aceros inoxidables austeníticos, el acero 2304 debido a su estructura es más resistente en ambientes con contenidos de cloruro que producen corrosión bajo esfuerzo a altas temperaturas, por lo que se recomienda sustituirse por los aceros 304 y/o 316 debido a su alto esfuerzo de 627 MPa (91000 lb/pulg²) para este tipo de ambiente, ya que los aceros inoxidables mencionados solo soportan hasta 515 MPa (75000 lb pulg²).

También se recomienda su empleo debido al bajo contenido de carbono para evitar precipitación de carburos y nitruros de cromo, en los límites de grano generando corrosión intergranular durante la soldadura, ya que la austenita se restituye después de la soldadura para mantener el equilibrio de la aleación.

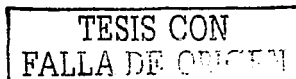
De esta manera, los aceros dúplex 2304 se emplean en los tubos de cambiadores de calor donde se presentan ambientes con contenidos de cloruros para resistir corrosión bajo esfuerzo y sustituirse por aceros inoxidable 304, 304L, 316 ó 316L, cuando se utiliza acero al carbono en la envolvente, así como en tuberías y en líneas de flujo costeras.

Dúplex 2205. Pertenece al grupo de los aceros dúplex 22Cr con un 3% de molibdeno y un 0.17% de nitrógeno.

El contenido de cromo, níquel y molibdeno le proporciona una gran resistencia a la corrosión uniforme, por picadura y grietas, también presenta una gran resistencia a la corrosión bajo esfuerzo en ambientes de sulfuro de hidrógeno.

Su resistencia mecánica es aproximadamente el doble de la de un acero inoxidable austenítico, lo que permite utilizar espesores menores y economizar en material.

Este material es recomendado para ambientes que contengan presencia de ácidos reductores diluidos como el ácido sulfúrico y ácidos oxidantes en concentración media a alta, como se aprecia en la tabla 8.1. Es resistente también a los ácidos orgánicos diluidos pero a mayores concentraciones y altas temperaturas se debe tener precaución.



CAPÍTULO 8 SELECCIÓN DE MATERIALES EN PLANTAS DE PROCESO

Mientras que los aceros inoxidables ferríticos son prácticamente inmunes al cracking causado por cloruros, los aceros inoxidables austeníticos que contienen níquel son muy susceptibles a este tipo de corrosión.

Los aceros dúplex se comportan en forma intermedia, en la fase ferrita del acero 2205 que contiene menor cantidad de níquel que la fase austenítica que es la que le da la resistencia a la corrosión bajo esfuerzo por cloruro, siendo susceptible superior a la serie 300 de los inoxidables austeníticos.

Por ejemplo, con una disolución de cloruro de litio 33% a ebullición el 304L falló a las 96 Hrs y el 2205 pasó las 1000 Hrs.

Tabla 8.1 Velocidad de corrosión ante ácidos reductores y oxidantes.

Disolución a ebullición	Velocidad corrosión mm/año			
	316		2205	
	Base	Soldadura	Base	Soldadura
Acido acético 20%	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Acido fórmico 45%	0.60	0.53	0.01	0.01
Acido clorhídrico 1%	0.02	1.61	0.02	0.02
Acido nítrico 1%	0.56	0.46	0.52	0.49
Acido oxálico 10%	1.22	1.13	0.20	0.13
Acido fosfórico 20%	0.02	0.03	0.02	0.03
Bisulfato sódico 10%	1.62	1.43	0.65	0.51
Hidróxido sódico 50%	1.97	2.17	0.61	0.57
Acido sulfámico 10%	3.15	3.03	0.56	0.44
Acido sulfúrico 10%	16.1	16.7	5.23	5.08

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 8 SELECCIÓN DE MATERIALES EN PLANTAS DE PROCESO

Este tipo de acero puede emplearse en los tubos para desalinizar petróleo crudo, para el tratamiento de gas amargo, de aguas residuales y agua de enfriamiento, en las tuberías de producción de la industria de petróleo y gas.

