

5  
2eje.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"ZARAGOZA"**

**"CRITERIOS DE SELECCION DE MATERIALES  
PARA EL MANEJO DE FLUIDOS  
CORROSIVOS"**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO QUIMICO**  
**P R E S E N T A N :**

**FRANCISCO VIDAL CABALLERO DOMINGUEZ**  
**JOSE LUIS RUIZ JIMENEZ**



**MEXICO, D. F.**

**TESIS CON  
SELLA DE ORIGEN**

**1994**



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 está 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES "ZARAGOZA"

JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: Nº 82-097/140/92


SRES.  
FRANCISCO VIDAL CABALLERO DOMINGUEZ y  
JOSE LUIS RUIZ JIMENEZ,  
P R E S E N T E.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el examen profesional, les comunico que la Jefatura a su cargo ha propuesto la siguiente designación:

PRESIDENTE:	ING. RENE DE LA ROSA MEDINA
VOCAL:	M. en C. ALEJANDRO RUIZ CANCINO
SECRETARIO:	ING. FERNANDO HERRERA JUAREZ
SUPLENTE:	ING. JOSE LUIS MACIAS PEREZ
SUPLENTE:	QUIM. ARTURO EDUARDO CARO FLORES

A T E N T A M E N T E  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México, D.F., 23 de junio de 1992.

  
M. en C. ALEJANDRO RUIZ CANCINO  
JEFE DE LA CARRERA DE  
INGENIERIA QUIMICA

## **AGRADECIMIENTOS** **( FRANCISCO VIDAL )**

**A MI PADRE: VIDAL CABALLERO**

Que al igual que dios, está en todas partes.

**A MI MADRE : FIDELIA DOMINGUEZ**

Cuyo coraje y orgullo fue transformado en amor a la familia.

**A SABINO CABALLERO DOMINGUEZ :**

Siempre apoyandome, cumpliendo la función de hermano y amigo.

**A MIS TIOS CLARA Y VIRGILIO, FAM. SANCHEZ, FAM. PEREA  
A TODOS MIS AMIGOS Y CONOCIDOS.**

**A MI ENEP ZARAGOZA :**

Donde orgullosamente estudié.

# AGRADECIMIENTOS

( JOSE LUIS )

## **A MIS PADRES :**

Les dedico el presente trabajo, con mi más sincero agradecimiento por todos sus esfuerzos realizados y todo su apoyo brindado.

Y mi admiración por su ejemplo de trabajo, dedicación, tesón y sacrificio para apoyar e impulsar a cada uno de sus hijos y formar una gran familia.

## **A MIS HERMANOS: NAZARIO, MIGUEL ANGEL, MANUEL, CRISTINA Y CAROLINA**

Que me han impulsado en cada una de las actividades que he realizado, les doy las gracias y hago votos por que logren todas sus metas y deseos en la vida.

## **A LA FAMILIA RUIZ CORTEZ :**

Mis tíos y primos con los cuales he convivido toda la vida, teniendo la confianza para hablar no como dos familias sino como una sola.

Mi enorme reconocimiento a cada uno.

## **AMIS SOBRINOS: OSCAR, MAURICIO, MAREL, KAREN, ALEJANDRA Y ALAN ADRIAN**

Esperando que este trabajo sirva de aliciente para ellos.

Deseo de todo corazón que tengan un bello futuro y logren sus más grandes anhelos.

## **A TODA LA FAMILIA RUIZ :**

## **A TODA LA FAMILIA SANCHEZ :**

## **A TODA LA FAMILIA JIMENEZ :**

Gracias a todos aquellos tíos, primos y demás familiares que de una u otra forma me han apoyado e impulsado.

## **A MARIA ELENA :**

La persona que más apoyo me brindo en la etapa de estudiante, no solo como amiga sino también como compañera, a la cual le debo mucho de lo que se en la vida y admiro su inteligencia, dedicación, caracter y hambre de superación.

Mi más profundo respeto, agradecimiento y un ferviente deseo por que tenga salud, triunfos y amor en la vida.

## **A LA FAMILIA CABALLERO DOMINGUEZ :**

En especial al Sr. Vidal Caballero (qepd), que desde donde se encuentra siempre cuida y bendice a su esposa e hijo.

**A TODOS MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS DE TRABAJO:**

Ing. Juan Rodriguez Marín, Ing. Juan A. Castro Arambula,  
Ing. Monica Orozco Melo, Sr. Carlos Aldeco L., Jose Manuel  
Garcia G., Biol. Ma. Concepción Bastida G., Ing. Jose F.  
Jiménez, Irma Pedraza, Luz Ma. Ordoñez, Ing. Francisco  
Miranda R., Ing. Eduardo Contreras F., Ing. Andres Martinez  
P., Ing Antonio Cano M., Jesus Amaya.

Por sus motivaciones, palabras de aliento y aportaciones al  
presente trabajo.

**A TODOS MIS AMIGOS DE LA ENEP ZARAGOZA :**

Jose Luis Marquez F., Jose Ma. Pedroza G., Sergio Miguel, Ricardo  
Ramirez Q., Miriam Gpe., Salvador Quiroz V., Manuel de Jesus Molina  
S., Horacio Sanchez A., Dafne Canto V., Sergio Torres H., Gerardo  
Fraga M., Ing. Jose de Jesus Garcia S., Ing. Rene de la Mora Medina,  
Ing. Jose bermudez, Gerardo Gomez A., Eliceo Serrano M., Flora  
Isabel, Guillermina Gonzalez, Raymundo García, Guillermina Mendoza,  
Heriberto Perez G., Domingo Romero P.

En honor a los grandes momentos vividos como estudiante.

**A EUGENIA Y JOSE MANUEL :**

Dios los bendiga y cuide siempre.

Y una disculpa para aquellos de los cuales me olvide en este momento.

## INDICE

	Página
<b>INTRODUCCION</b>	
<b>I GENERALIDADES</b> .....	3
1.1 DEFINICION .....	3
1.2 ANTECEDENTES .....	4
1.3 FUNDAMENTOS DE LA CORROSION .....	6
<b>II TIPOS Y FORMAS DE CORROSION</b> .....	28
2.1 CLASIFICACION DE LA CORROSION .....	28
2.2 CORROSION UNIFORME .....	28
2.3 CORROSION NO UNIFORME .....	30
<b>III METODOS DE PREVENCION</b> .....	41
3.1 MODIFICACIONES EN LAS CONDICIONES DE OPERACION ...	41
3.2 DISEÑO .....	42
3.3 PROTECCION CATODICA Y ANODICA .....	43
3.4 RECUBRIMIENTOS .....	52
3.5 INHIBIDORES .....	54
<b>IV INDICE DE FLUIDOS</b> .....	61
4.1 ENFOQUE .....	61
4.2 ACIDOS .....	61
4.3 SOLVENTES ORGANICOS .....	67
4.4 BASES .....	67
4.5 AGUA .....	68
4.6 SALES Y METALES FUNDIDOS .....	74
<b>V SELECCION DE MATERIALES</b> .....	76
5.1 FUNDAMENTO .....	76
5.2 ACERO INOXIDABLE .....	76
5.3 TITANIO .....	85
5.4 NIQUEL .....	90
5.5 COBRE .....	92
5.6 ALUMINIO .....	94
5.7 PLOMO .....	95
5.8 METALES VARIOS .....	99
5.9 PLASTICOS .....	102

<b>VI EQUIPOS DE PROCESO</b> .....	<b>105</b>
6.1 MONITOREO DE LA CORROSION. ....	105
6.2 CORROSION EN SCRUBBERS .....	117
6.3 RECIPIENTES Y TANQUES .....	123
6.4 INTERCAMBIADORES DE CALOR .....	133
6.5 TORRES DE ENFRIAMIENTO. ....	136
6.6 EVAPORADORES .....	140
6.7 TUBERIAS .....	141
6.8 CALDERAS .....	142
6.9 BOMBAS .....	144
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>147</b>
<b>APENDICE A</b> .....	<b>151</b>
<b>APENDICE B</b> .....	<b>161</b>
<b>APENDICE C</b> .....	<b>178</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	
<b>GLOSARIO</b>	



## **Introducción.**

La corrosión se presenta como un problema que en muchos países ha pasado sin un interés adecuado, esto es debido principalmente, a que las naciones en vías de desarrollo; aplican solo el mantenimiento correctivo, por lo cual los recursos no son usados para el fortalecimiento y la continuidad de la producción en sus plantas de proceso. No obstante, los países con tecnología de punta, han estimado que la corrosión cuesta entre el 2 y 3% del producto interno bruto; se calcula un ahorro de una cuarta parte de su valor, si se tiene el conocimiento de como poder atacar los efectos de éste fenómeno.

La principal característica que presenta la corrosión, es la infinidad de variables que forman parte de la misma, desde las condiciones de operación de los procesos químicos (temperatura, presión, pH, aereación, concentración etc.), hasta las impurezas que contienen las materias primas, los materiales y su calidad de fundición o forjamiento, los cuales son usados para fabricar el equipo de proceso.

Estos factores en una variedad amplísima de combinaciones han afectado los materiales utilizados en la industria, y hasta el momento, no se pueden prevenir todos los efectos que la corrosión produce.

Se cuenta con muchas investigaciones en laboratorio, sin embargo, al escalar éstas a macroniveles, no predicen el comportamiento real y la corrosión sigue causando que las plantas paren.

La mayoría de referencias tratan aspectos termodinámicos o fisicoquímicos, pero estos, no hacen una interfase sólida con la aplicación industrial.

A partir de lo descrito, el objetivo principal del presente trabajo es proporcionar criterios que permitan resolver problemas de corrosión; esto es, disminuir su velocidad mientras el equipo funcione y/o proporcionar las mejores alternativas en cuanto a la selección de materiales para un adecuado diseño.

Estos criterios son tomados a partir de fuentes bibliográficas de autores con amplia experiencia en el fenómeno (Henthorne, Fontana y Gleason, principalmente) y la aplicación que se ha observado en el campo laboral, de esta forma se proporciona un criterio confiable, el cual, puede ser guía para los lectores; y que en ciertas condiciones, pueda ser mejorado por los mismos.

Para lograr el objetivo enunciado anteriormente, el trabajo se ha dividido en seis capítulos.

El capítulo uno aborda la definición del problema, algunos antecedentes históricos, y los fundamentos necesarios para de esta forma, conocer cuales son las principales variables y cuales son las reacciones que pueden ocurrir, cuando un material es atacado por un fluido corrosivo.

El capítulo dos muestra como se clasifica la corrosión, y cuales son las formas más comunes que se presentan en la industria química; así, permite conocer algunas características que diagnostiquen que tipo de corrosión está ocurriendo.

El capítulo tres proporciona los conocimientos para prevenir la corrosión, tanto modificaciones de diseño y operación; como el uso de recubrimientos e inhibidores.

El capítulo cuatro describe profundamente las características que presentan los corrosivos más comunes en la industria, además proporciona los conocimientos necesarios para poder combatir los efectos de los mismos.

El capítulo cinco reseña los materiales de construcción más usados; permite conocer sus regulaciones, la proporción de los diversos elementos de una determinada aleación y algunas características mecánicas.

El capítulo seis es la integración de los cinco capítulos anteriores, ya que engloba los fundamentos del fenómeno, su forma de prevenirse o disminuirse, los materiales a usarse para un determinado fluido, de acuerdo a las condiciones de operación del equipo en cuestión.

Las conclusiones y recomendaciones de este trabajo se formularon a partir de lo investigado contra las experiencias en el ejercicio profesional de los presentes.

Existen de la misma manera 3 apéndices; el apéndice A contiene un ejemplo específico en donde se aplican los criterios mencionados en el trabajo. El B incluye tablas de selección de materiales para ciertos fluidos; el C presenta información disponible sobre costos de las aleaciones más importantes.

Asimismo, se presenta un glosario y la bibliografía necesaria para profundizar sobre un tema en especial; de esta forma, podrá ser consultado por personas del área de la ingeniería química y de otras ramas afines, como la metalurgia y la mecánica.

---

**CAPITULO****UNO.**

---

**Generalidades.** <sup>(41)</sup>**1.1 DEFINICION.**

La corrosión puede ser definida en varias formas:

- 1) Es la destrucción o el deterioro de un material, el cual reacciona con su ambiente.
- 2) Es la destrucción de materiales por otro medio diferente al esfuerzo mecánico.
- 3) Es metalurgia extractiva en reversa.

Las definiciones 1 y 2 son preferibles porque estas consideran cerámicas, plásticos, gomas y otros materiales no mecánicos.

Por ejemplo, el deterioro de la pintura y la goma por la luz solar o agentes químicos, el deterioro del aislamiento de un horno elaborador de acero, el ataque sobre un metal por otro metal fundido (corrosión por metal líquido) todos son considerados en la industria, aunque algunos insistan en que la corrosión se restringe solo a metales, por ello se prefiere un enfoque mas amplio.

La definicion 3 es referida a la obtención de un metal de una mina y refinado o aleado a otro metal para su uso.

El mineral de Hierro contiene óxidos y cuando se escoria el acero, se forma óxido de hierro hidratado. La escoriación es el término usado para la corrosión del hierro y el acero, muchos otros metales forman sus óxidos cuando ocurre la corrosión.

Prácticamente todos los ambientes son corrosivos en cierto grado. Algunos ejemplos son el aire, el medio ambiente, aguas salinas, destiladas, y minerales; atmósferas industriales, urbanas y rurales; vapor y otros gases tales como cloro, amoníaco, sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre y gases combustibles; ácidos minerales, clorhídrico, sulfúrico y nítrico; ácidos orgánicos como acético y fórmico; álcalis, sales, solventes,

aceites vegetales y de petróleo; y una variedad de productos alimenticios. En general, los materiales inorgánicos son más corrosivos que los orgánicos, por ejemplo, la corrosión en la industria petrolera se presenta en mayor grado por cloruro de sodio, azufre, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y agua, más que por el petróleo, las naftas o gasolinas.

La tendencia en la industria química de proceso hacia las temperaturas y presiones altas, ha hecho posible nuevos procesos o mejoras a viejos procesos, por ejemplo, mejores rendimientos, mayor rapidez o menor costo de producción.

Esto también aplica para la producción de energía, incluyendo la energía nuclear, los misiles y muchos otros métodos y procesos, las temperaturas y presiones altas usualmente involucran condiciones más severas de corrosión, muchas de las operaciones de hoy en día no habrían sido posibles sin el uso de materiales resistentes a la corrosión, lo cual puede ser benéfico o deseable en algunos casos, por ejemplo, en el maquinado químico y/o molienda química ampliamente usado en la aviación y otras aplicaciones en donde áreas no deseadas son expuestas a los ácidos, y el exceso del metal es disuelto. Este proceso es adoptado por economía cuando las partes son duras y difíciles de limar por métodos convencionales. El anodizado de aluminio es otro proceso usado como corrosión benéfica, se usa para obtener una mejor apariencia además de la protección del material contra la corrosión en la superficie.

## 1.2 ANTECEDENTES. <sup>(20)</sup>

Los primeros metales en estado natural no creaban problemas graves de corrosión. Pero con la adopción del hierro se presentaron los primeros problemas de corrosión significativa.

En 1790, Keir había descubierto que el hierro cuando se colocaba en ácido nítrico concentrado; quedaba alterado en sus propiedades, y así, resistía al ácido nítrico diluido, a pesar de que éste atacaba vigorosamente al hierro que no había sido tratado con ácido concentrado.

Esta alteración de las propiedades que persistían una vez concluido el tratamiento, intrigaba a Faraday y Schonbein.

Este último, propuso que el Hierro en esta extraña condición no reactiva, se llamara "Hierro Pasivo".

Vernon en 1935, demostró que el ácido sulfúrico es el principal promotor de la corrosión en condiciones atmosféricas y no el ácido carbónico como se pensaba.

Los Americanos Walker, Cederholm y Bent en 1907 y el ingles Tilden en 1908, dieron amplias teorías de la corrosión por líquidos neutros, reconociendo la función del oxígeno como activador catódico.

Los experimentos de los investigadores americanos Corey y Finneban en 1939 y de Kay Thompson en 1940, daban a entender que el hierro es atacado lentamente por el agua excenta de oxígeno, con desprendimiento de hidrógeno, aunque en este caso, el producto final no es un orin amarillo ( hidróxido férrico ) sino magnetita granular negra y a veces hidróxido ferroso.

Heyn y Bauer en 1908 y 1910, fueron los primeros que realizaron mediciones comprensibles, de la velocidad de corrosión en numerosos líquidos, comprendiendo el hierro y el acero en diferentes condiciones, tanto solos como en contacto con otros metales.

En 1874 Sir Humphrey Davy había propuesto la conexión con hierro o zinc como medio para proteger el cobre contra el agua de mar.

Otro campo de investigación que se ha desarrollado es el de la corrosión atmosférica, publicado por Vernón en 1923, radica en el principio de la humedad crítica; éste halló que frecuentemente la corrosión atmosférica aumenta cuando la humedad supera cierto valor.

Otro avance ha sido el creciente interés en la corrosión como problema económico. En 1922, Sir Robert Hadfield, de acuerdo con una cifra estimada en 1920 por el americano D. M. Buck calculó de nuevo las pérdidas por corrosión y llegó a un valor bastante mayor de 700 millones de Libras esterlinas, costo anual del desperdicio por oxidación del hierro y el acero del mundo, así como: medidas preventivas, pérdidas del metal y sustituciones necesarias.

Vernón llegó en 1956 a la conclusión de que el gasto total en Inglaterra solo incluyendo el costo de las medidas preventivas y las pérdidas del metal, eran del orden de los 600 millones de libras. En 1971, una comisión gubernamental encontró que el costo anual en esta nación era de 1365 millones de libras.

Casi todos los países en los que se lleva a cabo investigación científica tienen hoy su su propia organización de la corrosión y a intervalos regulares, celebran conferencias internacionales sobre el tema, la primera de estas fue en Londres en 1961 y la más reciente en Atenas.

Actualmente el problema radica, en la obtención de datos experimentales directos de las plantas químicas, ya que la variación de las condiciones, al tratar de obtener dichos datos puede dejar a un equipo inservible y por lo tanto, los costos son

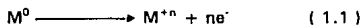
prohibitivos; por lo que actualmente se investigan sistemas expertos<sup>1</sup>.

### 1.3 FUNDAMENTOS DE LA CORROSION.

Es muy importante cuantificar la corrosión y hablar de "velocidad de corrosión", esta expresa la pérdida de peso (del material que está siendo corroído) en un determinado lapso de tiempo. Las unidades más comúnmente utilizadas son: miligramos/centímetro cuadrado-día; gramos/pulgada cuadrada-hora; y milímetros por año (comúnmente conocidos como MPY).

Uno de los principios electroquímicos básicos, en la explicación de la corrosión en los metales es el siguiente: **la velocidad de oxidación es igual a la velocidad de reducción.**

La oxidación o reacción anódica, es indicada por la pérdida de electrones esto es:

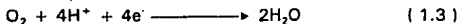


Esta ecuación indica que durante la reacción el metal M es oxidado a iones metálicos  $M^{+n}$  perdiendo n electrones.

El aumento o la ganancia de electrones es el comportamiento de una reacción catódica o reducción. Existen diversas reacciones de este tipo las más comunes son:



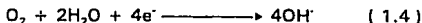
Esta reacción es conocida como la conversión de hidrógeno y es una reducción frecuente en medios ácidos.



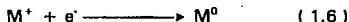
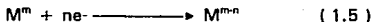
La Ec.(1.3) es la reducción de oxígeno y es muy común en ácidos. En soluciones acuosas en contacto con aire (aireación); la reducción del oxígeno ocurre de la siguiente forma:

---

1 para más información sobre los sistemas expertos se pueden consultar las referencias 22 y 89.

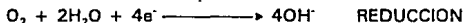
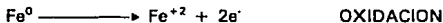


Esta reacción también se da en soluciones básicas.



La reducción de ión metálico (1.5) y la deposición metálica (1.6); son reacciones que se encuentran frecuentemente en las corrientes y líneas de proceso.

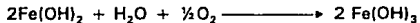
Las reacciones mencionadas tienen algo en común; su ganancia de electrones. De esta forma, siempre en las reacciones electroquímicas; existe tanto la reducción como la oxidación e igualan sus velocidades; en el caso del hierro cuando se moja y después es expuesto a la atmósfera ocurre lo siguiente:



y balanceando (Ec. de oxidación multiplicada por 2)



precipitando hidróxido de hierro II compuesto inestable en soluciones con oxígeno:

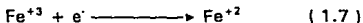


Este producto es la escoria común, presente en las líneas de vapor y que a la larga produce el picado de las tuberías. En la corrosión del equipo puede ocurrir más de

una reacción de oxidación y reducción.

Cuando materiales de zinc (u otros metales) se combinan con ácido clorhídrico en aireación, dos reacciones de reducción ocurren; la conversión de hidrógeno y la reducción de oxígeno. Ya que la velocidad de reducción debe ser igual a la velocidad de oxidación; esta última tiene que incrementarse, lo que da como resultado una disolución más rápida del zinc. Así, para disminuir la velocidad, habría que eliminar el oxígeno.

Si nuevamente se tiene el zinc en contacto con HCl comercial (el cual contiene el ión Fe III), la velocidad de corrosión es alta debido a que nuevamente existen dos reacciones catódicas; la conversión de hidrogeno y la reducción del ión férrico:



Así, para disminuir la velocidad de corrosión hay que eliminar los iones férricos.

Si la superficie del metal es protegida con pintura u otra capa no conductora; la velocidad de las reacciones catódica y anódica será ampliamente reducida.

El inhibidor de corrosión es una sustancia que adicionada en pequeñas cantidades reduce la corrosión; esto es por que interfiere a ambas reacciones.

Es importante también mencionar el aspecto termodinámico del fenómeno, el cual solo aplica en algunas ocasiones que posteriormente se discutirán.

El cambio de energía libre en sistemas electroquímicos, es calculado de la siguiente manera:

$$\Delta G = - n F E \quad (1.8)$$

n es el número de electrones que intervienen en la reacción, F es la constante de faraday y E es el potencial de celda.

Estrictamente la expresión (1.8) no aplica en problemas de corrosión, pero el signo de ésta; indica si la reacción es espontánea o no.