También es recomendable para los tanques presurizados y tuberías en industria petroquímica para producción de ácidos orgánicos y cloruro de amonio, así como para sistemas de enfriamiento con agua salada, ácido sulfúrico diluido y en presencia de otros ácidos reductores.

Debido a su bajo contenido de carbono tiene una gran resistencia a la corrosión intergranular. Haciendo un comparativo de las velocidades de corrosión de 1.16 mm/año para el 316 y 0.52 mm/año para el 2205, lo hace factible para la utilización en los ambientes mencionados.

Esto se aprecia también en pruebas con cloruro de sodio con 58.5 g/L donde la temperatura crítica de picadura es de 50°C a comparación de los 26°C de un inoxidable 316. Se puede incrementar la resistencia a la corrosión por picaduras y por grietas al aumentar el contenido de cromo, molibdeno y níquel.

Dúplex 2507. Pertenece al grupo de los aceros dúplex 25Cr o superdúplex con un 4% de molibdeno y un 0.27% de nitrógeno. El mayor contenido de cromo, níquel y molibdeno le proporcionan una mayor resistencia a la corrosión uniforme, corrosión por picadura y grietas, así como una buena resistencia en ambientes de cloruros superior al dúplex 2205, al 316 y 317.

Tiene una excelente resistencia a la corrosión en ambientes de ácidos inorgánicos y ácidos orgánicos como el ácido fórmico y el acético.

En ácido sulfúrico diluido, contaminado con 2000 ppm de cloruro, éste acero dúplex tiene una resistencia a la corrosión mayor (hasta 20% de ácido) que el acero 904L utilizado especialmente para el ácido sulfúrico puro y al acero 254SMO, hasta 17% de ácido, como se puede apreciar en las curvas de isocorrosión de la figura 8.4.

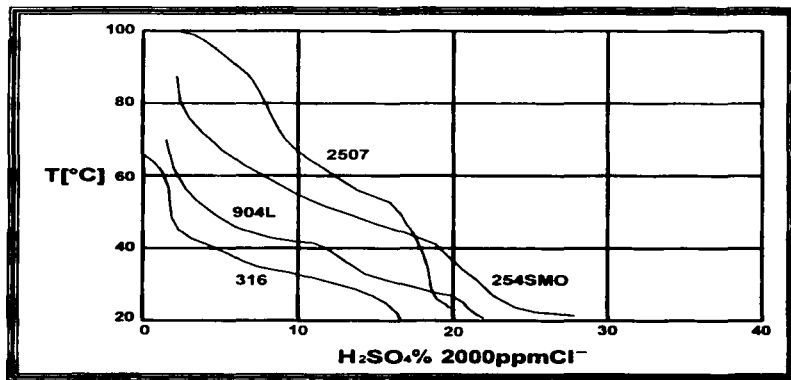


Figura 8.4 Curvas de isocorrosión de los aceros 2507, 254SMO, 904L y 316

En pruebas realizadas con cloruro de sodio con 58.5 g/L, el acero 2507 tiene una temperatura crítica de picadura de 90°C igual que el 254SMO, pero superior a los 60°C del 904L, 50°C del 2205 y 18°C del 316L.

CAPÍTULO 8 SELECCIÓN DE MATERIALES EN PLANTAS DE PROCESO

Su resistencia a la picadura por cloruros se debe a que se tiene un contenido más elevado de cromo, molibdeno y níquel.

El cloruro ocasiona corrosión bajo esfuerzo especialmente a alta temperatura en aceros inoxidable austeníticos, pero el acero 2507 por su estructura dúplex es mucho más resistente a este tipo de ataque que un acero austenítico.

También en ambientes de cloruro con sulfuro de hidrógeno que conduce a una corrosión bajo esfuerzo en la producción de petróleo y gas natural, generalmente se tiene una buena resistencia teniendo en consideración que debe estar a una temperatura por debajo de 232°C y con una presión de sulfuro de hidrógeno por debajo de 100 mbar.