El potencial de celda es el voltaje que se establece cuando dos electrodos (o placas) de diferentes metales, se encuentran en una celda, separados por una



membrana porosa; estos electrodos se encuentran en equilibrio, es decir, la velocidad del metal que se disuelve (u oxida), es igual a la velocidad de deposición (o reducción) del otro metal. Cada reacción que se lleva a cabo, es llamada "media celda".

Los valores del voltaje son determinados en condiciones estandar, teniendo como referencia la reacción de media celda ( $2H + 2e = H_2$ ) con un valor de cero; la tabla 1.1 muestra los potenciales de media celda para algunas reacciones electroquímicas; esta tabla también recibe el nombre de series fem (o emf), o potenciales redox.

Es importante observar que los valores de fem pueden ser positivos o negativos, estableciendose la siguiente regla:

"En una reacción electroquímica la reacción de media celda negativa (o activa) tiende a oxidarse; y la reacción de media celda positiva (o noble) tiende a reducirse".

La tabla proporciona así, la siguiente información:

1. Si existe un par de metales unidos o aleados se puede predecir cual es más vulnerable a la corrosión (el que se encuentre con signo negativo o el que se encuentre más abajo en la clasificación de la serie fem, en dado caso que tengan signo igual). Y obviamente será más sensible al ataque de ácidos.

2. Los metales más resistentes también pueden ser atacados pero sera necesario la presencia de oxígeno (aireación) y de poderosos agentes oxidantes (lo que concuerda con lo anteriormente expuesto).

Como se ha mencionado la velocidad de oxidación es igual a la velocidad de reducción esto es:

$$r_{ox.} = r_{red.} = \frac{i_0}{nF} \quad (1.9)$$

En donde  $i_0$  (densidad de intercambio de corriente) es la corriente que pasa por los electrodos en condiciones de equilibrio; n y F ya fueron definidas  $i_0$  es un valor pequeño (ya que no hay una corriente neta) por ser conveniente pero aún así depende del tipo del metal con que se construye el electrodo. La tabla 1.2 muestra valores determinados experimentalmente de  $i_0$ .

Es necesario visualizar la diferencia de las reacciones cuando se llevan a cabo en unas celdas (en donde existe un equilibrio, y que es el estudio de la termodinámica) a lo que ocurre en una tubería o un determinado equipo (donde no hay equilibrio, la corrosión aumenta con respecto al tiempo, y que es el estudio de la cinética).

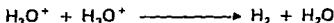
Así, en los sistemas en equilibrio se habla de un potencial con un determinado voltaje y en los sistemas que no se encuentran en equilibrio (por lo cual la corrosión existe y es un problema) existe el término **polarización**, el cual es el **potencial real**; y que tiene desviaciones con respecto a los potenciales de los sistemas en equilibrio.

Esto a su vez, conduce a que también haya diferencias de voltaje con respecto a los que presentan los sistemas en equilibrio; estas diferencias pueden ser positivas o negativas y se conocen con el nombre de **sobrevoltaje**.

En muchas ocasiones se ha optado por la polarización para evitar que los efectos de la corrosión sean devastadores.

La polarización retarda las reacciones (debido a factores físicos y químicos), y de ésta, se conocen dos tipos: por activación y por concentración.

La polarización por activación es el control de las reacciones múltiples en la interfase o frontera existente entre el metal y el electrolito (solución con iones del metal), estas reacciones son intermedias a la oxidación o reducción; así, de la Ec. 1.2 pueden existir las siguientes reacciones:



Disminuyendo la velocidad de cualquiera de estas reacciones se polariza la reacción 1.2.

La relación entre la velocidad de las reacciones controladas y el sobrevoltaje debido a la polarización por concentración es:

$$n_e = \pm B \log \frac{i}{i_0} \quad (1.10)$$

donde  $i_0$  ya fue mencionada;  $i$  es la velocidad de reducción/oxidación en términos de densidad de corriente.

Equilibrio de  
metal-ión metal

Potencial de electrodo  
vs. electrodo normal -  
de hidrógeno a 25°C.  
(VOLTS)

Au-Au <sup>+3</sup>	+1.498
Pt-Pt <sup>+2</sup>	+1.2
Pd-Pd <sup>+2</sup>	+0.987
Ag-Ag <sup>+</sup>	+0.799
Hg-Hg <sup>+2</sup>	+0.788
Cu-Cu <sup>+2</sup>	+0.337
H <sub>2</sub> -H <sup>+</sup>	0.000
Pb-Pb <sup>+2</sup>	-0.126
Sn-Sn <sup>+2</sup>	-0.136
Ni-Ni <sup>+2</sup>	-0.250
Co-Co <sup>+2</sup>	-0.277
Cd-Cd <sup>+2</sup>	-0.403
Fe-Fe <sup>+2</sup>	-0.440
Cr-Cr <sup>+3</sup>	-0.744
Zn-Zn <sup>+2</sup>	-0.763
Al-Al <sup>+3</sup>	-1.662
Mg-Mg <sup>+2</sup>	-2.363
Na-Na <sup>+</sup>	-2.714
K-K <sup>+</sup>	-2.925

\* Convención de signos recomendada por la IUPAC y manejada en pp 12.  
Fuente: Ref. 12, p.p. 367.  
Ref. 3, p.p. 700.

TABLA 1.1 SERIE FEM ESTANDAR PARA METALES.

REACCION.	ELECTRODO.	SOLUCION.	$i_0$ (A/cm <sup>2</sup> )
$2H^+ + 2e = H_2$	Al	2N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$10^{-10}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Au	1N HCl	$10^{-6}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Cu	0.1N HCl	$2 \cdot 10^{-7}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Fe	2N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$10^{-6}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Hg	1N HCl	$2 \cdot 10^{-12}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Hg	5N HCl	$4 \cdot 10^{-11}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Ni	1N HCl	$4 \cdot 10^{-6}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Pb	1N HCl	$2 \cdot 10^{-13}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Pt	1N HCl	$10^{-3}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Pd	0.6N HCl	$2 \cdot 10^{-4}$
$2H^+ + 2e = H_2$	Sn	1N HCl	$10^{-8}$
$O_2 + 4H^+ + 4e = 2H_2O$	Au	0.1N NaOH	$5 \cdot 10^{-13}$
$O_2 + 4H^+ + 4e = 2H_2O$	Pt	0.1N NaOH	$4 \cdot 10^{-13}$
$Fe^{+3} + e = Fe^{+2}$	Pt		$2 \cdot 10^{-3}$
$Ni = Ni^{+2} + 2e$	Ni	0.5N NiSO <sub>4</sub>	$10^{-6}$

Tabla 1.2 Densidad de intercambio de corriente.

fuelle : Ref. 23, pp.457

La ecuación (1.10) es llamada "ecuación de Tafel" y  $\beta$  es llamada constante de Tafel; si se grafica esta ecuación (Fig. 1.1) en escala semilogarítmica genera una función lineal (Potencial vs. velocidad de corriente con datos experimentales, líneas punteadas).

El rango de  $\beta$  se encuentra entre 0.05 y 0.15 volts, y su significado se examina en la Fig. 1.1; la curva que se muestra es muy sensitiva ya que la densidad aumenta exponencialmente con incrementos de 0.1 volts en sobrevoltaje aunque también puede disminuir en este mismo rango.

La polarización por concentración es el control de las reacciones por bajas concentraciones; nuevamente para el caso de la Ec. 1.2, si existen pocos  $H_3O^+$  en el seno del fluido, estos viajarán hacia la superficie del metal, pero al ser de baja concentración, no disolverán una gran cantidad de metal.

Si su concentración aumentara, aún así hay un límite de saturación y por lo tanto un límite de densidad de corriente por difusión  $i_L$  dado por:

$$i_L = \frac{D F C_b}{x} \quad (1.12)$$

$D$  es el coeficiente de difusión de los iones al reaccionar y  $C_b$  es su concentración en el seno del líquido;  $x$  es el espesor donde se difunden los iones (este es determinado experimentalmente);  $x$  es influenciado por la forma del electrodo, la geometría del sistema y la agitación (la cual disminuye este espesor al existir convección, y aumenta  $i_L$ ),  $i_L$  es significativa en procesos de reducción y es despreciable en disolución de metales. La expresión para polarización por concentración es:

$$n_c = 2.3 \frac{RT}{nF} \log \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (1.13)$$

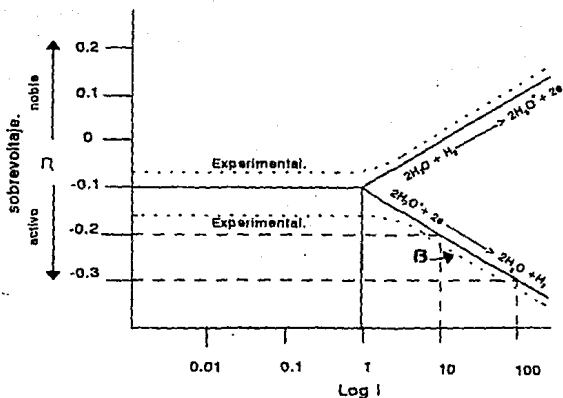
La gráfica 1.1b representa la ecuación 1.13, notese el sobrevoltaje infinito cuando  $i = i_L$ .

Cuando la polarización por activación y concentración se presenta en un electrodo, la siguiente expresión aplica:

$$n_T = n_a + n_c \quad (1.14)$$

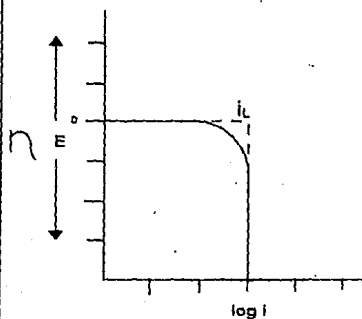
y se transforma en:

$$n_T = \pm \beta \log \frac{i}{i_0} + 2.3 \frac{RT}{nF} \log \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (1.15)$$

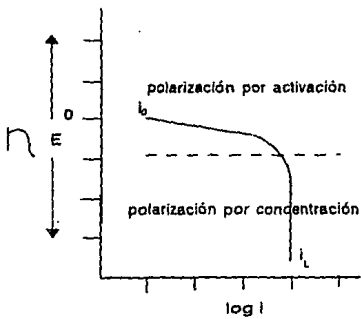


1.1a Curva de polarización por activación en la reducción del hidrógeno.

Fuente: Ref. 23, p.p 481.



1.1b Polarización por concentración (solo para procesos de reducción)



1.1c Polarización combinada

Fig. 1.1 La polarización y sus contribuciones.

La gráfica 1.1c representa las dos contribuciones de la polarización en una reacción de reducción. Usando los tres parámetros básicos  $\beta$ ,  $i_0$  e  $i_L$ ; la cinética de cada reacción de corrosión puede predecirse correctamente.

Del mismo modo que en la fig. 1.1 se pueden elaborar estudios para electrodos combinados (mixed electrodes); consistentes de una muestra metálica en contacto con dos o más sistemas de oxidación-reducción; en la fig 1.2 se muestra la corrosión del zinc en ácido clorhídrico, así como la corrosión del hierro en ácido clorhídrico a la misma concentración.

Es importante apreciar en la intersección de las rectas (trazadas a partir de la  $\beta$ ) el punto  $i_{corr}$ ,  $E_{corr}$ , en donde la velocidad de disolución del metal es igual a la velocidad de la evolución del hidrógeno.

Con este punto es posible predecir la velocidad de corrosión del zinc en ácido clorhídrico utilizando la siguiente fórmula:

$$MPY = 0.13 \cdot i_{corr} \cdot e/p \quad (1.16)$$

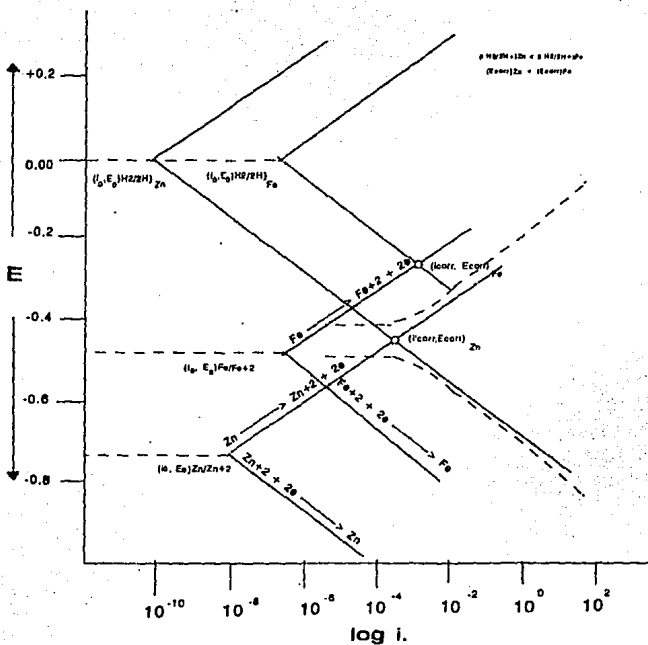
donde  $i_{corr}$  [micro Amperes/cm<sup>2</sup>], e es el peso equivalente del metal [grs.] y p es la densidad del metal [g/cm<sup>3</sup>].

Comparando la corrosión del zinc y hierro en ácido clorhídrico a la misma concentración, los potenciales de celda indican que el hierro se disuelve menos que el zinc (ver tabla 1.1) y sin embargo ocurre lo contrario; esto se debe al bajo intercambio de corriente en la superficie del zinc así, **no siempre los cambios de energía libre son proporcionales a la velocidad de corrosión.**

Este tipo de gráficas se complican cuando se adiciona un agente oxidante. para este caso recordar que la ec. 1.7 representa a un agente oxidante cuyo comportamiento se muestra en la Fig. 1.3, donde  $i'_{corr}$  sería la corriente de equilibrio sin agente oxidante; nótese  $i'_{corr} < i_{corr}$ , esta es la forma en la que el agente oxidante aumenta la velocidad de corrosión, en la misma figura aparece (línea punteada) un agente oxidante que no influye en un aumento de velocidad de corrosión; es de observar que se mantiene por debajo de la intersección de las curvas de disolución del metal.

Del mismo modo en la Fig. 1.4 aparece la unión galvánica de un metal inerte y un metal sensible a la corrosión (una placa de platino y zinc sumergida en una solución ácida).

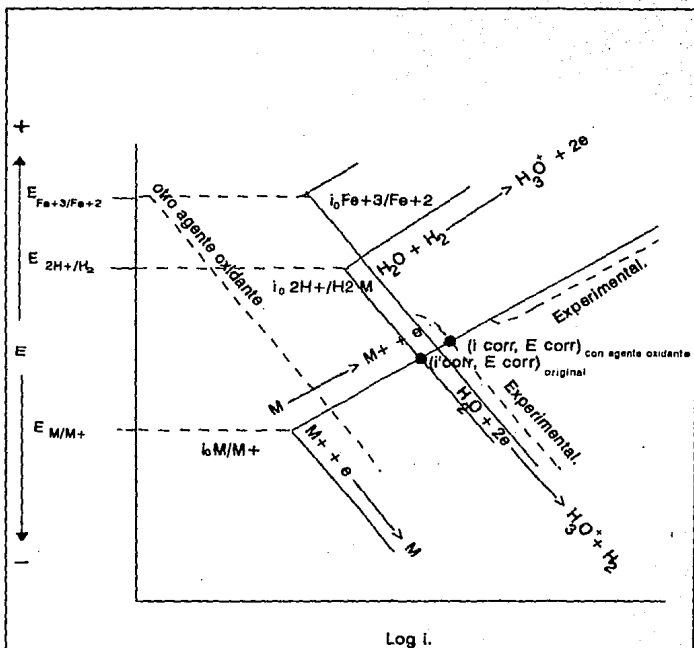
Aquí la velocidad de corrosión para el zinc aumenta al unirse con el platino; también la evolución de hidrógeno ocurre en su mayoría en la placa del zinc.



Fuente: Generada a partir de Ref. 23; p.p. 463-65

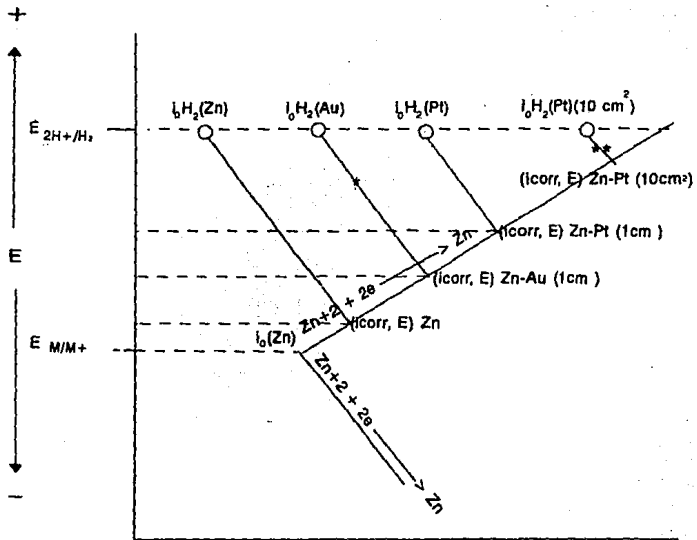
Fig 1.2 Comparación cinética de la disolución del zinc y el hierro





Fuente: Ref, 23; p.p. 466

Fig 1.3 Comportamiento de los metales con agentes oxidantes.



Fuente: Ref. 23; p.p. 487-90.

Fig 1.4 Efecto en la unión galvánica.

El punto  $i_{corr(Zn)}$  corresponde a la disolución del zinc individual y el punto  $i_{corr(Zn-Pt)}$  corresponde a la unión zinc con platino, este segundo punto es mayor, al igual que su voltaje; en la misma figura se muestra la línea identificada como (\*) la cual muestra la unión galvánica zinc-oro, esta corroe menos al zinc que la unión zinc-platino. Aunque en la tabla 1.1 los potenciales muestran un valor mayor para el oro, la densidad de intercambio de corriente es menor para el oro ( $10^{-6}$ ) que para el platino ( $10^{-3}$ ), (ver tabla 1.2).

La línea (\*\*\*) muestra el comportamiento del zinc ( $1\text{cm}^2$ ) unido a una placa de platino de  $10\text{cm}^2$ ; este incremento de área aumenta también la velocidad de corrosión para el zinc aproximadamente en 10 veces. El incremento del área de un electrodo aumenta su intercambio de corriente, es decir hay una proporción directa. Por lo tanto si se disminuye el área del electrodo inerte, la velocidad de corrosión del zinc disminuirá.

Debe recordarse que en las gráficas anteriores la polarización por activación es la que domina el comportamiento, la Fig. 1.5 muestra un metal corroido controlado por la polarización por concentración.

Algunos materiales metálicos exhiben pasividad, la cual es una deficiencia en la evolución de las reacciones de oxidación, en ciertas condiciones (presión, temperatura, concentración y velocidad) ciertos metales forman una capa protectora, que puede ser destruida por una mayor velocidad del fluido o por oxidantes fuertes; al perder dicha capa la corrosión aumenta. También aumenta si existe aireación, la actividad de un metal es la disminución de su pasividad y de esta forma es atacado fácilmente por los distintos fluidos.

La Fig. 1.6a ilustra el comportamiento de un metal pasivo, inicialmente el metal es corroido ( $i$  aumenta comportamiento de Tafel); al aumentar su potencial  $E$ , la disolución del metal disminuye a un valor pequeño manteniéndose independiente de  $E$ ; esta es la región pasiva. Al seguir aumentando  $E$ , la velocidad aumenta;  $i$  aumenta, esta es la región transpasiva y muestra aparentemente la destrucción de la capa protectora.

Uno de los puntos de importancia es la coordenada  $i_c$  (densidad de corriente anódica crítica) y  $E_{pp}$  (potencial pasivo primario).

Las reacciones químicas en su mayoría aumentan con la temperatura, y la reducción-oxidación no son excepciones; debe obtenerse información o hacer pruebas a escala si se desea llevar a cabo un cambio de temperatura en un proceso preestablecido.

A altas temperaturas, los fluidos se encuentran por arriba de su punto de rocío, originándose vapores o gases altamente corrosivos, un ejemplo es el ataque que sufre el acero en los hornos, por gases de combustión.

Fuente: Ref. 23, p.p. 468.

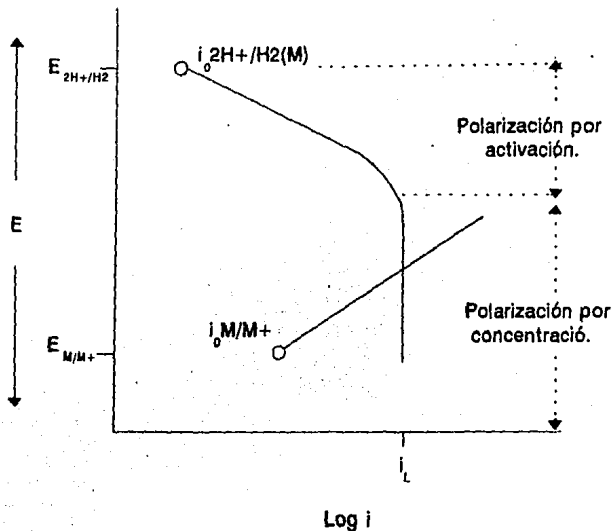


Fig. 1.5 Corrosión del metal M controlado por la polarización por concentración.

La Fig (1.6b) muestra como en un metal con zona pasiva; al aumentar la temperatura esta región disminuye.

La Fig. (1.6c) muestra las rectas que representan soluciones ácidas (evolución de hidrógeno) la recta 1 interseca la curva del metal en el punto A; región activa alta velocidad de corrosión; la recta 2 presenta tres puntos de intersección el punto B es una región activa, el punto C es inestable el sistema no existe, el punto D esta en la región pasiva baja velocidad de corrosión. Un sistema así, no es confiable por que puede ser activo o pasivo.

La recta 3 es el caso deseable, el punto E se encuentra en la región pasiva y así permanecerá; disminuyendo la velocidad de corrosión.

La presencia de humedad debe considerarse, ya que en pequeñas cantidades, cambia completamente el panorama de un material. Por ejemplo, el cloro seco, prácticamente no corroe al acero, pero si se humedece o disuelve en agua; ataca a los tipos más comunes de acero. Lo inverso sucede con el titanio; el cloro seco será más corrosivo que el cloro húmedo.

Altas velocidades también afectan ( y en especial a la polarización por concentración  $i_L$  aumenta ) esto se muestra en la Fig. 1.7a, en donde las curvas 1-6 indican un aumento de velocidad de un fluido corrosivo hasta llegar a un punto D donde se llega a una independencia entre la velocidad del fluido y la velocidad de corrosión de un metal activo.

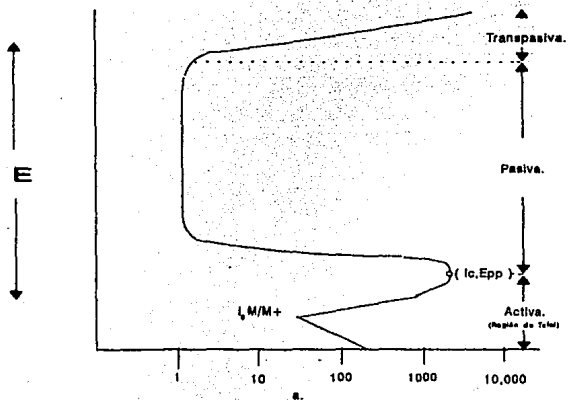
El comportamiento de un metal con zona de pasivación se observa en la Fig 1.7b, existe un aumento en la corrosión de los puntos A a C, después de este punto los incrementos de velocidad caen en el punto D (estado pasivo del metal) el punto C es conocido como densidad de corriente anódica crítica.

Si este punto C pudiera moverse a la izquierda (es decir disminuir  $i$ ), el metal sería menos afectado por velocidad y concentración, esto puede hacerse de dos formas:

- Cambiando el metal M.
- Combinando el metal M con otros metales.

Estos experimentos se realizan aleando metales y a partir de esto se obtienen mejores aleaciones, de esta información obtenida se determina la mayor resistencia del hierro cuando se alea con molibdeno y cromo.

La Fig. 1.8a muestra el incremento de la zona de pasivación (disminuyendo C) de una aleación hierro-cromo, cuando aumenta el cromo. Las figuras 1.8 a-d presentan los diversos efectos que causan distintos factores.



Fuente: Ref. 39, p.p. 103

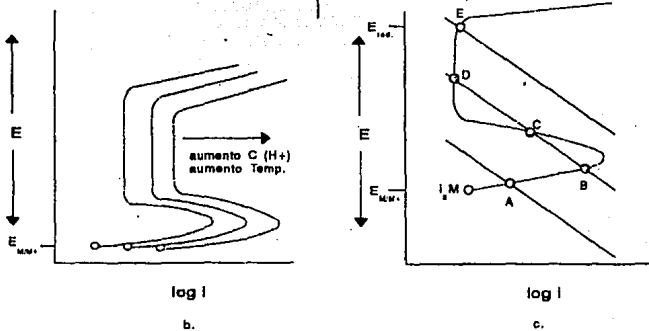
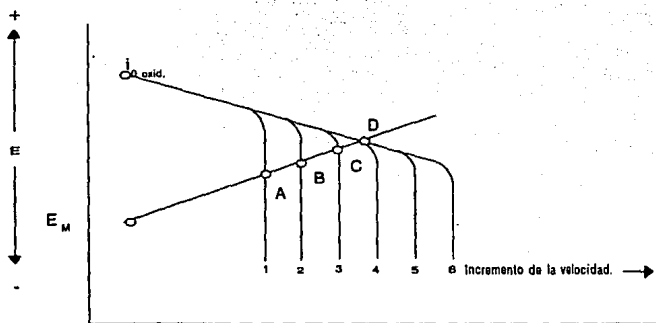
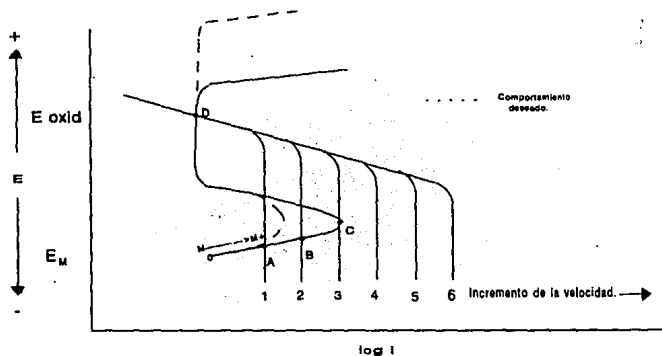


Fig. 1.6 La pasivación y sus efectos.



Log i

Fig. 1.7a Comportamiento de un metal normal con un fluido corrosivo aumentando su velocidad.

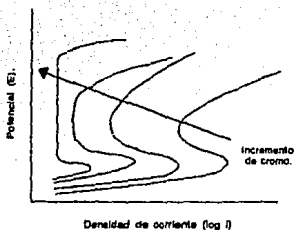


log i

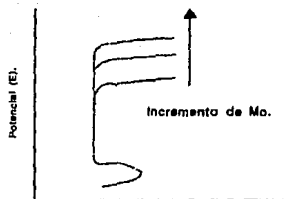
Fig. 1.7b Comportamiento de un metal pasivo al encontrarse con un fluido corrosivo con velocidad en aumento.

Ref. 23, p.p. 485-88.

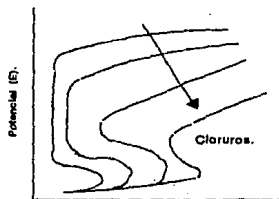
Fig. 1.7 La velocidad y sus efectos.



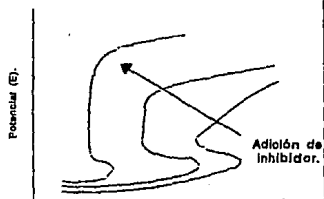
Densidad de corriente (log  $i$ )  
**a. Aleación de Hierro-Cromo en ácidos.**



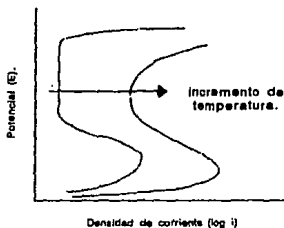
Densidad de corriente (log  $i$ )  
**b. 17 Cr ó 18/8 Inoxidable en cloruros (neutra)**



Densidad de corriente (log  $i$ )  
**c. Inoxidable 304 en ácido sulfúrico diluido + cloruros.**



Densidad de corriente (log  $i$ )  
**d. Acero medio en soluciones ácidas.**



**e.**

Fuente: Ref. 39, p.p. 104

**Fig. 1.8 Metales pasivos y su comportamiento ante diversos cambios.**



La concentración de los ácidos también influye en la pasividad de los metales, la fig. 1.9 muestra una curva A con 2 secciones (1 y 2), muchos materiales no son afectados en amplios rangos de concentraciones (curva A sección 1).

Otros materiales muestran un comportamiento similar, pero a altas concentraciones la velocidad de corrosión aumenta rápidamente (curva A sección 2), el plomo es un material de estas características y es debido a que este metal forma una capa protectora de sulfato de plomo, la cual es soluble en ácido sulfúrico concentrado (70% o más).

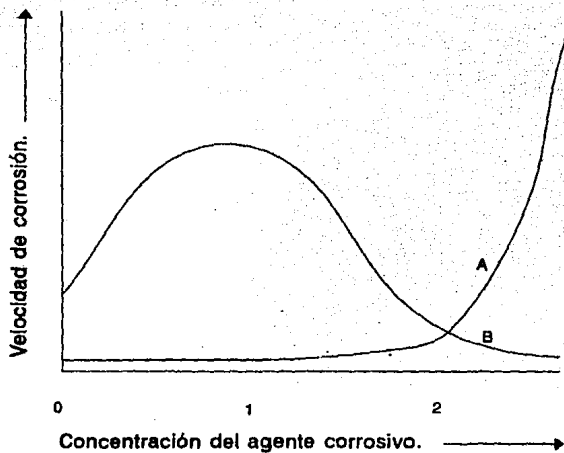
El comportamiento de los ácidos solubles en agua a todas proporciones es predecido por la curva B, inicialmente hay un aumento en la velocidad de corrosión, al aumentar la concentración del ácido alcanza un máximo para luego decrecer, esto se debe al hecho de que el grado de ionización de los ácidos fuertes disminuye al aumentar su concentración, esta es la razón por la cual ácidos como el sulfúrico y fluorhídrico sean poco corrosivos al 100% de concentración, siempre y cuando se encuentre a temperaturas moderadas y con pocas impurezas.

El pH se relaciona con la concentración del ácido expresado en  $[H^+]$ , como sigue:

$$pH = -\log [H^+] \quad (1.17)$$

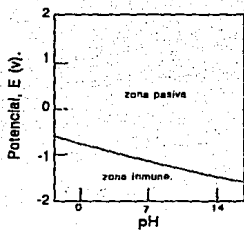
$pH < 7$  implica condiciones ácidas;  $pH > 7$  se refiere a condiciones básicas o alcalinas;  $pH < 7$  aumenta la corrosividad de los materiales. A partir de esto se ha introducido el diagrama de Pourbaix el cual relaciona la posibilidad de corrosión (pH), y su diferencia de potencial (metal y sus iones disueltos), indica que condiciones pH-potencial producirán corrosión y cuales no. Se basa en condiciones de equilibrio termodinámico los que no necesariamente son reales.

El diagrama de Pourbaix (Fig. 1.10) para el hierro en agua muestra zonas de corrosión, inmunidad y pasividad; para pH neutro (agua = 7) y un potencial de (-0.4 v), el punto x indica posibilidad de corrosión, pero si se disminuye el potencial a (-0.8v) (esto se realiza por la aplicación de un circuito externo, ver Cap. 3 protección catódica), se reducirá la corrosión; también si aumenta el potencial ( $> 0$ ), esto puede hacerse con protección anódica; otra alternativa es aumentar el pH agregando alcalis.

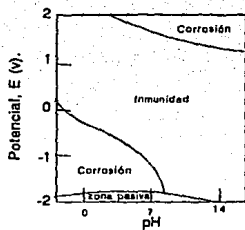


Fuente: Ref. 23, p.p. 27

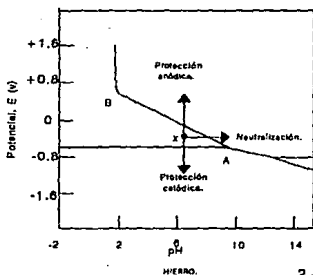
**Fig. 1.9 Efecto de la concentración en la velocidad de corrosión.**



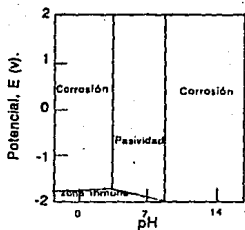
a. Tantalio.



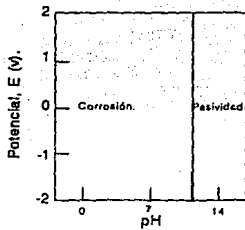
b. Titanio.



IERRO.



c. Aluminio.



d. Magnesio.

Fuente: Henthorne M, "Control the process & control corrosion", Chem.

Eng., 77(10), 139, (1971).

M. Pourbaix, Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions, Pergamon press, New York, 1966

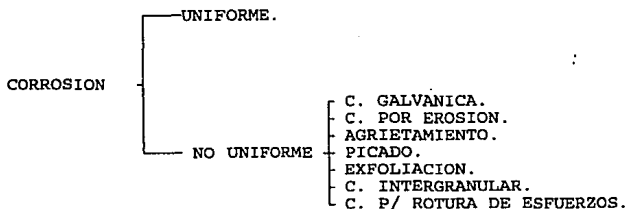
Fig. 1.10 Diagrama de pourbaix para el control de la corrosión.

## CAPITULO.

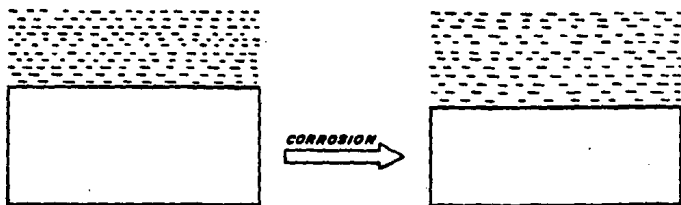
**DOS.****Tipos y formas de corrosión.****2.1 CLASIFICACION DE LA CORROSION.**

La corrosión ha sido clasificada en diferentes formas, un método la divide en corrosión por alta y baja temperatura; también se menciona corrosión húmeda y seca.

Sin embargo Heathorne <sup>(41)</sup>, clasifica la corrosión por las formas en que ésta se manifiesta, siendo las siguientes:

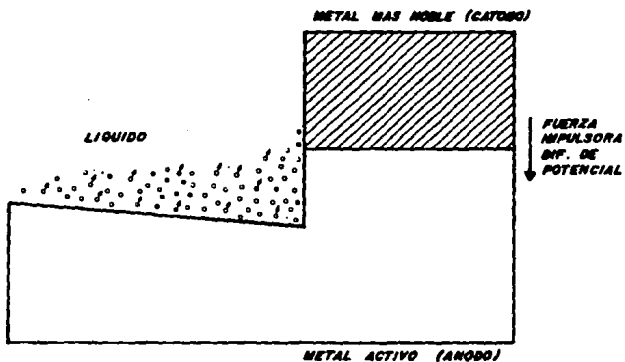
**2.2 CORROSION UNIFORME. <sup>(41)</sup>**

Cuando toda la superficie de un metal es atacada al mismo grado por un agente químico, se presenta la corrosión uniforme; esta es, quizá la forma más comunmente encontrada. Debido a esta uniformidad, es relativamente fácil para el diseñador considerar un margen de corrosión (el conocimiento de la selección de materiales y los métodos de protección pueden controlarla). Esta forma de corrosión es la más fácil de medir, las fallas inesperadas se pueden evitar llevando a cabo una inspección regular (fig. 2.1) .



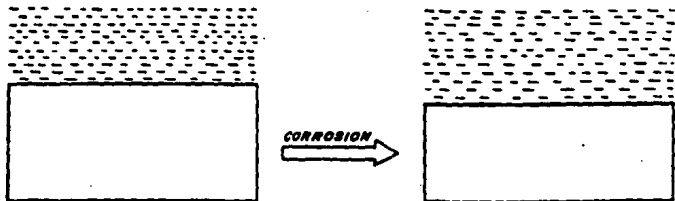
fuenta : Ref. 41, p 79

FIG. 2.1 CORROSION UNIFORME



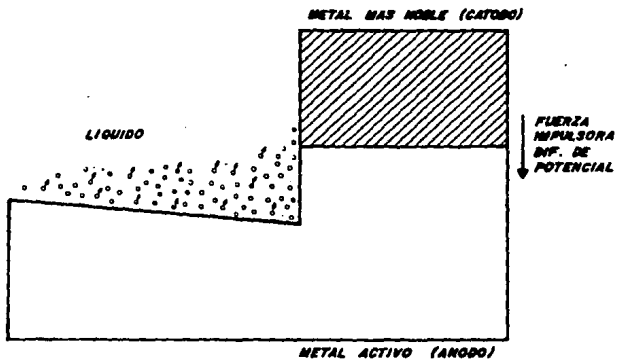
fuenta : Ref. 41, p 79

FIG. 2.2 CORROSION GALVANICA



fuenle : Ref. 41, p 79

FIG. 2.1 CORROSION UNIFORME



fuenle : Ref. 41, p 79

FIG. 2.2 CORROSION GALVANICA

## **2.3 CORROSION NO UNIFORME.<sup>(48)</sup>**

Este tipo de corrosión se presenta cuando debido a una selección inadecuada de materiales, a factores geométricos o por condiciones de proceso, ocurre el ataque de manera desigual. Existen diversas formas de corrosión no uniforme:

### **2.3.1 CORROSION GALVANICA.<sup>(21,23),(89)</sup>**

La corrosión galvánica ocurre, cuando dos metales diferentes se encuentran en contacto ( o conectados por un conductor eléctrico ) y son expuestos a una solución conductiva (electrolito). El potencial eléctrico entre los diferentes metales es una fuerza impulsora que pasa corriente directa dando como resultado la corrosión de uno de los metales.

La diferencia de potencial desarrollada entre el par de metales, se debe a que uno de ellos proporciona los electrones necesarios para desarrollar el flujo de corriente, además se oxida y pasa a catión acuoso en la solución (electrolito).

La diferencia de potencial, puede ser determinada para un ambiente dado, para de esta manera proporcionar arreglos o clasificaciones ( llamadas series galvánicas ), la tabla 2.1 muestra una serie en donde la solución conductiva es el agua de mar.

El metal más activo en las series galvánicas es el ánodo y se corroe a una velocidad mayor de la que debiera ser, esto es por proporcionar más fácilmente los electrones.

El metal más noble es el cátodo y se corroe a una velocidad mínima.

Al analizar la serie galvánica, se observa que los metales nobles o catódicos no son fáciles de oxidar, mientras que los anódicos son fácilmente oxidables.

La corrosión galvánica aumenta si los metales ( unidos o aleados ) se encuentran muy separados en la serie, esto es por que la diferencia de potencial es mayor. Si los metales se encontraran cerca, la diferencia de potencial sería menor y el ataque por un ambiente determinado disminuiría, lo que sería recomendable.

Así, es común usar acero galvanizado (es decir con una cubierta de zinc), para resistir el medio ambiente, aunque existan agujeros en el acero, no se corroerá si hay un buen contacto eléctrico entre el hierro, el agente corrosivo y el zinc ( Verificar la posición en la serie).

La relación entre las áreas superficiales del metal activo y el metal noble, es muy importante porque la velocidad de corrosión depende de la densidad de corriente y será mayor, si el área del metal activo es pequeña comparada con la del metal noble.

↑  
Noble ó  
catodico

Platino  
Oro  
Grafito  
Titanio  
Plata

- [ Chlorimet 3 (62Ni, 18Cr, 18Mo)
- [ Hastelloy (62Ni, 17Cr, 15Mo)
- [ 18-8 Mo Acero inoxidable (pasivo)
- [ 18-8 Acero inoxidable (pasivo)
- [ 11-30 Cr Acero inoxidable (pasivo)
- [ Inconel (80 Ni, 30 Cr, 7 Fe)
- [ Niquel (pasivo)
- [ Monel (70 Ni, 30Cu)
- [ Cuproniqueles (60-90 Cu, 40-10 Ni)
- [ Bronce
- [ Cobre
- [ Latones (Cu, Zn)
- [ Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)
- [ Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe)
- [ Inconel (activo)
- [ Niquel (activo)

Estaño

Plomo

- [ 18-8 Mo Acero inoxidable (activo)
- [ 18-8 Acero inoxidable (activo)
- Niquel resistente (forjado con Fe)
- 13 Cr Acero inoxidable (activo)

Activo ó  
anódico

- [ Hierro forjado
- [ Acero ó Hierro
- Aluminio 2024 (4.5 cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)
- Cadmio
- Aluminio puro 1100 (comercial)
- Zinc
- Magnesio y aleaciones

Fuente: Ref. 51, p.p. 82

**TABLA 2.1 SERIE GALVANICA DE METALES Y ALEACIONES  
EN AGUA DE MAR.**



### 2.3.2 CORROSION POR EROSION. <sup>(2),(4)</sup>

Cuando el movimiento de un agente corrosivo sobre la superficie de un metal aumenta, la velocidad de ataque por el uso mecánico y la misma corrosión son mayores, se presenta la corrosión por erosión.

El papel de la erosión, es usualmente atribuido a la remoción de capas de la superficie protectora, como el aire que forma láminas de óxido o productos de la misma corrosión adheridos a la superficie.

La corrosión por erosión aparece generalmente en forma de pequeños huecos bajo la superficie, como se muestra en la fig 2.3. El ataque puede tener un patrón direccional, relacionado con la trayectoria del agente corrosivo y su movimiento sobre la superficie del metal. La corrosión por erosión prospera en condiciones de alta velocidad, tales como la turbulencia. Así, es frecuente observar en impulsores de bombas, agitadores, tuberías y particularmente en desviaciones y codos un movimiento rápido de partículas, las cuales son probablemente la causa del problema.

En estas partes, se recomienda un cambio en el diseño o una selección de material más resistente. Este material debe tener (aunque no siempre) una resistencia superior a la corrosión aun en condiciones de estancamiento en dichas partes.

La cavitación y el rozamiento son formas especiales de la corrosión por erosión. La cavitación ( ilustrada esquemáticamente en la fig 2.4 ), se produce por el choque de burbujas de vapores saturados dentro de un líquido.

Estas burbujas se forman en puntos donde la presión local es igual o menor a la presión de vapor del líquido.

Estos choques producen impactos de alto esfuerzo que eliminan gradualmente partículas de la superficie, formando de manera eventual profundos agujeros sobre la superficie.

La corrosión por rozamiento es un tipo común de daño a la superficie, producido por una vibración, la cual causa choques o rozamientos en superficies sujetas a presión; ( ranuras de cuña, en canales para cañas mecánicas, llaves y otras piezas estrechamente ajustadas y sujetas a un pequeño movimiento ) aquí los metales se deslizan juntos causando daños mecánicos en la superficie ( fig 2.5 ). Este tipo de corrosión es un fenómeno mecánico-químico.

Cuando hay rozamiento, fuerzas adhesivas hacen que pequeñas partículas se solden. Con continuos y ligeros movimientos, las partículas soldadas se arrancan de las superficies opuestas y reaccionan químicamente con la atmósfera formando escoria o polvo en la unión.

### 2.3.3 CORROSION POR GRIETAS ( AGRIETAMIENTO ). <sup>(23),(41),(52)</sup>

Es un ataque acelerado, en el punto de unión de dos metales o en superficies asperas que se encuentran expuestas a un ambiente corrosivo. Por experiencia se sabe que es más probable, que la corrosión ocurra en grietas que retienen las soluciones, o almacenan depósitos de lodos ( productos de la corrosión ) y les toma más tiempo secarse.