De esta manera, el acero dúplex 2507 es recomendado para emplearse en estructuras en ambientes marinos (agua de mar), equipos purificadores de gases de combustión, sistemas de agua contra incendio en plataformas de perforación, especialmente en el haz de tubos de cambiadores de calor que empleen agua de mar o que estén expuestas a concentraciones elevadas de cloruros como medio de enfriamiento como en las plantas desalinizadoras.

También son aplicados en servicios para la producción de gas natural donde este presente la combinación de cloruro con sulfuro de hidrógeno, en la tubería para evaporadores de sales corrosivas como cloruros, sulfatos y carbonatos, en tuberías que se encuentren en ambientes con sustancias con un elevado contenido de cloruros o contaminadas con ácido clorhídrico.

8.3.2 Aplicación de los aceros microaleados

Para los aceros de la gama HSLA, el endurecimiento obtenido por precipitación y reducción del tamaño de los granos permite alcanzar altos niveles de resistencia y limitar al mismo tiempo los contenidos en elementos de aleación, lo que favorece las propiedades funcionales tales como soldabilidad o selección del revestimiento.

No presentan un ablandamiento en las zonas soldadas ni aumento de los tamaños de grano, por lo que se pueden emplear para piezas interiores de estructuras como refuerzo. Poseen un punto de fluencia superior a los 4925 kg/cm^2 (70000 lb/pulg^2), por lo que pueden ser aplicados en ductos donde se opere con presiones superiores a los 112 kg/cm^2 (1600 lb/pulg^2). También poseen excelentes propiedades de conformación en frío y resistencia a la fractura frágil a baja temperatura (a partir de la calidad 320).

Toda la gama de aceros HSLA se caracteriza por una buena resistencia a la fatiga y una buena resistencia al choque. Sus características mecánicas permiten aligerar piezas de refuerzo y de estructura. La gama de aceros HSLA se componen de cuatro calidades de laminado en caliente y cinco calidades de laminado en frío identificadas por su nivel de límite mínimo garantizado entre 240 y 400 Mpa para los laminados en frío y entre 320 y 700 Mpa para los laminados en caliente.

Son empleados principalmente en ambientes a bajas temperaturas para ductos de transporte de gas y petróleo, así como para servicios con gas amargo y son ideales para emplearse en ambientes con ácido sulfhídrico. Para esto debe de reducirse las impurezas como el azufre, nitrógeno y fósforo, para evitar que se genere un agrietamiento en los servicios mencionados.

CAPÍTULO 8 SELECCIÓN DE MATERIALES EN PLANTAS DE PROCESO

Debido a que se tiene que realizar un control de contenido de carbono al adicionar elementos de microaleación, como se aprecia en la tabla 8.2, pueden resistir el agrietamiento inducido por hidrógeno y a la corrosión bajo esfuerzo. De esta manera se puede recomendar para ambientes con ácido fluorhídrico (HF), que es el principal generador de hidrógeno

Tabla 8.2 Gama de aceros HSLA laminados en frío y en caliente.

Calidad	C máx	Mn máx.	Si máx.	C _{eq.} máx.
Laminado en frío				
HSLA 240	0.08	0.50	0.04	0.17
HSLA 280	0.08	0.50	0.04	0.17
HSLA 320	0.08	0.50	0.04	0.17
HSLA 360	0.08	0.90	0.35	0.29
HSLA 400	0.12	1.60	0.15	0.41
Laminado en caliente				
HSLA 320	0.08	0.50	0.03	0.17
HSLA 360	0.08	0.60	0.03	0.19
HSLA 420	0.08	0.60	0.03	0.19
HSLA 500	0.09	1.5	0.03	0.35

CONCLUSIONES

De acuerdo a las características que muestran los aceros dúplex y los aceros microaleados ante los materiales que se utilizan actualmente bajo ambientes muy corrosivos presentes en los procesos de refinación del petróleo, se puede tener una reducción óptima de la aparición de daños prematuros en los cambiadores de calor viéndose reflejada en los siguientes aspectos:

- Aumento del tiempo de vida útil del equipo.
- Evitar la reposición temprana del equipo.
- Disminución de los paros en la producción.
- Disminución de la pérdida de eficiencia por ensuciamiento.
- Evitar la contaminación del producto.
- Evitar daños a otros equipos.
- Disminución de accidentes.
- Disminución en los costos de mantenimiento.