También es posible que la corrosión ocurra en grietas, aún cuando esten completamente sumergidas. El ataque acelerado puede ocurrir debido a una diferencia en la concentración de oxígeno ( fig. 2.6a ). El oxígeno tiene un acceso relativamente fácil al exterior de la unión ( que es catódica ). El metal en la unión es anódico, y el depósito de producto insoluble de corrosión (alrededor del centro anódico), excluye oxígeno rápidamente, obteniéndose un área de baja concentración en oxígeno y un potencial eléctrico incrementado. Si la acción continua, se forma en el centro un agujero superficial.

La corrosión siempre ocurre en la región deficiente de oxígeno, las grietas pueden causar diferencias en concentraciones ión-metal en diferentes sitios. Si la región tiene deficiencia ión-metal en la orilla de una unión, la corrosión ocurrirá ( fig. 2.6b ).

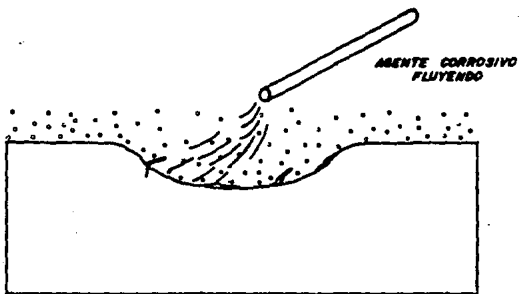
### 2.3.4 CORROSION POR PICADURA (PITTING). <sup>(2),(51)</sup>

La corrosión por picadura es la formación de agujeros, debido a inclusiones, una composición variable de los cristales individuales del metal a través de la pieza fundida y a zonas distorsionadas.

De esta forma existen diferencias de potencial en sitios determinados y produciendo huecos profundos y aislados ( fig. 2.7 ). La forma del agujero es frecuentemente responsable de que este siga creciendo ( por las mismas razones mencionadas en la corrosión por agrietamiento, un agujero puede ser considerado por si mismo una grieta).

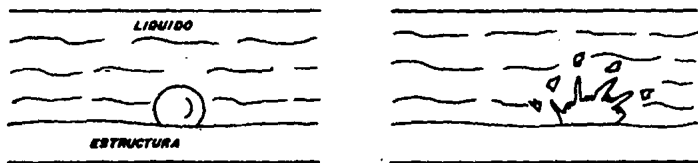
El picado es frecuentemente un proceso lento, tomando varios meses o años para ser visible, aunque causa fallas inesperadas.

El pequeño tamaño del agujero y la pequeña cantidad de metal disuelto que se forma; hace difícil su detección en etapas tempranas.



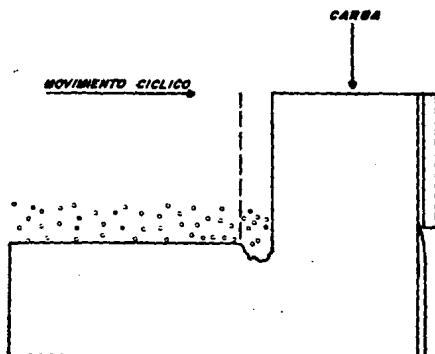
fuenta : Ref. 41, p 80

FIG. 2.3 CORROSION POR EROSION



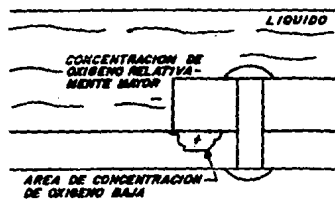
fuenta : Ref. 2, p 586

FIG. 2.4 CAVITACION

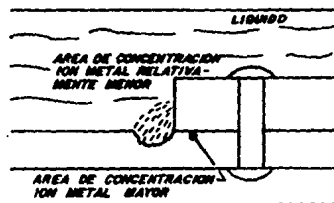


fuentes : Ref. 41, p.80

FIG. 2.5 CORROSION POR ROZAMIENTO



a) DEFICIENCIA DE OXIGENO



b) CONCENTRACION DE ION METALICO

fuentes : Ref. 2, p.256

FIG. 2.6 CORROSION POR AGRIETAMIENTO

### 2.3.5 EXFOLIACION Y LIXIVIACION SELECTIVA. <sup>(23)</sup>

La exfoliación es la corrosión subterránea; esta empieza en la parte limpia de la superficie, pero se expande hacia abajo; ésta forma se diferencia del picado, por que aquí, se observa una apariencia laminada, las capas del material son absorbidas ( fig 2.8a ).

El ataque es marcado usualmente por una superficie laminada y algunas veces en forma de ampollas. La muestra tomada finalmente, parece un paquete de cartas; el desgaste de dichas cartas es bastante severo. Lo anterior es frecuentemente observado en aleaciones de aluminio.

La lixiviación selectiva ( algunas veces llamada separación ) es el traslado de un elemento de una aleación, el ejemplo más común es la lixiviación del zinc en aleaciones de cobre-zinc ( deszincificación ).

La corrosión de este tipo en la mayoría de las veces es perjudicial porque proporciona un metal poroso ( ver fig. 2.8b ), con pocas propiedades metálicas.

### 2.3.6 CORROSION INTERGRANULAR. <sup>(23)</sup>

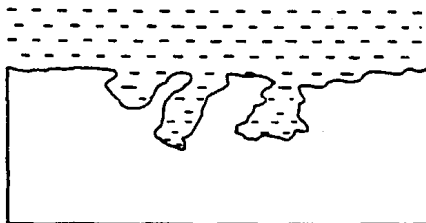
Este tipo de corrosión se presenta cuando existe una diferencia de potencial entre las fronteras del grano metálico y el resto de la aleación; la corrosión tiene lugar generalmente cuando ocurre la precipitación de una fase desde una solución sólida.

Como la precipitación suele ocurrir más rápido, en las fronteras del grano, el material en éste lugar pierde una cantidad del elemento disuelto, creando una diferencia de potencial y la frontera de grano se disolverá.

A menudo el examen visual de la pieza, no revelará la extensión del daño, y en la mayoría de los casos hay una apreciable pérdida en las propiedades mecánicas.

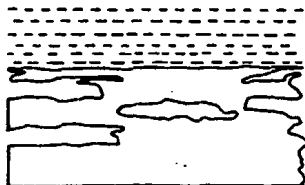
### 2.3.7 RUPTURA POR TENSION Y CORROSION (STRESS CORROSION CRACKING). <sup>(23),(151)</sup>

La Ruptura por Tensión y Corrosión (RTC) o Stress Corrosion Cracking (SCC) se da cuando la acción combinada de la tensión en los esfuerzos y un agente corrosivo en algunas instancias, causará la ruptura de una aleación metálica. Muchas aleaciones son susceptibles al problema, pero afortunadamente, el número de combinaciones aleación-agente corrosivo que causan este tipo de problemas son relativamente pocas, no obstante, este es el problema más serio sin solución en la metalurgia, aun hoy en día la RTC (SCC) es provocada por condiciones criogénicas, soldaduras, tratamientos térmicos o bien por condiciones externas, aplicadas durante su vida de servicio.

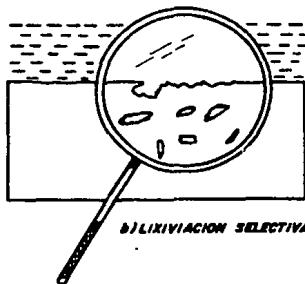


fuenta : Ref. 41, p 80

**FIG. 2.7 CORROSION POR PICADO**



**a) EXFOLIACION**



**b) LIXIVIACION SELECTIVA**

fuenta : Ref. 41, p 80

**FIG. 2.8 CORROSION POR EXFOLIACION Y LIXIVIACION SELECTIVA**

Las rupturas pueden seguir rutas transgranulares o intergranulares y hay frecuentemente una tendencia a romperse formando bifurcaciones ( fig. 2.10a ).

Algunas características de la ruptura por tensión y corrosión son:

- Se requiere tensión en los esfuerzos, si no es así la RTC (SCC) no ocurre.
- Las rupturas aparecen como fragilidades macroscópicas ( las fallas mecánicas de la misma aleación, la convertiría en material dúctil, sino hubiera presencia de agente corrosivo ).
- La RTC (SCC) depende de las condiciones metalúrgicas de la aleación.
- Un ambiente específico causará ruptura para una aleación dada, el mismo ambiente no causará rupturas en otras aleaciones<sup>1</sup>.
- Largos periodos de tiempo pueden pasar (frecuentemente años) antes de que las rupturas se hagan visibles. Después de esto la propagación es rápida causando fallas inesperadas.
- La RTC (SCC) a veces no es detectada, aunque actualmente hay gran cantidad de datos, para ayudar a evitar estos problemas.

La corrosión por fatiga es una forma especial de la RTC (SCC), las fallas por fatiga causadas por un efecto cíclico repetido, sobre los esfuerzos, ocurre en la ausencia del agente corrosivo y se presenta comunmente en estructuras sujetas a vibración continúa.

Cuando la susceptibilidad por fatiga es aumentada por la presencia de un agente corrosivo, la falla resultante es llamada corrosión-fatiga.

Un agente corrosivo y un material que se encuentra, por abajo de la mitad del esfuerzo requerido causará corrosión-fatiga en aire seco.

Habría generalmente menos bifurcaciones en la fatiga que en la ruptura por tensión, ( fig. 2.10b ). Además, esta no es muy conocida.

A últimas fechas la clasificación de Henthorne ha sufrido modificaciones, debido a que otros fenómenos han provocado fallas en equipos. Collins <sup>(11)</sup> menciona las siguientes:

---

1 para mayor información consultar las referencias 14 y 67.

### 2.3.8 CORROSION BIOLÓGICA.

Este tipo de corrosión es el resultado de la actividad de organismos vivos, principalmente bacterias aerobias, anaerobias y algas, las cuales en su proceso de alimentación y eliminación de desechos producen corrosión; por ejemplo, las bacterias reductoras de sulfato producen sulfuro de hierro, cuando están en contacto con estructuras de acero.

Otras bacterias ingieren el hierro y precipitan hidróxido de hierro II, produciendo corrosión por grietas. Algunas más oxidan amoníaco y producen ácido nítrico.

Para prevenir este tipo de corrosión, se altera el ambiente de dichos organismos usando recubrimientos, inhibidores, bactericidas o fungicidas, y en algunos casos protección catódica.

### 2.3.9 DAÑO POR HIDRÓGENO.

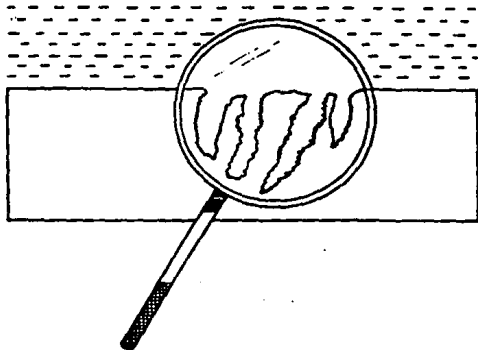
Esta clasificación se refiere al contacto del hidrógeno con un metal; en este se incluye el ampollado, resquebrajamiento, ataque por hidrógeno y descarburización.

La formación de ampollas es causada por la difusión de hidrógeno atómico en los metales, formando hidrógeno molecular cuya presión causa daños en las paredes de los metales. Este tipo de ataque es controlado con el uso de materiales porosos, inhibidores o recubrimientos.

El resquebrajamiento se debe a la penetración de hidrógeno en la estructura del metal, formando hidruros. El titanio es uno de los metales atacados por este fenómeno, puede disminuirse su efecto con el uso de inhibidores de corrosión.

La descarburización y el ataque por hidrógeno se llevan a cabo a altas temperaturas, donde el hidrógeno extrae el carbón de las aleaciones, reduciendo su fortaleza; esta extracción recibe el nombre de **descarburización**. Es posible que el hidrógeno conduzca a la formación de metano en los poros del metal, y al expandirse el gas forme cuarteaduras, esto es un ataque por hidrógeno. Una apropiada selección de materiales y recubrimientos previene este tipo de problemas.



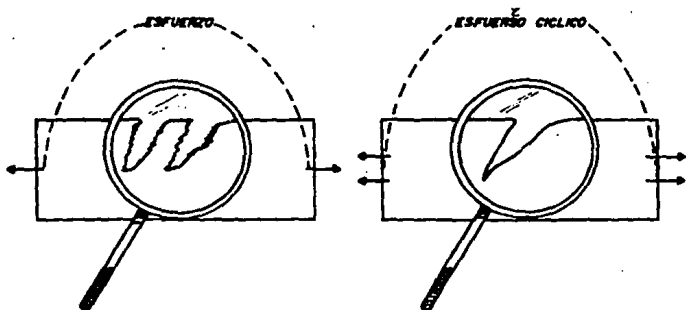


fuenta : Ref. 41, p 80

**FIG. 2.9 CORROSION INTERGRANULAR**

**a) CORROSION POR ROTURA DE ESFUERZOS**

**b) CORROSION POR FATIGA**



fuenta : Ref. 41, p 80

**FIG. 2.10 CORROSION POR ROTURA DE ESFUERZOS Y POR FATIGA**

## Métodos de prevención.

Al igual que las formas y tipos de corrosión, la clasificación de métodos para la prevención de la corrosión varían de un autor a otro.

No obstante, a partir de las referencias ( 23 ) y ( 41 ), se propone la siguiente :

- MODIFICACIONES EN LAS CONDICIONES DE OPERACION
- DISEÑO
- PROTECCION CATODICA Y ANODICA
- RECUBRIMIENTOS
- INHIBIDORES

### 3.1 MODIFICACIONES EN LAS CONDICIONES DE OPERACION. <sup>(23)</sup>

Las medidas típicas para controlar la corrosión son :

- Disminución de la temperatura.
- Disminución de la velocidad.
- Eliminación de oxígenos y oxidantes.
- Cambios de concentración.

El control de la temperatura es uno de las mejores modificaciones para reducir la corrosión, un aumento de temperatura, aumentará en la mayoría de los casos la velocidad de deterioro. Existen pocas excepciones y estas, son frecuentemente debidas a la disminución del contenido de oxígeno de la solución, particularmente cerca del punto de ebullición.

Frecuentemente la temperatura del metal corroído, es más alta que la establecida; un ejemplo, son los problemas de corrosión bajo condiciones de intercambio de calor, donde la temperatura del metal puede ser más alta que en el seno de la solución.

### 3.2 DISEÑO. <sup>(23)</sup>

La corrosión por grietas, galvánica, erosión y tensión son más recomendables de controlar por el diseño mismo del equipo de proceso. Ciertas situaciones en soldadura, ataque en bordes y drenajes; también son controladas a través de técnicas propias de diseño.

Otro detalle que debe ser considerado bajo los tópicos de diseño, es la localización de una planta y sus unidades.

Frecuentemente hay poca selección sobre esto, debe hacerse una consideración importante antes que la construcción comience; por ejemplo, la colocación de un sistema condensador de acero inoxidable corriente abajo de un absorbedor de ácido clorhídrico, puede hacer que el condensador tenga corrosión por roturas. El diseño también incluye la instalación de desviadores, arrancadores y boquillas de drenaje, siempre que sea práctico se deberá proporcionar medios de acceso para la inspección y el mantenimiento.

La limpieza misma puede causar problemas si es utilizado un reactivo erróneo o un lavado inadecuado; por ejemplo, el lavado del equipo de acero inoxidable con ácido clorhídrico puede causar corrosión por agrietamiento, picado o tensión.

Las siguientes medidas también son adecuadas:

- Diseñar tanques y otros contenedores para un drenado y una limpieza fácil, los fondos de los tanques deben tener un drenaje adecuado, el ácido sulfúrico concentrado es solo ligeramente corrosivo junto al acero. No obstante, si un tanque de acero con ácido sulfúrico no es drenado por completo y el líquido remanente es expuesto al aire, el ácido tiende a absorber humedad, por lo que se diluye y el ataque ocurre rápidamente.

- Sistemas de diseño para un fácil reemplazo de componentes que puedan fallar en su servicio, frecuentemente las bombas en plantas químicas son de tal forma que puedan ser removidas de un sistema de tuberías.

- Evitar cambios repentinos y contracciones en sistemas tuberías; áreas en donde la dirección del fluido cambia rápidamente promueve la corrosión-erosión. Esto es particularmente importante en sistemas susceptibles tales como el plomo, cobre y sus aleaciones.

- Evitar goteos calientes durante operaciones de intercambio de calor; los intercambiadores de calor y otros equipos de este tipo, deben ser diseñados para

asegurar un gradiente uniforme de temperatura, para evitar calentamientos locales y aumentar la velocidad de corrosión, además, el goteo en caliente produce esfuerzos, los cuales pueden producir fallas por roturas.

- La reducción de oxígeno es una de las reacciones más comunes durante la corrosión, si el oxígeno es eliminado, la corrosión se reduce y/o previene, en el equipo químico, se debe poner atención en agitadores, tubería de alimentación y en partes de equipo donde haya fugas. Excepciones a esta regla son las aleaciones de metales activo-pasivo, el titanio y el acero inoxidable son más resistentes al ácido con aire disuelto y a otros oxidantes<sup>1</sup>.

El uso de tablas de materiales (apendice B) y cartas de isocorrosión (figs A.3 y A.4) para los diversos metales es recomendable<sup>2</sup>.

### 3.3 PROTECCION CATODICA Y ANODICA. <sup>(2),(23),(41),(92)</sup>

Los principios de la protección catódica pueden ser explicados considerando un metal "M" en un ambiente ácido.

Las reacciones electroquímicas que ocurren son la disolución del metal y la conversión a hidrógeno gaseoso



La protección catódica es llevada a cabo por el abastecimiento de electrones a la estructura metálica para ser protegida; examinando las ecuaciones (3.1) y (3.2), se indica que la adición de electrones a la estructura, suspenderá la disolución del metal y aumentará la velocidad de formación del hidrógeno.

Si se considera que la corriente fluye de (+) a (-) como la teoría eléctrica convencional; entonces una estructura es protegida si la corriente es proporcionada por el electrolito.

Por el contrario, la corrosión se acelera si la corriente pasa del metal al electrolito.

1 En las referencias 36 y 43 se presentan criterios más rigurosos.

2 Consultar las referencias 14 y 67 para diversas cartas.

Esta convención de corriente ha sido adoptada por la tecnología de protección catódica y es usada por consistente.

Hay dos tipos de protección catódica; por corriente impresa y por ánodo de sacrificio (protección galvánica).

La primera es establecida por la conexión de una gran fuente de corriente directa al metal corroído y un electrodo que se convierte en ánodo. La forma usual de hacer esto, es rectificar la corriente alterna como se muestra en la fig 3.1.

Debe existir una ruta eléctrica entre el nuevo electrodo y el metal a ser protegido.

El ánodo es usualmente rodeado por un refuerzo consistente de coque en polvo, yeso o bentonita; esto, mejora el contacto eléctrico entre el ánodo y la solución que lo rodea.

En la protección galvánica se emplea un metal más activo llamado "ánodo de sacrificio", el cual abastece la corriente necesaria para detener la corrosión, fig (3.2).

La fig (3.3) es un dispositivo el cual muestra la protección catódica por una conexión galvánica de magnesio, la cual es anódica con respecto al acero y se corroe preferentemente (ánodo de sacrificio); de esta forma, éste se consume y protege la estructura de acero.

Las corrientes de protección son determinadas empíricamente y algunos valores típicos son mostrados en la tabla 3.1

Corrosivos agresivos como ácidos calientes requieren corrientes bajas, la tabla 3.1 indica rangos típicos de corriente protectora. Aplicaciones específicas pueden desviarse de estos valores; por ejemplo, en ciertas soluciones muy ácidas se necesita frecuentemente de 10 a 15 mA para reducir la corrosión de estructuras de acero a niveles tolerables. Tuberías con aislantes orgánicos requieren corrientes muy bajas; ya que las áreas que requieren protección, tienen defectos en la capa protectora. En tales casos, un ajuste por ensayo y error para el tamaño del ánodo o la aplicación de una corriente puede hacerse hasta que la protección sea llevada a cabo satisfactoriamente.

La selección del ánodo para protección catódica esta basada también en consideraciones económicas, la tabla 3.2 compara los tipos de ánodos. Los ánodos de sacrificio de magnesio son los más ampliamente usados aunque su eficiencia es baja, aproximadamente 50%<sup>1, (23)</sup>

---

1 La referencia 93 presenta un análisis económico detallado y la 54 presenta una optimización.

Para proteger anódicamente una estructura, es requerida una técnica llamada Potenciostat. Esta técnica, mantiene un metal en una potencia constante con respecto a un electrodo de referencia. La protección anódica de un tanque de acero conteniendo ácido sulfúrico es ilustrado en la fig 3.4. El Potenciostat tiene tres terminales, una es conectada al tanque, otra a un cátodo auxiliar (un electrodo de platino) y el tercero a un electrodo de referencia (como una celda de calomel). Ya en operación, el Potenciostat mantiene un potencial constante entre el tanque y el electrodo de referencia. El potencial óptimo para protección es determinado por mediciones electroquímicas.

Las aplicaciones han sido de tipo simple (tanque de almacenamiento), complicadas (intercambiadores de calor de tubos y coraza) y en innovaciones (carros tanque), las ventajas de la protección anódica son:

- Bajo costo de operación.
- Aplicación en un amplio rango de agentes corrosivos.
- Alto poder de protección, puede proteger estructuras complejas, con electrodos auxiliares.
- Datos predecibles en el laboratorio.

Por otro lado la protección anódica:

- Es aplicable solo en sistemas metal-agente corrosivo que exhiban pasividad.
- Altos costos de instalación, requiere potenciostat, electrodos auxiliares y de referencia. Alto arranque de corriente.
- Si el sistema se encuentra fuera de control, la velocidad de corrosión será muy alta.
- Problemas de corrosión por ruptura no se ha probado que sean eliminados<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Para mayor información consultar las referencias 57 y 58.

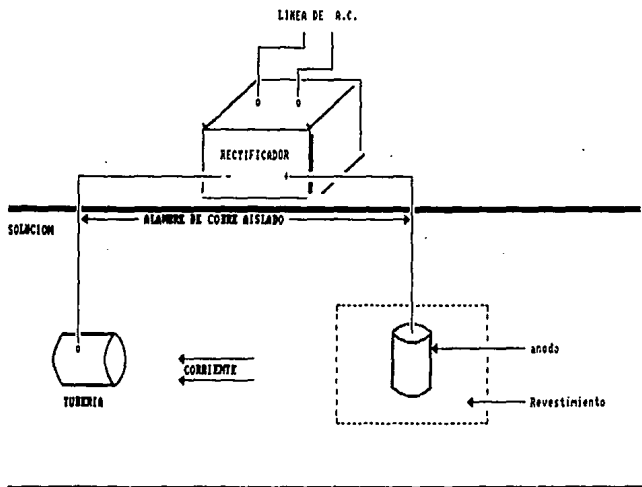


Fig. 3.1 Corriente Impresa.

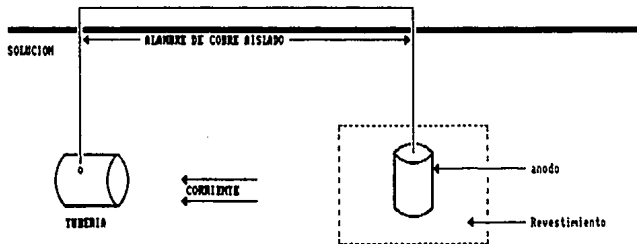
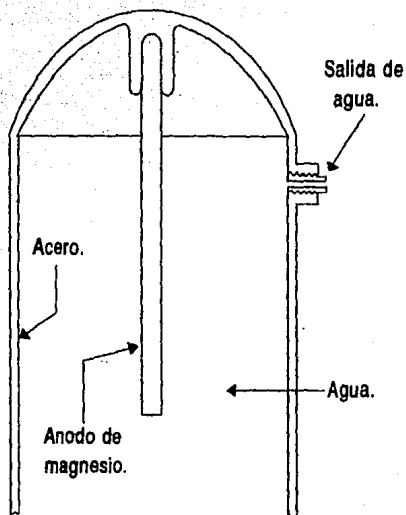


Fig. 3.2 Anodo de Sacrificio o Galvanico.

Fuente : Ref. 41, p 80





Fuente: ref. 23, p.p. 295.

**Fig. 3.3 Protección catódica de un tanque usando ánodo de sacrificio.**

**TABLA 3.1 REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE PARA LA PROTECCION CATODICA.**

ESTRUCTURA	AMBIENTE	CONDICIONES	DENSIDAD (mA/ft <sup>2</sup> )
Tanques.	Acido sulfúrico caliente.	Estáticas.	50,000
Tuberías y tanques de almacenamiento.	Subterráneas. (suelo)	Estáticas	1-3
Tuberías.	Agua dulce.	Fluyendo	5-10
Calentadores	Agua dulce caliente.	Flujo lento	1-3
Varillas reforzadas.	Concreto.	Estáticas.	0.1-1.5

FUENTE: M. Stern, *Symposium on Corrosion Fundamentals*, 1956:84 University of Tennessee Press.

**TABLA 3.2 COMPARACION DE ANODOS DE SACRIFICIO Y DE CORRIENTE IMPRESA PARA LA PROTECCION CATODICA.**

ANODOS DE SACRIFICIO			
	Magnesio	Zinc	Aluminio-Estaño
Consumo teórico lb/amp-año.	9	23	6.5
Consumo actual lb/amp-año.	18	25	16-20
Potencial vs. Cu/CuSO <sub>4</sub>	-1.7	-1.15	-1.3

Fuente: Morgan J. H, "Cathodic Protection", Mc. Millan, New York, 1960

ANODOS DE CORRIENTE IMPRESA		
Material.	Aplicaciones Típicas.	Pérdidas Típicas lb/amp-año.
Acero	suelo, agua dulce y salada.	20
Aluminio	suelo, agua dulce y salada.	10-12
Grafito	suelo y agua dulce.	0.25-5.0
Alto Silicón hierro y Si-Cr Fe.	suelo, agua dulce y salada.	0.25-1.0
Plomo	agua salada.	0.1-0.25
Titanio platinizado	agua salada.	nulas.

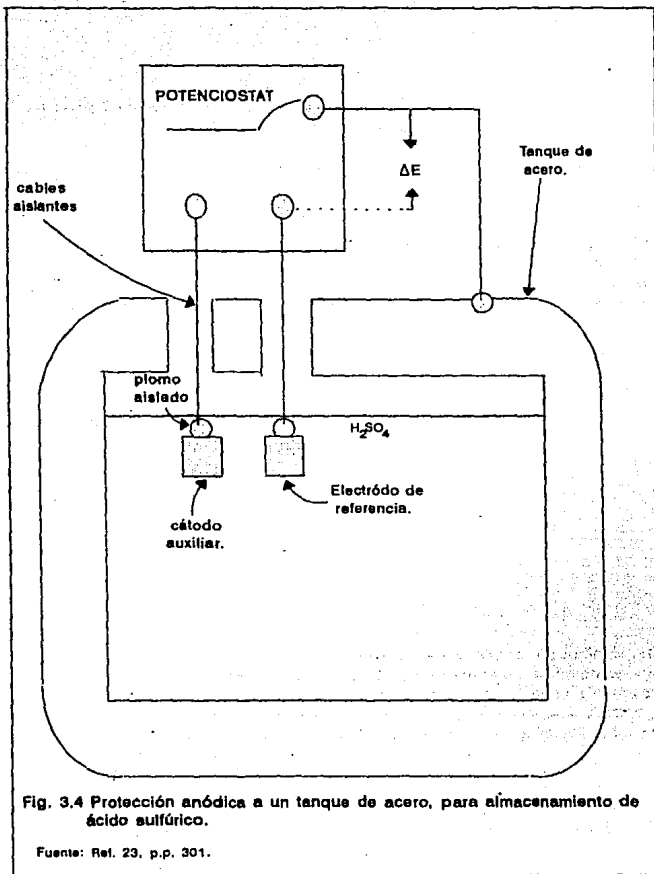


Fig. 3.4 Protección anódica a un tanque de acero, para almacenamiento de ácido sulfúrico.

Fuente: Ref. 23, p.p. 301.

### **3.4 RECUBRIMIENTOS.** <sup>(23),(69)</sup>

El uso de materiales no metálicos como forros y recubrimientos, en combinaciones con el acero u otros materiales ha sido y seguirá siendo importante para combatir la corrosión.

Los materiales de recubrimiento representan solamente una pequeña parte de cualquier esfuerzo que se haga por controlar la corrosión, lo único sensato es economizar mediante el uso de los mejores materiales, ahorrando en factores más costosos como son la mano de obra, pérdidas de tiempo de producción, reemplazo de estructuras y equipo, etc<sup>1</sup>.

Dentro del campo de los recubrimientos protectores los más importantes son:

- Vinílicos.
- Inorgánicos.
- Orgánicos.
- Otros.

#### **3.4.1 VINILICOS.** <sup>(23)</sup>

Los recubrimientos vinílicos son altamente resistentes a la penetración de la humedad o a los ataques por ácidos, álcalis y sales. De muchos recubrimientos vinílicos se tienen registros de su duración, estos exceden a los 20 años sin necesidad de mantenimiento, aún en condiciones de inmersión. En tanques u otros servicios existen también mastiques que permiten aplicaciones de películas gruesas con un número mínimo de capas<sup>2</sup>.

#### **3.4.2 INORGANICOS.** <sup>(69)</sup>

Este singular tipo de recubrimientos, proporciona protección duradera y completa

---

1 Para mayor información consultar las referencias 55 y 95; la referencia 46 analiza el tiempo de vida de los recubrimientos.

2 Para mayor información revisar las referencias 21 y 34.

contra alta humedad relativa, atmosfera marina, agua, salpicaduras de sal y la mayoría de las atmosferas industriales.

Un ejemplo de estos son los recubrimientos base zinc, estos tienen buena resistencia y se utilizan ampliamente en acero, además han demostrado tener una capacidad inigualable para ser usados en el interior de tanques que contengan productos del petróleo, hidrocarburos aromaticos o clorados, cetonas, esterese, alcoholes y otras numerosas soluciones químicas. El zinc tiene la ventaja de ser anódico al acero y por ende protegerá las zonas expuestas mediante una acción galvánica.

El cadmio se comporta de modo muy similar al zinc, cuando se aplica un recubrimiento al acero se deben realizar pruebas con el zinc y el cadmio, cuando es necesario determinar la selección más económica para un ambiente.

El plomo tiene su mayor aplicación en la producción de chapa aplomada, que se usa como material para tejados, cornizas y desagües.

El recubrimiento de aluminio sobre acero tiene un desempeño similar al de los recubrimientos del zinc y presenta buena resistencia en muchas atmósferas.

#### **3.4.4 ORGANICOS.<sup>(69)</sup>**

Estos recubrimientos deben ser compatibles con la capa de acabado, tener buena adherencia a la superficie, tolerar impurezas en la misma y suprimir o retardar la corrosión que ocasionan dichas impurezas. También debe secar con la rapidez suficiente para que permita la aplicación del recubrimiento antes de que la superficie se contamine. Estos deben ser resistente a la humedad y a los agentes químicos.

Estos son adecuados para usarse en acero, acero galvanizado, metales no ferrosos y concreto; además se puede usar como segundo recubrimiento, en superficies previamente recubiertas con zinc u otro material<sup>1</sup>.

Se utilizan como forros de equipos tales como : tanques, tuberías, líneas de bombeo y recipientes especiales de embarque ( contenedores ), constituyen a menudo un medio económico de control de la corrosión.

No se deben utilizar recubrimientos delgados del tipo de pintura, aplicados en aspersión o con brocha y de menos de 10 mm. de espesor, en servicios en los que se requiere una protección completa, para evitar el ataque rápido al sustrato metálico.

Los forros más seguros para servicios corrosivos son los que se adhieren al metal y

---

1 Para recubrimientos mixtos consultar la referencia 42.

se acumulan en efectos de capas múltiples o laminados hasta espesores de más de 100 mils. Una buena preparación superficial, se debe considerar como requisito mínimo para cualquier aplicación.

Para recubrimiento en el interior de tanques, sobresalen los recubrimientos basados en resinas epoxicas. Las formulaciones de este tipo incluyen recubrimientos epoxi-ester, epóxicos curados con poliamidas y aminas, un extraordinario recubrimiento epoxico-fenolico de horneo a baja temperatura y epóxicos de alquitrán de hulla catalizados, así como un grupo de recubrimientos epóxicos sin solvente y otro de epoxicos dispersados en agua. Estos proporcionan excepcional resistencia a solventes y álcalis fuertes.

#### 3.4.4 OTROS.

Con frecuencia se usan recubrimientos de cerámica o carbono y ladrillos como recubrimiento exterior sobre forros de plástico o membranas, cuando la temperatura operacional sobrepasa la que pueda tolerar el material sin protección.

Ha existido desde hace tiempo acero forrado o recubrimiento de metal o vidrio como método para evitar el elevado costo de las aleaciones sólidas. Los métodos para los metales incluyen la inmersión en caliente, la aspersión, la electrodeposición y el plaqueado no eléctrico. Sin embargo, esas deposiciones tienden a ser ligeramente imperfectas o porosas, cuando su espesor es de menos de 5 mils<sup>1</sup>.

El acero vidriado tiene todas las ventajas y desventajas del vidrio, además de una alta resistencia a la tracción.

Un nuevo proceso implica la formación explosiva. El metal resistente a la corrosión se adhiere a un metal de respaldo de acero mediante la fuerza generada por cargas explosivas situadas de modo apropiado. Se pueden ligar secciones relativamente gruesas de metal, para esta técnica en placas. Se puede obtener un compuesto químico de un metal en forma de película, aplicado a un metal sumergiéndolo o rociándolo con una solución química escogida. Como ejemplo se tiene la anodización de aluminio y los recubrimientos de fosfato o cromato sobre acero o zinc.

#### 3.5 INHIBIDORES. <sup>(2)</sup>

Un inhibidor es una sustancia la cual, cuando se adiciona en concentraciones pequeñas a un ambiente hace disminuir su velocidad de corrosión, un inhibidor puede

---

1 La referencia 48 muestra la técnica de esparado.

ser considerado un catalizador de retardo<sup>1</sup>.

Muchos inhibidores han sido desarrollados por experimentación empírica, por estas razones, se pueden clasificar en:

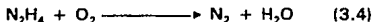
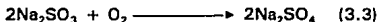
- Inorgánicos.
- Orgánicos.
- En fase vapor.

### 3.5.1 INORGANICOS.<sup>(76)</sup>

Dentro de estos se presentan tres grupos que son los más representativos, los cuales se describen a continuación:

• **venenos de conversión de hidrógeno.** Sustancias como los iones arsénico y antimonio, retardan la reacción de conversión de hidrógeno. Como consecuencia estas sustancias son muy efectivas en soluciones ácidas, pero son inefectivas en ambientes donde otros procesos de reducción (como el oxígeno) controlan la reacción.

• **eliminadores de oxígeno.** Estas sustancias actúan eliminando agentes corrosivos de soluciones, ejemplos de este tipo de inhibidores son el sulfito de sodio y la hidrazina que eliminan el oxígeno disuelto de las soluciones acuosas como se indica en las ecuaciones (3.3) y (3.40)



Dichos inhibidores trabajan efectivamente en soluciones donde la reducción del oxígeno es la reacción controlante de la corrosión, aunque no son efectivas en soluciones ácidas. Otro ejemplo de estas, es el nitrito de sodio solo o en unión con otros inhibidores inorgánicos como los fosfatos, se han usado para proteger líneas de conducción y buques cisterna.

El benzoato sódico, actúa como un inhibidor para el acero dulce. También la cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  puede actuar como un inhibidor catódico al producirse la

---

<sup>1</sup> Para mayor fundamentación y mecanismos consultar las referencias 26, 33 y 68.



precipitación de  $\text{CaCO}_3$  con dureza temporal o  $\text{CO}_2$  disuelto. Las partículas coloidales de  $\text{CaCO}_3$  están cargadas positivamente y son atraídas por las áreas catódicas donde su deposición corta la corriente de corrosión.

• **oxidadores.** Sustancias como el cromato, fosfatos, boratos, silicatos y sales férricas, también actúan para evitar la corrosión de metales y aleaciones que muestran transición activo-pasiva, como el hierro y sus aleaciones (acero inoxidable); así mismo, estas controlan la velocidad de corrosión al actuar sobre el ánodo. No es aconsejable el uso de alguno de estos bajo todas las condiciones.

El empleo inapropiado de cromato puede acelerar más que inhibir la corrosión. Si se presenta polarización de hidrógeno, la adición de cromato o de cualquier otro oxidante causa una despolarización e incrementa el flujo de la corriente de corrosión. Por otra parte, si hay una cantidad insuficiente de inhibidor para proveer una película completa sobre el ánodo, las pequeñas superficies no cubiertas se corroen con creciente rapidez, originándose así picaduras.

El uso de silicato sódico proporciona muchos ejemplos de control de corrosión por inhibidores. Un ejemplo puede citarse, en una conducción de salmuera de 16 Kms. se habían producido muchas pequeñas filtraciones, su sustitución parecía inminente con un costo de 80,000 dólares, sin embargo, la adición de pequeñas concentraciones de silicato sódico a la salmuera redujo la corrosión a un grado tal que dos años y medio después, estaba todavía en uso la conducción y el número de filtraciones se había reducido.

### 3.5.2 ORGANICOS. <sup>(23)</sup>

Los inhibidores orgánicos pueden actuar de muy diversos modos. Los coloides orgánicos forman capas protectoras por adsorción.

### 3.5.3 EN FASE VAPOR. <sup>(23)</sup>

Son similares al tipo de adsorción y poseen una alta presión de vapor. Como consecuencia estos materiales pueden ser usados para la protección de los metales de la atmósfera, además no se ponen en contacto con los metales directamente; los inhibidores se transportan por sublimación y condensación a la superficie metálica; formando así, la capa inhibidora o protectora.

Estos inhibidores se usan para proteger conducciones de vapor en presencia de  $\text{CO}_2$ , o la corrosión del hierro y acero en presencia de humedad y  $\text{SO}_2$ . La tabla 3.3 muestra los principales inhibidores aplicados en situaciones particulares.

Tabla 3.3 Lista de Inhibidores

METAL	AMBIENTE	INHIBIDOR
ALUMINIO	ACIDO CLORHIDRICO 1M	0.002 Alfanilacridina, betanaftequina, acridina, tiourea o fenilquinoleina.
ALUMINIO	ACIDO NITRICO 2-5 x	0.05 x hexametilentetramina. "
ALUMINIO	ACIDO NITRICO 10 x	0.1 x hexametilentetramina. "
ALUMINIO	ACIDO NITRICO 20 x	0.5 x hexametilentetramina. "
ALUMINIO	ACIDO FOSFORICO	cromatos alcalinos.
ALUMINIO	ACIDO FOSFORICO 20 x	0.5 x cromato de sodio.
ALUMINIO	ACIDO FOSFORICO 20-80 x	1.0 x cromato de sodio.
ALUMINIO	ACIDO SULFURICO CONC.	5.0 x cromato de sodio.
ALUMINIO	ALCOHOL ANTICONGELANTE	nitrato de sodio y molibdato de sodio.
ALUMINIO	AGUA ERONDA	silicato de sodio.
ALUMINIO	ERONOFORNO	silicatos alcalinos.
ALUMINIO	TETRACLORURO DE CARBONO	0.05 x formida. "
ALUMINIO	AROMATICOS CLORADOS	0.1-0.2 x nitroclorobenceno.
ALUMINIO	AGUA CLORADA	silicato de sodio.
ALUMINIO	CLORURO DE CALCIO SAT.	silicatos alcalinos.
ALUMINIO	ETANOL CALIENTE	dicromato de potasio.
ALUMINIO	ETANOL COMERCIAL	0.03 x carbonatos alcalinos, lactatos, acetatos o boratos.
ALUMINIO	ETILENGLICOL	tungstato de sodio o molibdato.
ALUMINIO	ETILENGLICOL	boratos y fosfatos alcalinos, 0.01-1.0 x nitrato de sodio.
ALUMINIO	PEROXIDO DE HIDROGENO ALCALINO	silicato de sodio.
ALUMINIO	PEROXIDO DE HIDROGENO	nitratos metalicos alcalinos, metasilicato de sodio.
ALUMINIO	ALCOHOL METILICO	clorato de sodio mas nitrato de sodio.
ALUMINIO	CLORURO METILICO	agua.

Tabla 3.3 Lista de Inhibidores (cont.)

METAL	AMBIENTE	INHIBIDOR
ALUMINIO	POLIOXOLANQUENOS FLUIDOS DE GLICOL	2 x ácido dimero de Emery (ácido dilinoleico), 1.25 X N (CN No. 2), 0.05-0.2 X mercaptobenzotiazol.
ALUMINIO	AGUA DE MAR	0.75 X estereato zincilico.
ALUMINIO	CARBONATO DE SODIO DIL.	fluosilicato de sodio. "
ALUMINIO	NIDROXIDO DE SODIO 1 x	silicatos alcalinos, 3-4 x de permanganato de potasio.
ALUMINIO	NIDROXIDO DE SODIO 4 x	18 X glucosa.
ALUMINIO	HIPOCLORITO DE SODIO CONTENIDO EN BLANQUEADORES	silicato de sodio. "
ALUMINIO	ACETATO DE SODIO	silicatos alcalinos. "
ALUMINIO	CLORURO DE SODIO 3.5 x	1 x cromato de sodio.
ALUMINIO	CARBONATO DE SODIO 1 x	0.2 X silicato de sodio.
ALUMINIO	CARBONATO DE SODIO 10 x	0.05 X silicato de sodio.
ALUMINIO	SULFURO DE SODIO	1 X metasilicato de sodio.
ALUMINIO	50 x SOLUCION DE TRICLOROACETATO DE SODIO	0.5 X dicromato de sodio. "
ALUMINIO	ALCOHOL TETRAHIDROFURFURILICO	1 x nitrato de sodio ó 0.3 x cromato de sodio.
ALUMINIO	TRITANOLAMINA	1 X metasilicato de sodio.
BRONCE	TETRACLORURO DE CARBONO LIQUEDO	0.001-0.1 x anilina. "
BRONCE	FURFURAL	0.1 X mercaptobenzotiazol.
BRONCE	POLIOXOLANQUENOS FLUIDOS DE GLICOL	2 x ácido dimero de Emery (ácido dilinoleico), 1.25 X N (CN No. 2), 0.05-0.2 X mercaptobenzotiazol.
BRONCE	50 x DE SOL. DE TRICLOROACETATO DE SODIO	0.5 x dicromato de sodio. "
ACERO CON CROMIO	55/45 ETILENGLICOL-AGUA	1 x fluorofosfato de sodio.
COBRE	HIPOCABRBUROS CONTENIENDO SULFUROS	p-hidroxibenzenofeona
COBRE	FLUIDOS DE POLIOXALANQUENOS	0.05X-0.2X mercaptobenzotiazol
COBRE Y BRONCE	ACIDO SULFURICO DILUIDO	benzil tiocianato

Tabla 3.3 Lista de Inhibidores (cont.)

METAL	AMBIENTE	INHIBIDOR
CORRE Y LATON	ETILENGLICOL	fosfatos y boratos alcalinos
CORRE Y LATON	ALCOHOL POLIINIBRICO	0.4-1.6% fosfato de sodio + 0.3-0.6% silicato de sodio
CORRE Y LATON	SULFUROS EN SOLUCION DE HEDCENO	0.2% 3,10 antraquinona
CORRE Y LATON	ALCOHOL-AGUA	0.25% Acido benzoico o 0.25% benzoato de sodio con pH de 7.5 a 10
BIENNO GALVANIZADO	AGUA DESTILADA	15 ppm de calcio y metafosfato de zinc
BIENNO GALVANIZADO	55/45 ETILENGLICOL-AGUA	0.025% fosfato trisodico
MAGNECIO	ALCOHOL	sulfato alcalino
MAGNECIO	ALCOHOL METILICO	1% Acido oleico o estearico neutralizado con amoniaco
MAGNECIO	ALCOHOL POLIINIBRICO	fluoruros solubles a pH de 8 a 10
MAGNECIO	GLICERINA	sulfatos metalicos
MAGNECIO	TRICLOROETILENO	0.05 % formamida *
MAGNECIO	AGUA	1 % dicromato de potasio **
MONEL	TETRACLORO DE CARBONO HUMEDO	0.001-0.1% anilina
MONEL	CLORO DE SOBIO AL 1%	0.1% nitrito de sodio
NIQUEL PLATEADO	HIPOCLORITO DE SOBIO	silicato de sodio
ACERO INOXIDABLE	ACIDO SULFURICO 2.5%	5-20 ppm sulfato de calcio pentahidratado
ACERO INOXIDABLE	CIANAMIDO	50-500 ppm fosfato amonico
ACERO INOX. 18-8	PERMANGANATO DE POTASIO	silicato de sodio
ACERO INOX. 18-8	CLORO DE SOBIO 4%	0.2% hidroxido de sodio
ACERO	ACIDO CITRICO	sales de calcio
ACERO	ACIDO SULFURICO DILUIDO	aminas aromaticas
ACERO	ACIDO SULFURICO 60-70%	arsenico
ACERO	ACIDO SULFURICO 90%	trifluoruro de boro 2%
ACERO	NITRATO DE AMONIO	0.2% tiourea
ACERO	NITRATO DE AMONIO EN NEZA	0.05-0.10% amonio

Tabla 3.3 Lista de Inhibidores (cont.)