Los aceros microaleados proporcionan una buena resistencia a la fatiga y al choque por lo que los hace adecuados para evitar daños debido a las vibraciones generadas durante el servicio de los equipos.

Como poseen una mayor tenacidad se pueden emplear en servicios a bajas temperaturas, en donde aceros convencionales no poseen una buena resistencia.

Debido a sus características mecánicas, es posible disminuir los tamaños y pesos de algunas piezas, soportando altas presiones sin tener un espesor relativamente grande. Poseen una buena resistencia a la corrosión por agrietamiento y a la corrosión bajo esfuerzos en comparación con los aceros al carbono.

El único inconveniente es que son muy costosos debido a que se necesita un proceso cuidadoso para el control de la temperatura y las velocidades de enfriamiento, que le dan las propiedades mecánicas requeridas, esto se puede compensar con la vida útil a comparación de un acero convencional en servicio.

El uso de los aceros dúplex se ha tomado en consideración para la aplicación en las refineras del petróleo, debido a las características que poseen ante ataques corrosivos severos en comparación con los aceros inoxidables normales, en especial los aceros inoxidables austeníticos que son los que se usan actualmente en la construcción de los cambiadores de calor.

Los aceros inoxidables dúplex poseen una resistencia más elevada al ataque por corrosión bajo tensión debido a cloruros sobre los aceros austeníticos, como el 304L y 316L. Los aceros dúplex ofrecen resistencia a la corrosión general y por picado, mejor que la del tipo 316L en diversos ambientes corrosivos, buena resistencia a la corrosión intergranular por el bajo contenido de carbono, una buena resistencia a la erosión y abrasión.

Pueden trabajarse en frío, pero con mayor dificultad que un acero austenítico porque posee un límite elástico mayor, por tal motivo, se recomienda un recocido si la deformación en frío excede el 10%. Se puede aplicar un tratamiento térmico para liberar tensiones en el rango 500-600°C (1022-1112°F).

También pueden ser formados en caliente, pero debido a que son susceptibles a la precipitación de carburos entre los granos, más que los aceros austeníticos, es recomendable darles un recocido (1020-1100°C) y templado, debido a que si se sometió a un calentamiento de 700-1000°C (1292-1832°F) puede haber formación de fase sigma y en el rango 325-520°C (617-968°F) se puede tomar quebradizo.

Sin embargo en las operaciones normales de soldadura y calentamiento, la microestructura no forma ningún precipitado o fase que pueda producir fragilidad, por lo que tiene una buena soldabilidad debido a que posee un bajo contenido de carbono y el contenido de nitrógeno mejora la resistencia a la corrosión de las soldaduras, sin necesitar un tratamiento térmico después de soldar.

Estos materiales cubren las exigencias demandadas y las superan en un determinado grado para poder ser empleado en los diversos servicios a los que se encuentran expuestos los materiales que actualmente se utilizan, por lo que se podría tener una gran disminución en las fallas ocasionadas por los ataques corrosivos, ahorrándose más tiempo y dinero cuando se realicen paros para el cambio o repuesto de alguna parte integrante del equipo o del mismo equipo.

Los cambiadores de calor, así como otros equipos empleados en la refinación del petróleo en México, no han empleado el uso de estos materiales mejorados en comparación con otros países, por lo que se ha comenzado a considerar las ventajas que poseen sobre otros materiales en ambientes más severos.