METAL	AMBIENTE	INHIBIDOR
ACERO	TETRACLORURO DE CARBONO SEQUEO	0.001-0.1% anilina
ACERO	ALCOHOL ETILICO ACIDOSO O PURO	0.02% etilamina o dietilamina
ACERO	55/45 ETILENGLICOL-AGUA	0.025% fosfato trisodico
ACERO	ETILENGLICOL	fosfatos y boratos alcalinos
ACERO	ALCOHOL ETILICO AL 70%	0.15% carbonato de amonio
ACERO	ISOPROPANOL 30%	0.02% nitrato de sodio max 0.015% acido oleico
ACERO	1:4 METANOL-AGUA	hasta 4l agua y 1l metanol adicionar 1 gramo de piridina
ACERO	ACIDO FOSFORICO CONCENTRADO	0.01-0.5% dodecilamina
ACERO	CLORURO DE SODIO AL 0.05%	0.2% nitrato de sodio
ACERO	AGUA	acido benzoico
ACERO	AGUA DESTILADA	aerosol (un agente ionico humectante)
TITANIO	ACIDO CLORHIDRICO	agentes oxidantes como el acido cronico o sulfato de cobre
TITANIO	ACIDO SULFURICO	agentes oxidantes o sulfatos inorganicos
ZINC	AGUA DESTILADA	15 ppm de una mezcla de calcio y metafosfatos

---

CAPITULO.

## **CUATRO.**

---

### **Indice de fluidos corrosivos.**

#### **4.1 ENFOQUE.**

El catalogar a un fluido como corrosivo, representa una dificultad en el sentido que en determinadas condiciones y en presencia de ciertas impurezas, puede existir corrosión, mientras que en otros ambientes no.

Esta es la gran dificultad para el ingeniero de diseño y para el supervisor, ya que existe un infinito número de combinaciones en cuanto a condiciones tales como: tipo de fluido, impurezas, temperatura, velocidad, presión, tipo de material de construcción, geometría del equipo, etc.

De esta forma, es posible mencionar a los fluidos en una clasificación general, a partir de las experiencias, recomendaciones y criterios, se puede inferir a grandes rasgos el comportamiento de fluidos con condiciones no estudiadas.

Esta clasificación abarca ácidos, solventes, bases, agua, sales y metales fundidos.

#### **4.2 ACIDOS.**

El amplio uso de estos fluidos los coloca en una importante posición, con respecto al costo por corrosión que ocasionan en su manejo, ya que dependiendo de la naturaleza del ácido, la corrosión aumenta con su concentración y en otros disminuye.

El ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) es uno de los productos químicos de mayor demanda, ya que sus usos son amplios, principalmente en la producción de ácido clorhídrico, fertilizantes, tintas, explosivos, detergentes, refinación del petróleo, baterías, etc.

Materiales como acero al carbón son usados ampliamente en concentraciones arriba del 70 %, de esta manera se elaboran tuberías, tanques de almacenamiento, carros

tanque y tambores para manejar ácido al 78 %, 93 %, 98 %; no debe usarse si el  $H_2SO_4$  tiene una concentración menor al 65 % ; este fluido adicionado a la alta velocidad afectan a las bombas, las cuales no deben fabricarse con acero al carbón.

El plomo es usado extensivamente para el manejo de  $H_2SO_4$  a concentraciones menores del 70% y complementa el uso del acero al carbón, es decir; plomo ( hasta 70 %) y acero al carbón ( > 70 % ); el plomo de alta pureza es menos resistente.

El hierro forjado con silicón (14.5%) posee una resistencia en todo el rango de concentraciones del  $H_2SO_4$ , equipo hecho de esta aleación incluye: bombas, válvulas, intercambiadores de calor, concentradores, serpentines, ventiladores, recipientes, tanques, tuberías y accesorios, espesas y secciones de torres, a esta aleación se le conoce comercialmente con el nombre de Duriron.

Ocasionalmente se utiliza el acero inoxidable tipo 316 en soluciones frías y muy diluidas de ácido sulfúrico, en donde las condiciones no son fuertemente reductoras.

Aleaciones como monel, inconel y base níquel encuentran aplicaciones en ácido sulfúrico bajo condiciones reductoras y temperaturas moderadas.

No deben usarse aleaciones de cobre o latones con ácido sulfúrico, ya que debido a su susceptibilidad, a la aireación y a otras condiciones oxidantes, el latón sufre deszincificación.

Aleaciones con níquel, molibdeno y cromo como el hastelloy B, y clorimet 2 ( 2/3 Ni, 1/3 Mo ), presentan buena resistencia a la corrosión de  $H_2SO_4$  a concentraciones altas e intermedias.

Metales nobles como el oro y el platino, muestran excelente resistencia al  $H_2SO_4$  y son usados solamente cuando no se tolera la corrosión o no se permite la contaminación.

El ácido nítrico (  $HNO_3$  ) es un poderoso agente oxidante; el material más ampliamente usado es el acero inoxidable y sus aleaciones, las cuales dependen de su contenido en cromo, la cantidad mínima de cromo para el uso con  $HNO_3$  es de un 15 %, la adición de níquel aumenta la resistencia a la corrosión. Los tipos más utilizados son el 304, 309, 310 y el 436, también es conveniente el uso del titanio, pero es un material de alto costo.<sup>(47)</sup>

El Duriron es un material resistente aunque solo se encuentra en forma fundida ( o colada ) lo que proporciona propiedades mecánicas bajas, en concentraciones al 45% el duriron es excelente aun si el  $HNO_3$  se encuentra a temperaturas de ebullición. El ácido nítrico fumante ( con  $NO_2$  disuelto en el ácido ) es enfriado en equipo de duriron durante su procesamiento, también se utiliza para mezclas de  $HNO_3$  con  $H_2SO_4$ ,

## sulfatos y nitratos.

La resistencia del titanio incluye todas las concentraciones y temperaturas, hasta por encima del punto de ebullición atmosférico ( muestra menos de 5 mpy con ácido al 65% a 350 °F). Sin embargo, la presencia de iones oxidantes como el cromo auxilia al titanio si la corrosión se acelera.

El aluminio muestran excelente resistencia pero es atacado rapidamente si la concentración baja del 80 %, hierro colado, hierro-níquel colado, magnesio y acero al carbón, el cobre, níquel, latones, bronce, monel, plata, hastelloy b, clorimet 2, y plomo, son inadecuados para manejar  $\text{HNO}_3$ .

En el sistema  $\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{SO}_4-\text{HNO}_3$ , el acero es utilizado cuando el contenido de agua es bajo.

Para el ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ )<sup>(62),(53)</sup> la dificultad aumenta, es requerido un cuidado extremo en la selección de materiales para el manejo de este ácido, no importando su concentración diluida o extrema. El  $\text{HCl}$  ataca a la mayoría de los metales y aleaciones. Cuando aireación o agentes oxidantes se encuentran presentes, las condiciones corrosivas son extremas. El ácido muriático (  $\text{HCl}$  comercial ) se comporta en forma distinta al  $\text{HCl}$  químicamente puro y a su vez al grado reactivo. Muchos productos de este ácido estan apareciendo en el mercado y son usados en la industria de proceso; los subproductos de  $\text{HCl}$  contienen un sinnúmero de impurezas, las cuales dependen de el proceso utilizado, trazas de cloruro de fierro son frecuentemente agentes de picado en los materiales; si el  $\text{HCl}$  se encuentra caliente y contiene estas trazas, produce boquetes que no pueden ser sellados con metales, aleaciones o pastas no metálicas.

Los límites de corrosión ( en mpy ) en los metales son de tolerancia mayor cuando manejan  $\text{HCl}$ . Los materiales resistentes son costosos.

El duriclor ( hierro-silicon-molibdeno ) resiste más al  $\text{HCl}$  que las aleaciones que no contienen molibdeno; el duriclor muestra pasividad, en su inicio se corroe a una velocidad alta, pero el ataque disminuye rápidamente con el tiempo; ésta aleación es usada en la industria para todas las concentraciones de ácido clorhídrico y muriático a temperaturas moderadas; si el ácido se encuentra cerca de su punto de ebullición, el duriclor es atacado rápidamente, sin embargo es utilizado para la fabricación de bombas con un buen servicio en concentraciones al 30 % y lodos con un 10 % de  $\text{HCl}$  a temperatura ambiente.

El clorimet y los hastelloy son similares al duriclor y por su contenido de molibdeno; muestran resistencia aún por encima de su punto de ebullición, pero son atacados en presencia de aireación y agentes oxidantes.



El clorimet 3 y hastelloy C son usados en HCl diluido a temperaturas moderadas y exhiben mejor resistencia en ambientes oxidantes debido a su alto contenido en cromo.

El níquel resistente solo es disponible para bajas concentraciones de HCl a temperatura ambiente, acero inoxidable 316 también es usado en concentraciones bajas. Acero al carbón, zinc, magnesio, hierro fundido y aluminio, nunca son usados para servicio con HCl, la corrosión se presenta rápidamente a pH= 5-4 o más bajo, si se incluye velocidad es peor.

El estaño se utiliza en placas para soluciones que contienen pequeñas cantidades de ácido, como en los productos alimenticios, la aireación también destruye el estaño.

La importancia de los efectos de la aireación y los agentes oxidantes, sobre la corrosión por HCl, es debida a la influencia de un gran número de materiales; particularmente en el cobre y sus aleaciones, el material muestra resistencia al HCl bajo condiciones reductoras, pero en condiciones oxidantes es atacado rápidamente, el cobre completamente inmerso en HCl muestra baja velocidad de corrosión ; pero semi-inmerso en HCl es atacado rápidamente en la línea hasta donde llega el líquido a cubrir, esto es debido a la presencia de aire en esta área. Estos comentarios también aplican a los materiales sin soporte de cromo, tal como el níquel y níquel-molibdeno. Estas aleaciones no deben ser usadas en HCl si la aireación o los agentes oxidantes como el  $\text{HNO}_3$  y el cloruro férrico (  $\text{FeCl}_3$  ) son considerables. El  $\text{FeCl}_3$  en pequeñas cantidades es más destructivo que el oxígeno usualmente encontrado en los procesos de fabricación de ácidos.

Dos condiciones generales deben ser consideradas; HCl con y sin aireación/agentes oxidantes, es difícil obtener condiciones libres de aire en las plantas de proceso, porque el ácido es expuesto al aire, una causa común de aireación es encontrada en las bombas, las cuales frecuentemente conducen aire a través de sus empaques durante su operación.

Un excelente ejemplo del efecto destructivo de la aireación, fue encontrado en una planta que manejaba un licor de proceso con HCl diluido, el equipo hecho de clorimet 2 y hastelloy B duro poco, aún cuando estas aleaciones muestran excelente resistencia al HCl a todas las concentraciones y temperaturas, se encontró, que el licor fue agitado por espumas con aire en contacto con las aleaciones. El servicio satisfactorio fue obtenido al reemplazar el clorimet 2 por clorimet 3 ( con 18% de Cromo ).

En otra experiencia de planta, el clorimet 2 usado en bombas con HCl diluido caliente no resistió. La investigación mostró que el HCl contenía pequeñas cantidades de  $\text{HNO}_3$  las cuales no habían sido mencionadas debido a que se pensó que cantidades tan pequeñas no serían nocivas al material.

Sujetos a limitaciones de temperatura muchos plásticos y hules son disponibles para todas las concentraciones de HCl; el acero forrado con hule ha sido usado en tuberías y recipientes para HCl. La madera encuentra aplicación como un material barato para HCl diluido.

Cualquier material de construcción es disponible para el cloruro de hidrógeno seco (HCl en gas, para convertirse en ácido clorhídrico se burbujea este gas en agua). Sin embargo la presencia de humedad cambia el comportamiento y el HCl causa corrosión.

El titanio es resistente al cloruro húmedo, pero no al cloruro seco; el zirconio es resistente al cloruro seco pero no al cloruro húmedo.

El ácido fluorhídrico (HF)<sup>(23)</sup>, es único en su comportamiento de corrosión. Hierro-silicón y vidrio son generalmente resistentes a muchos ácidos, pero son atacados rápidamente por el HF; el magnesio muestra baja resistencia a muchos ácidos, pero este metal resiste ataques por HF. Algunos contenedores de embarque para este ácido son elaborados de magnesio, bajo concentraciones de 1% algunos ataques ocurren, pero en concentraciones de 5% o más; el magnesio es prácticamente inmune a la corrosión, debido a la formación de una capa de fluoruro en la superficie, así, la corrosión es retardada. Este efecto en la superficie aplica a otros metales y aleaciones que resisten la corrosión por ácido fluorhídrico, el cual es un fluido muy tóxico igual que el fluoruro de hidrógeno ( HF en Gas ).

El acero es adecuado para manejar concentraciones de 60 a 100 %, bajo 60 % la corrosión aumenta rápidamente, el HF comercial al 60 % contiene  $H_2SO_4$  y ácido fluosilícico como impurezas, las cuales reducen la corrosión a un nivel satisfactorio.

El monel forjado resiste todas las concentraciones y temperaturas ( por encima de la ebullición del HF ), pero al igual que con el HCl las sales oxidantes y la aireación aumentan el ataque. Equipo con recubrimiento de monel es usado en recipientes a presión para disminuir el costo del equipo. La plata en algunas ocasiones es utilizada para servicios más severos como HF concentrado y a ebullición.

El cobre es adecuado en soluciones diluidas de HF. El cobre es más sensitivo que el monel a la aireación, a agentes oxidantes y a la corrosión-erosión debido a flujos de alta velocidad o si existen sólidos en suspensión; estos comentarios aplican en general a bronces y latones; los cuproniques son mejores que el cobre pero no tan resistentes como el monel, el plomo muestra mediana resistencia al ataque por HF en concentraciones menores de 60 % a temperatura ambiente. El HF con sales oxidantes como los iones férricos y cúpricos, además de la aireación causan más problemas; por lo que deben usarse aleaciones como el durimet 20, el 25-20 ( Cr-Ni ), el acero inoxidable 304 no es adecuado debido a su susceptibilidad al picado, el tipo 410 es sensitivo a la corrosión-erosión.

El HF particularmente en concentraciones fuertes, contiene una cantidad de sólidos en suspensión, la sedimentación de algunas de las impurezas en tanques o recipientes es recomendado para evitar depósitos de sales en la tubería y otros equipos, ya que pueden formar agujeros en los metales y aleaciones. El colocar la tubería de salida del tanque a una determinada distancia por arriba del fondo mismo, permite sedimentar lodos, además la limpieza adicional del tanque es requerida. El HF anhidro no es particularmente corrosivo y se utiliza acero al carbón en partes críticas como válvulas y flechas de bombas; a temperaturas arriba de 150 °F el monel y los cuproniques son preferidos a los aceros, ya que estos materiales pueden ser usados hasta 1000°F.

El HF gaseoso y seco, como el cloruro son prácticamente no corrosivos a metales y aleaciones, sin embargo este gas en condiciones húmedas y en soluciones es agresivo, el ataque es en todos los metales excepto oro y platino.

Para el caso del ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ )<sup>(23)</sup> la corrosión es función de los métodos de manufactura y las impurezas presentes en el producto comercial terminado; fluoruros, cloruros y  $H_2SO_4$  son sus principales impurezas.

Las dos aleaciones más ampliamente usadas son el acero inoxidable 316 y el Durimet 20, estos muestran un ataque muy pequeño en concentraciones mayores a 85 % y a temperaturas incluyendo la de ebullición del  $H_3PO_4$ .

El plomo y sus aleaciones son usados en temperaturas por arriba de los 200 °C en concentraciones arriba del 80 %.

El plomo forma fosfatos insolubles que proporcionan buena protección; hierro-silicon y vidrio muestran buena resistencia en  $H_3PO_4$  puro.

El cobre y sus aleaciones no son usados con ácido fosfórico; aleaciones níquel-molibdeno exhiben resistencia a ácidos puros, pero son atacados cuando la aireación y los agentes oxidantes se encuentran presentes.

Aluminio, hierro fundido, acero, latón y aceros inoxidables martensítico y ferrítico exhiben una baja resistencia a la corrosión.

En cuanto a ácidos orgánicos, el ácido acético es probablemente el más importante desde el punto de vista de la cantidad producida. Muchos otros ácidos orgánicos muestran un comportamiento de corrosión similar y en ausencia de datos se consideran con un comportamiento parecido a éste.

El acero inoxidable 304 y 316, el cobre y bronce, aluminio 1100 y 3003, durimet 20, duriron y hastelloy C son utilizados; el 316 es preferido en condiciones más severas incluyendo al ácido acético glacial ( 98% ) a temperaturas elevadas; el 304, aluminio y cobre manejan ácido glacial a temperatura ambiente; el durimet se utiliza en bombas,

tuberías y columnas. En un intercambiador con condiciones altas de presión y temperatura, la corrosión ocurrió rápidamente en el tipo 316 en la salida caliente y no ocurrió en la salida fría. Se reemplazaron los tubos con material cobre, y presentó mayor corrosión en la salida fría y menor en la salida caliente. El resultado neto fue mayor vida para los tubos de cobre.

Los ácidos orgánicos son débiles con respecto a los ácidos inorgánicos, debido a que los primeros son ligeramente ionizados; el ácido fórmico, es uno de los más fuertes ácidos orgánicos y muy corrosivo. El maleico y láctico son más agresivos que el acético con respecto al ataque intergranular sobre el acero inoxidable, los ácidos grasos como el esteárico, son menos corrosivos.

El ácido nafténico presenta problemas de corrosión en el refinamiento del petróleo, principalmente por las temperaturas involucradas.

El ácido cítrico y tartárico son encontrados en productos alimenticios. La tabla 4.1 proporciona datos de corrosión para algunos ácidos.

#### 4.3 SOLVENTES ORGANICOS.

Además de los ácidos, los solventes orgánicos pueden causar corrosión cuando agua y ácidos están presentes. En estado puro estos solventes no atacan al acero, pero el plástico y el hule son vulnerables, la tabla 4.2 muestra las fallas típicas de corrosión y su prevención<sup>1</sup>.

#### 4.4 BASES. <sup>(23),(51)</sup>

Las más comunes bases o alcalis como la sosa caústica y la potasa caústica ( NaOH y KOH respectivamente ) no son corrosivos y pueden ser manejados en acero, no obstante se deben proteger contra la corrosión por esfuerzos en ciertas concentraciones y temperaturas.

El níquel y sus aleaciones son extensivamente usados para combatir la corrosión por caústicos; este material es adecuado bajo prácticamente todas las condiciones de concentración y temperatura, de hecho, ésta resistencia es directamente proporcional al contenido de níquel en una aleación. Con una cantidad de 2 % de níquel en el hierro fundido, los resultados son benéficos.

---

<sup>1</sup> Para mayor información consultar la referencia 4.

El monel ( 70% de níquel ), acero inoxidable ( con 8 a 20 % de níquel ) y otras aleaciones con soporte de níquel son seleccionados.

El aluminio es un material débil para el manejo de cáusticos. Este metal y sus aleaciones son rápidamente atacados aún en soluciones diluidas.

El amoníaco y las soluciones amoniacales no presentan problemas difíciles de corrosión. El acero y el hierro fundido son satisfactorios, excepto para altas temperaturas en donde el tipo 430 y 304 son adecuados. El aluminio es frecuentemente adoptado en sistemas de refrigeración y tanques de almacenamiento.

La mayor preocupación es no usar cobre y sus aleaciones porque cualquier traza de amoníaco puede causar corrosión por esfuerzos. Por ejemplo, la descomposición de materiales orgánicos conteniendo nitrógeno han causado rupturas.

Disolución de materiales, también ocurren por la solución amoniacal formándose iones complejos.

Un interesante y no usual problema de la RTC (SCC) ocurrió en los estados del sur de E.U., donde los granjeros usan amoníaco como fertilizante y LPG ( gas propano líquido ) para calentamiento en cocinas, los tanques de LPG tenían accesorios de latón ( las válvulas ), los distribuidores, quienes vendieron el amoníaco y LPG no limpiaron los tanques de almacenamiento; ni los carros tanque; el amoníaco residual se mezcló con LPG y todos los accesorios se rompieron. La investigación por los encargados del LPG y Mars G. Fontana mostraron que una parte por millón (1 ppm) de amoníaco causaría corrosión por rotura de esfuerzos en accesorios de latón. El reemplazar los accesorios costó 80 millones de dólares, esto fue hace varios años<sup>1</sup>.

#### 4.5 AGUA. <sup>1511</sup>

El agua es uno de los fluidos más complicados en su manejo, esto es debido principalmente al innumerable contenido de sustancias que se encuentran disueltas o en forma suspendida, debido a esta peculiaridad se puede clasificar para su estudio como: agua salada, agua dulce y agua de alta pureza.

El agua salada ( o de mar ) contiene cerca de 3.4 % de sales y es ligeramente alcalina con un pH de 8 ; se comporta como un buen electrolito y puede causar corrosión galvánica y por agrietamiento, la corrosión en este medio es afectada por el contenido de oxígeno, la velocidad, la temperatura y los organismos vivos.