De esta manera, mediante los requisitos necesarios expuestos por las normas correspondientes y los factores a los que se exponen los materiales durante servicio, se ha establecido la recomendación de los materiales que operan de forma óptima en ambientes corrosivos, así como el empleo de materiales nuevos en las mismas condiciones o condiciones más severas de corrosión, para aplicarse en la industria de proceso del petróleo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chávez Reyes, Rafael. Procesos y materiales utilizados en refinerías de petróleo. IMP, México, 2002, 145 pp.
2. Mangonon, Pat L. Ciencia de materiales. Selección y diseño. 1ª ed. Edit. Prentice Hall, México, 2001, 840 pp.
3. Janna, William S.. Engineering Heat Transfer. 2ª ed. Library of congress cataloging -in- publication data, U.S.A., 2000, 683 pp.
4. Groover, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas. Edit. Prentice Hall, México, 1997, 1062 pp.
5. Mott, Robert L. Resistencia de materiales aplicada. 3ª ed. Edit. Prentice Hall, México, 1996, 640 pp.
6. Malishev, Nikolaiev Shuvalov. Tecnología de los metales. 8ª ed. Edit. Limusa, México, 1994, 431 pp.
7. Askeland, Donald R. The science and engineering of materials. 3ª ed. PWS Publishing Company, U.S.A., 1994, 812 pp.
8. Budinski, Kenneth G. Engineering Materials. Properties and selection. 4ª ed. Edit. Prentice Hall, 1992, 708 pp.

9. Walas, S. Chemical Process Equipment-Selection and Design. Butherworth, Boston, 1990 pp.
10. Baumeister, Theodore. Manual del Ingeniero Mecánico. McGraw-Hill, México, 1982, 996 pp.
11. Kern, Roy F. y Suess, Manfred E. Steel selection: A guide for improving performance and profits. Intercience Publication, U.S.A., 1979, 445 pp.
12. Groyzman y N. Erdman. "A study of corrosion of mild steel in mixtures of petroleum distillates and electrolytes". Num. 12, vol. 56, Corrosion engineering section. NACE International, Diciembre de 2000
13. H. U. Schutt y P.R. Rhodes. "Corrosion in an Aqueous hydrogen sulfide, ammonia, and oxygen sistem". Num. 12, Vol 52, , Corrosion engineering section. NACE International, Diciembre de 1996.
14. Corrosion. Vol. 57, Núm. 2. Febrero 2001 pp. 165-173

Otras referencias

15. Cofré Guerra, Pablo. Boletín técnico: Nomenclatura de aceros. Mayo 2000 <<http://www.fastpack.cl>> [Fecha de consulta: 15 de Julio de 2002]
16. Cofré Guerra, Pablo. Boletín técnico: Aceros y aleaciones para ácido sulfúrico. Enero 2000 <<http://www.fastpack.cl>> [Fecha de consulta: 20 de Julio de 2002]

17. Asociación Mexicana del Acero Inoxidable, A. C. Normalización de los aceros. <<http://www.amai.com.mx/carácter.htm>> [Fecha de consulta: 25 de Julio de 2002]
18. Distribuidora metálica, S.A. de C.V. Tablas de corrosión y propiedades de aceros inoxidables. <<http://www.metalica.com.mx/inox/caracterinox.html>> [Fecha de consulta: 8 de Agosto de 2002]
19. Acerind, S.C. Corrosión. Enero 2002 <<http://www.inoxidable.com/corrosion.htm>> [Fecha de consulta: 20 de Agosto de 2002]
20. Cofré Guerra, Pablo. Acero especiales. Agosto 1999 <<http://www.fastpack.cl>> [Fecha de consulta: 10 de Octubre de 2002]
21. Cofré Guerra, Pablo. Boletín técnico: Aceros dúplex. Septiembre 1999 <<http://www.fastpack.cl>> [Fecha de consulta: 10 de Febrero de 2003]
22. FAE, S.A. Tubos inoxidables. Nuevos materiales dúplex. Octubre 2001 <<http://www.fae.com.ar/revista/middle.htm>> [Fecha de consulta: 20 de Marzo de 2003]