---

1 Para mayor detalle revisar la referencia 23 pagina 278.

Tabla 4.1 CORROSION POR ACIDOS ORGANICOS.

ACIDO	CONCENTRACION	TEMPERATURA F	ALUMINIO	COBRE Y BRONCE	ACERO 304	ACERO 316	MURINET	MURINOM
ACETICO	50 x	75	†	†	0	†	†	†
ACETICO	50 x	212	0	0	†	†	†	†
ACETICO	GLACIAL	75	†	†	†	†	†	†
ACETICO	GLACIAL	212	0	0	0	0	0	†
CITRICO	50 x	75	0	†	0	0	†	†
CITRICO	50 x	212	†	†	0	0	0	†
FORMICO	80 x	75	0	0	0	†	†	†
FORMICO	80 x	212	0	0	0	0	0	†
LACTICO	50 x	75	0	0	0	†	†	†
LACTICO	50 x	212	0	0	0	0	0	0
MALEICO	50 x	75	0	†	0	0	†	†
MALEICO	50 x	212	0	0	0	0	0	0
NAFTENICO	100 x	75	0	0	†	†	†	
NAFTENICO	100 x	212	0	0	†	†	†	
TARTARICO	50 x	75	0	†	†	†	†	†
TARTARICO	50 x	212	0		†	†	†	†
GRASOS	100 x	212	†	†	0	†	†	†

LEYENDA :- † : MENOS DE 2 NPV

† : DE 20 A 50 NPV

0 : MENOS DE 20 NPV

0 : MAS DE 50 NPV

LA AEREAACION AUMENTA LA CORROSION.

FUENTE : Corrosion Data Survey

Tabla 4.2 PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN SOLVENTES ORGÁNICOS.

SOLVENTE	CONDICIONES	IMPUREZAS	METAL CORROÍDO	TIPO DE ATAQUE	PREVENCIÓN
METANOL	P. EMULSIÓN	< 0.05 x H <sub>2</sub> O	ALUMINIO	PICADO	ADICIONAR % DE H <sub>2</sub> O
METANOL	TEMP. AMBIENTE	CLORUROS	TITANIO	ROTURAS ABLANDAMIENTO	ELIMINAR Cl y H <sub>2</sub> O
METANOL	TEMP. AMBIENTE	FORMATO DE METILO	ACERO AL CARBON 11% C	CORROSIÓN UNIFORME	ELIMINAR FORMATO
ETANOL	TEMP. AMBIENTE	20 x DE HCl	TITANIO	5 MPY	ADICIONAR AGUA 9-30 x
ETANOL	P. EMULSIÓN	< 0.05 x H <sub>2</sub> O	ALUMINIO	PICADO	ADICIONAR AGUA AL 1 %
ETANOL	T. Ed - T. Amb.	HALOGENUROS OXIGENO	ACERO NIERRO FUNDIDO	CORROSIÓN UNIFORME, PICADO	ELIMINAR CLORO Y AIRE
ETILENGLICOL	140 F	AGUA, NaCl	AC. INOXIDABLE 304 y 316	PICADO, ROTURA	USAR MONEL, NIQUEL INCOREL
FENOL	120 - 160 F	< 0.3 x DE AGUA	ALUMINIO	PICADO	ADICIONAR AGUA 0.3 x
CREOSOL	180 F	SODIO, FENOLATOS	AC. AL CARBON	CORROSIÓN UNIFORME	USAR AC. INOX. 304
CREOSOL	125 F	HCl, AGUA	MONEL, BRONCE	CORROSIÓN UNIFORME	USAR EMAMEL, VIDRIO, PORCELANA
AC. FORMICO	T. Ed - T. Amb.	OXIGENO	ALEACIONES DE COBRE	CORROSIÓN UNIFORME	DISMINUIR TEMPERATURA, AIRE; USAR CARPENTER 20
AC. FORMICO	P. EMULSIÓN	AGUA DE 5 a 10 x	AC. INOXIDABLE 304 y 316	1 MPY	DISMINUIR AGUA AL 1 x
AC. FORMICO	110 F	27 x AC. ACETICO 3 x DE AGUA	TITANIO	ABLANDAMIENTO, CORROSIÓN UNIFORME	USAR HASTELLOY C
AC. ACETICO	P. EMULSIÓN	ANHIDRIDO ACETICO	ALUMINIO, TITANIO	CORROSIÓN UNIFORME	USAR HASTELLOY C Y ADICIONAR AGUA
AC. ACETICO	T. Ed - T. Amb.	OXIGENO	COBRE, ALEACIONES	CORROSIÓN UNIFORME 7 MPY	DISMINUIR TEMPERATURA Y AIRE
AC. ACETICO	P. EMULSIÓN	AGUA	AC. INOXIDABLE 316 y 317, INCOREL	CORROSIÓN UNIFORME	USAR TITANIO Y HASTELLOY C
AC. ACETICO	P. EMULSIÓN	INORGANICOS, CLORUROS, ORGANICOS	AC. INOXIDABLE 316	ROTURAS	USAR TALLIO, ELIMINAR CLORUROS
AC. ACETICO + CO	250 F	ACETATOS, XI	AC. INOXIDABLE 316	CORROSIÓN UNIFORME	USAR TITANIO, BIRCONIO TALLIO Y HASTELLOY C
AC. ACETICO	T. Amb - 90 F	1 x CLORUROS 1 x AGUA	AC. INOXIDABLE 304	PICADO	USAR TITANIO Y ELIMINAR CLORO
AC. ACETICO	T. Amb - P. Ed.	FILLOSUROS			
AC. FENOLICO	210 F	AC. MALICO, AGUA	AC. INOXIDABLE 304	CORROSIÓN UNIFORME	USAR ACERO INOX. 316
AC ACETICO-TOLUENO	90 F	OXIGENO	ACERO AL CARBON 17 % CROMO	2 - 5 MPY	USAR ACERO INOX. 316
AC MONOTRICLOROMC	150 F	CLORO + HCl	TODOS LOS METALES	CORROSIÓN UNIFORME	RECUBRIMIENTO DE EMAMEL
CIANOGENO, CLORURO BICLOROMETANO	20 F	CLORO + HCl	AC. INOXIDABLE 316	4 MPY	USAR LAMINAS DE NIQUEL
DIMETILFORMAMIDA	100 F	AGUA + AC. FORMICO + BISTILAMINA	ACERO AL CARBON	CORROSIÓN UNIFORME	DISMINUIR AGUA < 0.1 %

Tabla 4.2 PREVENCION DE LA CORROSION EN SOLVENTES ORGANICOS. (CONTINUACION.)

SOLVENTE	CONDICIONES	IMPUREZAS	METAL CORROIDO	TIPO DE ATAQUE	PREVENCION
ALDENIDO BUT.	TEMP. AMBIENTE	AIRE + AC. BUTI.	COBRE	GALVANICO	ELIMINAR AIRE + ACIDO
REHUALDENIDO	TEMP. AMBIENTE	CLORUROS	ALEACIONES DE AI	CORROSION UNIFORME	ELIMINAR CLORUROS
REHUALDENIDO	PUNTO EMULSION	CLORUROS	ACERO INOXIDABLE 316	PICADO	ELIMINAR CLORUROS
METILITILCETONA	TEMP. AMBIENTE	AGUA	ACERO AL CARBON HIERRO COLADO	GALVANICO	SECADO, ELIMINAR AIRE USAR AC. GALVANIZADO
ACETATO DE ETILO	TEMP. AMBIENTE	ACIDO ACETICO	ACERO AL CARBON HIERRO COLADO	CORROSION GALVANICA	SECADO, ELIMINAR AIRE USAR AC. GALVANIZADO
METILAMINA	TEMP. AMBIENTE	OXIGENO	ALUMINIO ALEACIONES COBRE	CORROSION UNIFORME, ROTURAS	USAR ACERO AL CARBON HIERRO COLADO
TRIAMOLANINA	TEMP. AMBIENTE	OXIGENO	ALEACIONES COBRE	CORROSION UNIFORME, ROTURAS	USAR ACERO AL CARBON HIERRO COLADO
ANILINA	PUNTO EMULSION	OXIGENO	ALUMINIO-ACERO	CORROSION UNIFORME	ACERO INOXIDABLE 316 ELIMINAR AIRE
OXIDO DE ETILENO	TEMP. AMBIENTE		ALEACIONES COBRE	PROVOCA EXPLOSION	USAR AC. INOX. 304
CLOROFORMO	PUNTO EMULSION	HCl + AGUA	ALEACIONES AI AC. INOX. 304-316	PICADO ROTURAS	ESTABILIZAR CON 0.1% DE ANILINA; MANTENER AGUA EN 2%
ACIDO FORMICO	T. Ed - T. Amb.	OXIGENO	ALEACIONES DE COBRE	CORROSION UNIFORME	DISMINUIR TEMPERATURA, AIRE; USAR CARPENTER 20
ACIDO FORMICO	P. EMULSION	AGUA DE 3 A 10%	AC. INOXIDABLE 304 Y 316	1 MPY	DISMINUIR AGUA AL 1%
ACIDO FORMICO + ACIDO ACETICO.	150 F	27% AC. ACETICO 3% DE AGUA	TITANIO	ABLANDAMIENTO CORROS. UNIFORME	USAR NASTELLOY C
ACIDO ACETICO	P. EMULSION	AMBIENIDO ACETICO	ALUMINIO, TITANIO	CORROSION UNIFORME	USAR NASTELLOY C Y ADICIONAR AGUA
ACIDO ACETICO	T. Ed - T. Amb.	OXIGENO	COBRE, ALEACIONES	CORROSION UNIFORME 7 MPY	DISMINUIR TEMPERATURA Y AIRE
ACIDO ACETICO	P. EMULSION	AGUA	AC. INOXIDABLE 316 Y 317, INCOEL	CORROSION UNIFORME	USAR TITANIO Y NASTELLOY C
ACIDO ACETICO	P. EMULSION	INORGANICOS, CLORUROS, ORGANICOS	AC. INOXIDABLE 316	ROTURAS	USAR TALIO, ELIMINAR CLORUROS
ACIDO ACETICO	250 F	ACETATOS, NI	AC. INOXIDABLE 316	CORROSION UNIFORME	USAR TITANIO, BIRCONIO TALIO Y NASTELLOY C
ACIDO ACETICO	T. Amb - 90 F	1% CLORUROS 1% AGUA	AC. INOXIDABLE 304	PICADO	USAR TITANIO Y ELIMINAR CLORO
ACIDO ACETICO	T. Amb - P. Ed.	FLUORUROS			
ACIDO/AMBIENIDO FALICO.	210 F	AC. MALEICO, AGUA	AC. INOXIDABLE 304	CORROSION UNIFORME	USAR ACERO INOX. 316
ACIDO ACETICO + TOLUENO.	90 F	OXIGENO	ACERO AL CARBON 17% CROMO	2 - 5 MPY	USAR ACERO INOX. 316
ACIDO MONO + DI + TRICLORO-ACETICO.	150 F	CLORO + HCl	TODOS LOS METALES	CORROSION UNIFORME	RECUBRIMIENTO DE EMAMEL
CLOROCLORUO + CLOROMETANO.	20 F	CLORO + HCl	AC. INOXIDABLE 316	4 MPY	USAR LAMINAS DE NIQUEL
DIMETIL FORMAMIDA	100 F	AGUA + AC. FORMICO + DIMETILAMINA	ACERO AL CARBON	CORROSION UNIFORME	DISMINUIR AGUA < 0.1%



Tabla 4.2 PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN SOLVENTES ORGÁNICOS. (CONTINUACIÓN.)

SOLVENTE	CONDICIONES	IMPUREZAS	METAL CORROÍDO	TIPO DE ATAQUE	PREVENCIÓN
ALDEHIDO INT.	TEMP. AMBIENTE	AIRE + AC. INTI.	CORRE	GALVANICO	ELIMINAR AIRE + ACIDO
SEMIALDEHIDO	TEMP. AMBIENTE	CLORUROS	ALEACIONES DE AL	CORROSION UNIFORME	ELIMINAR CLORUROS
SEMIALDEHIDO	PUNTO EBULLICION	CLORUROS	ACERO INOXIDABLE 316	PICADO	ELIMINAR CLORUROS
METILMETILCETONA	TEMP. AMBIENTE	AGUA	ACERO AL CARBON NIERRO COLADO	GALVANICO	SECADO, ELIMINAR AIRE USAR AC. GALVANIZADO
ACETATO DE ETILO	TEMP. AMBIENTE	ACIDO ACETICO	ACERO AL CARBON NIERRO COLADO	CORROSION GALVANICA	SECADO, ELIMINAR AIRE USAR AC. GALVANIZADO
METILANINA	TEMP. AMBIENTE	OXIGENO	ALUMINIO ALEACIONES COBRE	CORROSION UNIFORME, ROTURAS	USAR ACERO AL CARBON NIERRO COLADO
TRIAMANANINA	TEMP. AMBIENTE	OXIGENO	ALEACIONES COBRE	CORROSION UNIFORME, ROTURAS	USAR ACERO AL CARBON NIERRO COLADO
ANILINA	PUNTO EBULLICION	OXIGENO	ALUMINIO-ACERO	CORROSION UNIFORME	ACERO INOXIDABLE 316 ELIMINAR AIRE
OXIDO DE ETILENO	TEMP. AMBIENTE		ALEACIONES COBRE	PROVOCA EXPLOSION	USAR AC. INOX. 304
CLOROFORMO	PUNTO EBULLICION	HCl + AGUA	ALEACIONES AL AC. INOX. 304-316	PICADO ROTURAS	ESTABILIZAR CON B.I. Y DE ANILINA, MANTENER AGUA C. 0.5 Y RECUBRIMIENTO DE EMANEL
EPICLOROHIDRINA	TEMP. AMBIENTE	HCl + AGUA	ALEACIONES COBRE AC. INOX. 304-316	PICADO ROTURAS	
ETERETILICO	P. EBULLICION TEMP. AMBIENTE	ACIDOS + AGUA	NIERRO COLADO ACERO	CORROSION GALVANICA	USAR ACERO GALVANIZADO
TETRACLORO DE CARBONO	P. EBULLICION	HCl + AGUA	ALUMINIO, TITANIO AC. INOX. 304-316	PICADO, ROTURA POSIBLE EXPLOSION	ESTABILIZACION, INHIBI- CION, NEUTRALIZACION
DIBROMO DE ETILENO	P. EBULLICION	AGUA + HBr	ALUMINIO, COBRE AC. INOX. 304-316	PICADO, ROTURA POSIBLE EXPLOSION	USAR ACERO AL 17% CROMO NEUTRALIZACION.
DICLOROENCENO	P. EBULLICION	AGUA + HCl	ACERO 17% CROMO	PICADO, ROTURA II MPY	ELIMINAR AGUA Y HCl PARA ESTABILIZAR.
BENCENO	TEMP. AMBIENTE	ACIDO BUTIRICO OXIGENO	ACERO AL CARBON	8-7 MPY	ELIMINAR OXIGENO
NITROCARBONOS	TEMP. AMBIENTE	AGUA + HCl	ACERO AL CARBON	CORROSION UNIFORME	ELIMINAR HCl, AGUA
PETROLEO CRUDO	228 F	ACIDO NAFTENICO	ACERO 6% CROMO AC. INOX. 304	CORROSION UNIFORME	NEUTRALIZAR ACIDOS USAR AC. INOX. 316
DIFENIL	238 F	AGUA + CLORUROS	AC. INOXIDABLE 304	PICADO, ROTURAS ESCORRIACIONES	ELIMINAR CLORO Y AGUA

Fuente : Ewald Heitz, Corrosion of Metals in Organic Solvents,  
Advances in Corrosion Science and Technology 4, 226-9, New York, (1974).

La corrosión por agua de mar ( en pozos petroleros por ejemplo ) a grandes profundidades ( 1 milla ) disminuye en la mayoría de los casos debido a las bajas temperaturas en el fondo ( alrededor de 40 °F ), las principales prevenciones tomadas para este tipo de agua son los recubrimientos y la protección catódica, así como la desalinización al agua y al equipo mismo.

La acción corrosiva del agua dulce varía dependiendo del contenido de oxígeno, dureza, contenido de cloruros, contenido de sulfuros y muchos otros factores. Así, un tanque de acero con agua caliente en un hogar puede durar hasta 20 años en un área, pero solo uno o dos años en otra. El contenido de cloro puede variar de pocas partes por millón ( ppm ) hasta cientos; los compuestos sulfurosos causan una corrosión rápida del acero. Por esta razón es difícil elaborar recomendaciones generales.

El agua dulce puede ser dura o suave, de acuerdo a los minerales disueltos; en las aguas duras los carbonatos se depositan sobre la superficie del metal y lo protegen, pero el picado puede presentarse si el recubrimiento no es completo, las aguas suaves son más corrosivas porque el depósito protector no se forma.

El acero en aleación baja no ofrece ventajas sobre el acero ordinario en aplicaciones con agua dulce.

El hierro colado, acero y acero galvanizado son los materiales más ampliamente usados. El cobre, latón, aluminio, algunos aceros inoxidables, monel y los cuproniqueles, son también usados donde la temperatura, contaminación y el tiempo de vida son factores a considerar.

Cuando el agua es usada como medio de transferencia de calor y solo se tolera una corrosión baja, el agua de alta pureza es usada, las plantas nucleares y las plantas a alta presión son ejemplo de su uso. La corrosión disminuye con el aumento de pureza del agua debido a la menor cantidad de sólidos y gases, los cuales disminuyen su resistencia eléctrica. El agua destilada exhibe una resistencia de alrededor de 200,000 ohm-cm, la resistencia es pues una medida de pureza en el agua. En aplicaciones atómicas se requiere agua con una resistencia de 1 a 2 megaohm; a altas temperaturas ( 600-700 °F ) y altas presiones se forman aproximadamente 10 ppm de  $O_2$  y  $H_2$  debido a la descomposición radiolítica del agua. Una sobrepresión con  $H_2$  reduce el  $O_2$  formado.

Se ha observado ataque intergranular y roturas en acero inoxidable y aleaciones cuando el agua de alta pureza contiene oxígeno.

#### 4.6 SALES Y METALES FUNDIDOS.<sup>(23)</sup>

Este tipo de materiales son de suma importancia debido a sus características superiores en la transferencia de calor. El plomo fundido y las sales fundidas han sido usadas para el tratamiento de calor del acero. Mas recientemente estos materiales se han convertido en medios de transferencia de calor para generación de energía, particularmente para plantas nucleares.

La eficiencia de un motor de calor o una planta de energía, es aumentada por su operación a altas temperaturas, aunque el agua y su vapor son los fluidos más comunes para la transferencia de calor, estos son difíciles de manejar a muy altas temperaturas y presiones en las que operan las plantas nucleares. El equipo a alta presión es caro y peligroso. Y debido a esto y a su alta temperatura de ebullición, los metales y las sales fundidas son de mayor utilidad.

Los metales líquidos, causan diferentes tipos de ataques corrosivos. No obstante, la interacción que ocurre no es electroquímica de naturaleza, más bien es física y debido a esto aumenta su complejidad.

La combinación sodio-potasio utiliza metales como el acero inoxidable, níquel y aleaciones como el monel y hastelloy; a 300 °C, el acero inoxidable 304 no es afectado por sodio líquido en ruptura por esfuerzos o fatiga; la aleación de níquel y monel se oxida rápidamente en exposición de aire. La presencia de óxidos hace a esta combinación muy corrosiva a altas temperaturas, por eso deben tomarse precauciones para mantener un nivel mínimo de oxígeno, atmósferas inertes son frecuentemente empleadas para este propósito.

El litio ( Li ) es más agresivo que la combinación sodio-potasio, para este servicio el hierro puro se utiliza en muchas aplicaciones; los aceros tienen aplicación en temperaturas cercanas a su fusión.

El acero y el hierro forjado han sido aplicados exitosamente en el uso de magnesio ( Mg ) a altas temperaturas, el acero al alto cromo muestra una resistencia similar, mientras que el acero austenítico es atacado por el Mg en su punto de fusión.

Para el caso del mercurio ( Hg ), el acero al carbón es usado para contener este metal a temperaturas de 540 °C, la presencia de trazas de titanio y magnesio inhiben la corrosión del hierro en aleaciones con este material. Recientemente aceros al 5 % de cromo y las combinaciones silicio-cromo-molibdeno han reemplazado al acero al carbón debido a su resistencia superior.

No existen metales o aleaciones totalmente inmunes al ataque por aluminio ( Al ) líquido, por arriba de su punto de fusión los metales son severamente corroídos;

aleaciones de níquel, hierro y acero inoxidable son materiales que muestran mayor resistencia, pero su uso es limitado.

Aunque el galio ( Ga ) tiene un amplio rango en el estado líquido, es uno de los metales más corrosivos en éste estado, solo metales con recubrimiento refractario son capaces de resistir su ataque.

Para los metales fundidos plomo, bismuto, estaño y sus aleaciones, la ruptura por tensión y corrosión (RTC), se presenta en la mayoría de los materiales de construcción, los aceros níquel-cromo sufren rupturas en éste medio; el monel, níquel y los cuproníqueles poseen mayor resistencia.

Para el caso de las sales fundidas, éstas ocupan una posición entre los metales líquidos y las soluciones acuosas, las sales fundidas pueden actuar como electrolitos conductores y así presentar reacciones electroquímicas, el transporte de masa debido al gradiente térmico ha sido observado; en numerosos sistemas de sales fundidas, se han observado interacciones electroquímicas con formación de productos de corrosión.

El hidróxido de sodio ( NaOH ) es la más común de las sales fundidas; usada en aplicaciones de transferencia de calor, el níquel y sus aleaciones muestran resistencia para este ambiente; también es empleado en sales como carbonatos y cloruros<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Consultar la referencia 52 para el manejo de cloruro de calcio como salmuera.

---

CAPITULO.

## CINCO.

---

### Selección de materiales.

#### 5.1 FUNDAMENTO.<sup>(170)</sup>

La corrosión causa el paro de plantas y equipos; en la industria química de proceso, estas detenciones pueden ser prevenidas mediante la correcta elección de la amplia variedad de materiales disponibles para su construcción, como son: metales, plásticos, hules y pinturas.

La adecuada información sobre el rango de estos materiales es esencial en la etapa de diseño.

En el análisis de condiciones de operación y proceso se llega a la conclusión de tener más de una opción en cuanto a materiales a ser utilizados, la elección final será el resultado de la comparación entre factores técnicos y económicos.

A continuación se enlistan los materiales más importantes en la elaboración de equipo con algunas de sus ventajas y desventajas.

#### 5.2 ACERO INOXIDABLE.<sup>(180)</sup>

Los aceros inoxidable contienen entre un 10 y 30% de cromo y puede adicionarse níquel, molibdeno y cobre para aumentar su resistencia; entre mayor sea el contenido de cromo, la resistencia a medios oxidantes y altas temperaturas aumenta.

El molibdeno es benéfico porque reduce el picado por cloruros.

Aunque cientos de inoxidable son producidos, pueden clasificarse en: austeníticos, ferríticos, duplex, martensíticos y de precipitación por endurecimiento.

### 5.2.1 AUSTENITICOS.<sup>(80)</sup>

Estos aceros endurecen por trabajo en frío pero no en tratamientos en caliente, todos son no magnéticos, aunque algunos sí lo son por el trabajo en frío, son dúctiles aumentan su esfuerzo en condiciones de bajas temperaturas, se soldan con facilidad.

El tipo 304 es el más usado en la industria de alimentos y bebidas, tiene buena resistencia a la corrosión atmosférica, el tipo 316 con el 2 % de molibdeno es usado en procesos de pulpa y papel así como en alimentos, Tabla 5.1.

En cuanto a las propiedades físicas, poseen un esfuerzo de tensión de 490 a 860 MPa y una elongación (en 50 mm) de 30 a 60 %, esfuerzo a la tracción de 205 a 575 MPa,  $P=0.29 \text{ lb/in}^3$ .

### 5.2.2 FERRITICOS.<sup>(80)</sup>

Contienen de 11 a 30 % de cromo, algunos grados contienen más de 4% de molibdeno para mejorar la resistencia al agrietamiento y picaduras, son resistentes a la fractura debida a la ruptura por tensión y corrosión (RTC) por cloruros, no endurecen por tratamiento en caliente y ligeramente lo hacen en bajas temperaturas.

El tipo 430 es usado para decoración automotriz y otras aplicaciones en las cuales no se requiere propiedades de soldadura.

Recientemente ha sido desarrollada una familia ferrítica de intersticios bajos, conteniendo carbón y nitrógeno, en un 0.030 %, con mayor ductibilidad, dureza y facilidad de soldado que los ferríticos convencionales.

Los materiales ferríticos poseen un esfuerzo de tensión entre 415 y 650 MPa., un esfuerzo de tracción de 250 a 550 MPa, la elongación (en 50 mm) es del 10 al 25 %.

La tabla 5.2 muestra los principales tipos de esta familia.

### 5.2.3 DUPLEX.<sup>(80)</sup>

Los aceros inoxidable duplex son una mezcla de austeníticos y ferríticos, ver Tabla 5.3.

La resistencia a la ruptura por tensión y corrosión (RTC) es intermedia entre las familias ya mencionadas, con una disminución cuando se utiliza para trabajos en frío; tienen una dureza mayor que los ferríticos y son utilizados para espesores de placa y

TABLE 1. EL ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO TIENE EXCELENTE RESISTENCIA DEBIDO A SU COMPOSICION.

DESIGNACION O TIPO NUM. UN	Composición %							OTROS	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S		
201	821000	0.15	5.5-7.5	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	0.06	0.03	0.25N
202	820200	0.15	7.5-10.0	1.00	17.0-19.0	4.5-6.0	0.06	0.03	0.25N
205	820500	0.12-0.25	14.0-15.5	1.00	16.5-18.0	1.0-1.75	0.06	0.03	0.32-0.40N
219(M-17)	821800	0.06	7.5-9.0	1.00	17.5-22.0	5.0-7.0	0.045	0.02	2.0-3.0 Mo 0.25-0.40N
301	830100	0.15	2.00	1.00	16.0-18.0	8.0-8.0	0.045	0.03	---
302	830200	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	---
302B	830215	0.15	2.00	2.0-3.0	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	---
303	830300	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.15 min	0.08 Mo
303 Piv X (XM-4)	---	0.15	2.5-4.5	1.00	17.0-19.0	7.0-10.0	0.20	0.25 min	0.8 Mo
303Se	830323	0.15	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.20	0.06	0.15 min Se
304	830400	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	---
304F	830408	0.04-0.1	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	---
304FN	830432	0.04-0.10	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.18N
304L	830403	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	0.045	0.03	---
304LN	830453	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.15N
304H	830451	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03	0.10-0.15N
330400	830430	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-10.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Cu
305	830500	0.12	2.00	1.00	17.0-19.0	10.5-13.0	0.045	0.03	---
308	830800	0.06	2.00	1.00	19.0-20.0	10.5-12.0	0.045	0.03	---
308L	---	0.03	2.00	1.00	19.0-21.0	10.5-12.0	0.045	0.03	---
308	830900	0.20	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-16.0	0.045	0.05	---
308Cb	830940	0.09	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-16.0	0.045	0.03	8 X %C min Cb
308Cb + Ta	---	0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-16.0	0.045	0.03	8 X %C min
308S	830904	0.08	2.00	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	0.045	0.03	---
310	831000	0.25	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	---
310Cb	831040	0.08	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	Cb + Ta; 10 °C min 1.10 max
316S	831004	0.06	2.00	1.50	24.0-26.0	19.0-22.0	0.045	0.03	---
312	---	0.15	2.00	1.00	30.0 nom	9.9 nom	0.045	0.03	---
316	831600	0.06	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0 Mo
316Cb	831640	0.06	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	Cb + Ta; 10 °C min 1.10 max; N 1.10 max; Mo 2.0-3.0
316F	831620	0.08	2.00	1.00	18.0-18.0	10.0-14.0	0.20	0.10	1.75-2.5 Mo
318H	831809	0.04-0.1	2.00	1.00	18.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo
316L	831603	0.03	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo; 0.10-0.30 N
318LN	831843	0.03	2.00	1.00	18.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	2.0-3.0 Mo; 0.10-0.30 N
318Ti	831835	0.06	2.00	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	0.045	0.03	Ti 5% (C+N) min, 0.70 max; N 0.10 max; Mo 2.0-3.0
317	831700	0.06	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo
317L	831703	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	0.045	0.03	3.0-4.0 Mo
317LM, 317LK, 317LP	---	0.03	2.00	1.00	18.0-20.0	12.0-16.0	0.045	0.03	5 * %C min Ti
321	832100	0.06	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	0.045	0.03	5 * %C min Ti
321H	832109	0.04-0.1	2.00	1.00	17.0-19.0	8.0-12.0	0.045	0.03	---
330	804330	0.08	2.00	0.75-1.0	17.0-20.0	34.0-37.0	0.040	0.03	---

TABLA 6.1 (continuación).

DESIGNACION O TIPO NUM. UN	Composición %							S	OTROS
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	B		
330HC	---	0.4	1.50	1.25	19.0 nom	36.0 nom	---	---	---
332	---	0.04	1.00	0.60	21.5 nom	32.0 nom	0.45	0.03	---
347	324700	0.06	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.45	0.03	10% NiC min Cb + Ta
347H	804709	0.04-0.1	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	10% NiC min Cb + Ta
348	534800	0.08	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	0.2 Cu; 10% SC min Cb + Ta
348H	534809	0.04-0.1	2.00	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	0.045	0.03	0.2 Cu; 10% SC min Cb + Ta
344	038400	0.06	2.00	1.00	15.0-17.0	17.0-19.0	0.045	0.03	---
345	---	0.08	2.00	1.00	11.5-13.5	14.0-16.0	0.045	0.03	---
18-18-2 (XM-3)	036100	0.06	2.00	1.6-2.5	17.0-19.0	17.5-19.6	0.03	0.03	0.08-0.18 N
18-18 Plus	---	0.15	17.0-19.0	1.00	17.5-19.5	---	0.045	0.03	0.5-1.5 Mo; 0.5-1.5 Cu; 0.4-0.8 N
20 Co 3	N06020	0.07	2.00	1.00	17.6-19.5	32.0-38.0	0.045	0.035	2.0-3.0 Mo; 3.0-4.0 Cu; A <sup>1</sup> 50 min Cb
20 Mo 8	---	0.03	1.00	0.50	22.0-26.0	33.0-37.0	0.030	0.03	5.0-6.7 Mo; 2.00-4.00 Cu
254 6MO	S31254	0.02	1.00	0.80	19.5-20.5	17.5-18.5	0.030	0.01	6.00-6.50 Mo; 0.50-1.00 Cu; 0.18-0.22 N
804L „J9604L AL-4X „JPK66 AL- 8X Granite/ 2328	N08904 N09386 ---	0.02 0.03 0.04	2.00 2.00 0.75	1.00 0.75 0.75	19.0-23.0 20.0-22.0 22.0-24.0	23.0-28.0 23.5-26.5 26.0-28.0	0.045 0.030 0.030	0.035 0.003 0.16	4.0-5.0 Mo; 1.0-2.0 Cu 8.0-7.0 Mo; Cu 2.5-3.5; Ti 0.40-0.70; Mo 2.5-3.5
Tenslon Criogénico (XM-14) J9 - 700	821450 N08700	0.12 0.04	14.0-18.0 2.00	1.00 1.00	17.0-19.0 19.0-23.0	8.0-8.0 24.0-26.0	0.060 0.040	0.03	0.35-0.60 N 4.3-5.0 Mo; 0.5 Cu; Cb 0.5 8% NiC min 0.005 Pb; 0.035 Sn
J5 - 777	---	0.04	2.00	1.00	19.0-23.0	24.0-26.0	0.045	0.035	4.0-5.0 Mo; 1.8-2.5 Cu 0.35 N
Nitronic 32 Nom	824100	0.10	12.00	0.50	18.0	1.8	---	---	0.35 N
Nitronic 33	824000	0.08	11.5-14.5	1.00	17.0-19.0	2.02-3.76 0-	0.080	0.03	0.20-0.40 N
Nitronic 40	821900	0.08	8.0-10.0	1.00	18.0-20.0	5.0-7.0	0.080	0.03	0.15-0.40 N
Nitronic 50	821810	0.06	4.0-8.0	1.00	20.5-23.5	11.5-13.5	0.040	0.03	1.5-3.0 Mo; 0.0-0.4 N; 0.10-3 Cu; 0.1-0.3 V
Nitronic 60	821600	0.10	7.0-9.0	3.5-4.5	16.0-18.0	8.0-8.0	0.040	0.03	---
Nitronic 28	N06028	0.02	2.00	1.00	26.0-28.0	29.5-32.5	0.02	0.015	Mo 3.0-4.0; Cu 0.8-1.4
Tenslon	821400	0.12	14.5-16.0	0.3-1.0	17.0-18.5	0.75	0.045	0.03	0.35 N

Fuente: Ref. 80, p. 62-63

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



TABLA 6.2 EL ACERO INOXIDABLE FERRITICO ES RESISTENTE A LA CORROSION POR ROTURA DE ESFUERZOS

Composición %								
DESIGNACION O TIPO NUM. UN	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS
405	S40500	0.08	1.00	1.00	11.5-14.5	—	0.04	0.03 0.10-0.30 Al
402	S40900	0.08	1.00	1.00	10.5-11.75	—	0.045	0.04 6%MC min Ti
430	S43000	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	—	0.04	0.03 —
430F	S43020	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0	—	0.06	0.15 min 0.6 Mo
430FSe	S43023	0.12	1.25	1.00	16.0-18.0	—	0.06	0.06 0.15 min Se
434	S43400	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	—	0.04	0.03 0.75-1.25 Mo
436	S43600	0.12	1.00	1.00	16.0-18.0	—	0.04	0.03 0.75-1.25 Mo 5%MC min Cb+Ta, 0.7% max
442	S44200	0.2	1.00	1.00	18.0-23.0	—	0.04	0.03 —
446	S44600	0.2	1.50	1.00	23.0-27.0	—	0.04	0.03 0.25 N
430TI	S43036	0.1	1.00	1.00	16.0-19.5	0.75	0.04	0.03 5%MC min Ti
444(18-2)	S44400	0.0	1.00	1.00	17.5-19.5	1.00	0.04	0.03 1.75-2.5 Mo; 0.035 max N; 0.2+4(%C+%N) min (Ti + Cb)
18SR	—	0.04	0.30	1.00	18.0	—	—	— 2.0 Al; 0.4 Ti
182-FM	S18200	0.08	2.50	1.00	17.5-19.5	—	0.04	0.15 min —
E-Brite 26-1 (XM-27)	S44627	0.01	0.40	0.40	25.0-27.5	0.50	0.02	0.02 0.75-1.5 Mo; 0.015N 0.2Cu; 0.5Ni+Cu; Cb 0.05-0.20
AL 29-4-2	S44800	0.01	0.30	0.20	28.0-30.0	2.0-2.5	0.025	0.02 3.5-4.2 Mo
Monit	S44635	0.0	1.00	0.75	24.5-26.0	3.5-4.5	0.04	0.03 3.5-4.5 Mo 0.03-0.06(Ti+Cb)
Sea Cure/SC-1	S44660	0.0	1.00	0.75	25.0-27.0	1.5-3.5	0.04	0.03 2.5-3.5 Mo 0.2+4(%C+%N) min (Ti+Cb)
439(XM-8)	S43035	0.07	1.00	1.00	17.0-19.0	0.50	0.04	0.03 Ti 0.2+4(%C+%N) min 1.10 max; Al 0.15 max N 0.04 max
AL 29-4C	S44735	0.0	1.00	0.75	28.0-30.0	0.50	0.04	0.03 3.5-4.5 Mo; Ti 0.2+4 (%C + %N)

Fuente: Ref. 80, p. 60.85

material de tuberías. Recientemente han utilizado nitrógeno para aumentar su dureza en trabajos de bajas temperaturas, poseen un esfuerzo a la tensión de 680 a 900 MPa, esfuerzo a la tracción de 410 a 900 MPa, elongación ( en 50 mm) del 10 al 48%.

#### 5.2.4 MARTENSITICOS.<sup>(80)</sup>

Esta familia tiene una estructura cristalina austenítica a elevadas temperaturas y puede ser transformada a martensítica (es decir endurecida) con un enfriamiento adecuado.

Contienen generalmente del 11 al 18 % de cromo, son magnéticos y con una ductibilidad considerable, Tabla 5.4.

El tipo 410 es el grado de mayor uso para partes como: tornillos, bombas, flechas, válvulas y soportes.

Poseen un esfuerzo a la tensión de 480 a 1000 MPa, esfuerzo a la tracción de 275 a 860 MPa, elongación ( en 50 mm ) del 14 al 30 % ,  $P = 0.28 \text{ lb/in}^3$ .

#### 5.2.5 ENDURECIDO POR PRECIPITACION.<sup>(80)</sup>

Esta familia como diferencia contiene una aleación cromo-níquel y otros elementos como el cobre y aluminio. Estos elementos se forman por la precipitación en el proceso mismo y son endurecidos para altos esfuerzos por tratamiento con soluciones y añejamiento, son usados para engranes, broches y partes aéreas, Tabla 5.5.

Presentan un esfuerzo de tensión de 895 a 1100 MPa, tracción de 276 a 1000 MPa, elongación (en 50 mm) de 10 a 35%.

Un procedimiento simplificado para seleccionar acero inoxidable llamado "SELECTALOY"<sup>(40)</sup> es mencionado a continuación, la clave de este método es que clasifica las aleaciones por su uso más que por su estructura y composición.

El sistema "SELECTALOY" divide la familia de acero inoxidable en 5 niveles de resistencia a la corrosión mostrados en la fig 5.1.

Con el sistema "SELECTALOY" se obtiene:

1. Selección del nivel deseado de resistencia a la corrosión, para una resistencia del 86 % es usado el tipo 304 como primera opción. Entonces puede, ya sea que la resistencia requerida sea mayor o menor, fig. 5.1.

**TABLA 5.3 EL ACERO INOXIDABLE DUPLEX ES RESISTENTE A LA RUPTURA POR TENSION Y CORROSION**

fuente : Ref. 80, p 85		Composición %								
Designación o tipo	Nun. UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	OTROS
329, No.7 Mo	S32900	0.03	2.00	1.00	25.0-30.0	3.0-6.0	1.0-2.0	0.045	0.03	---
3RE60	-----	0.03	1.50	1.70	18.5	4.9	2.7	0.03	0.03	---
SAF2205/AF22	-----	0.03	2.00	0.80	22	5.5	3.0	0.03	0.02	0.14N
Ferralum 255	S32550	0.03	2.00	1.00	26	5.0	3.0	0.03	0.02	.17N, 2.0Cu
DP-3	-----	0.03	2.00	1.00	25	6.5	3.0	0.03	0.02	.5Cu, 0.15N

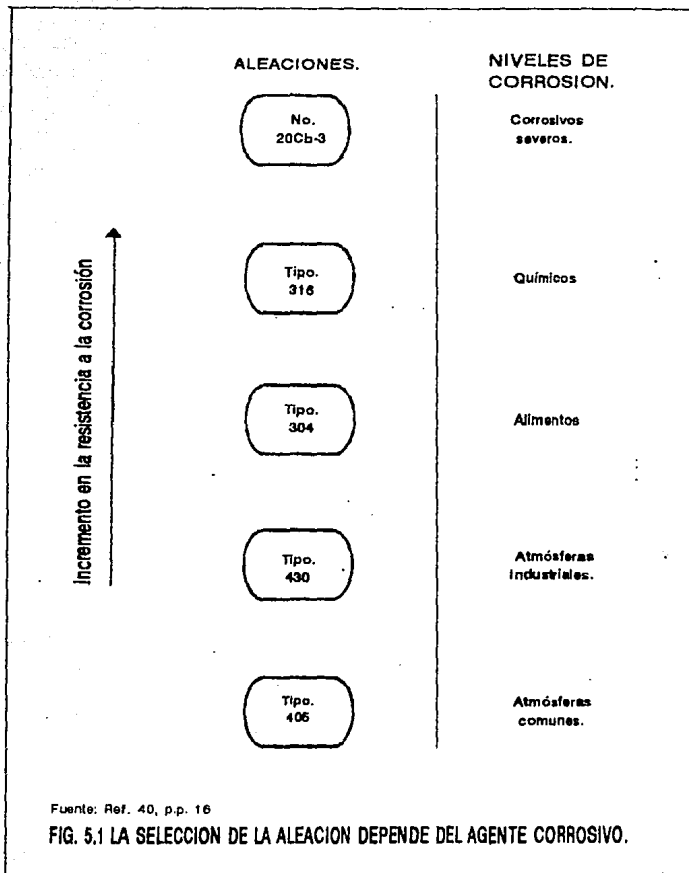
**TABLA 5.4 EL ACERO INOXIDABLE FERRITICO ES RESISTENTE A LA RUPTURA POR TENSION Y CORROSION**

fuente : Ref. 80, p 86		Composición %								
Designación o tipo	Num. UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS	
403	S40300	0.15	1.00	0.50	11.5-13.0	---	0.04	0.03	---	
410	S41000	0.15	1.00	1.00	11.5-13.0	---	0.04	0.03	---	
414	S41400	0.15	1.00	1.00	11.5-13.5	1.25-2.50	0.04	0.03	---	
416	S41600	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	---	0.04	0.03	0.6 Mo	
416Se	S41623	0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	---	0.06	0.06	0.15 min Se	
420	S42000	min 0.15	1.00	1.00	12.0-14.0	---	0.04	0.03	---	
420F	S42020	min 0.15	1.25	1.00	12.0-14.0	---	0.06	0.15 min	0.6 Mo	
422	S42200	0.20-0.25	1.00	0.75	11.5-13.0	0.50-1.00	0.025	0.02	0.75-1.25 Mo 0.75-1.25 W 0.15-0.3 V	
431	S43100	0.20	1.00	1.00	15.0-17.0	1.25-2.50	0.04	0.03	---	
440A	S44002	0.60-0.75	1.00	1.00	16.0-18.0	---	0.04	0.03	0.75 Mo	
440B	S44003	0.75-0.95	1.00	1.00	16.0-18.0	---	0.04	0.03	0.75 Mo	
440C	S44004	0.92-1.20	1.00	1.00	16.0-18.0	---	0.04	0.03	0.75 Mo	
Tipo 410 Cb (XM-30)	S41040	0.18	1.00	1.00	11.5-13.5	---	0.04	0.03	0.5-0.30 Cb	
Tipo 410S	S41008	0.08	1.00	1.00	11.5-13.5	0.60	0.04	0.03	---	
Tipo 414L	----	0.06	0.15	0.15	12.5-13.0	2.50-3.00	0.04	0.03	0.5 Mo; 0.03 Al	
416 Plus (XM-6)	S44800	0.15	1.00	1.00	12.0-14.0	---	0.06	0.15 min	0.6 Mo	

TABLA 5.5 ACEROS QUE SE ELABORAN POR PRECIPITACION Y PUEDEN SER ENDURECIDOS

Composición %									
DESIGNACION O TIPO	NUM. UN	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS
PH 13-8 Mo	S13800	0.05	0.10	0.10	12.25-13.25	7.5-8.5	0.01	0.01	2.0-2.5 Mo; 0.9-1.35 Al; 0.01 N
15-5 PH	S15500	0.07	1.00	1.00	14.0-15.5	3.5-5.5	0.04	0.03	2.4-4.5 Cu; 0.15-0.45 Cb+Ta
17-4 PH	S17400	0.07	1.00	1.00	15.5-17.5	3.0-5.0	0.04	0.03	3.0-5.0 Cu; 0.15-0.45 Cb+Ta
17-7 PH	S17700	0.09	1.00	1.00	16.0-18.0	6.5-7.75	0.04	0.03	0.75-1.5 Al
AM-350 (Tipo 633)	S35000	0.07-0.1	0.5-1.2	0.50	16.0-17.0	4.0-5.0	0.04	0.03	2.53.25 Mo; 0.07-0.13 N
AM-355 (Tipo 634)	S35500	0.10-0.1	0.5-1.2	0.50	15.0-16.0	4.0-5.0	0.04	0.03	2.53.25 Mo; 0.25 Ti
AM-363		0.04	0.15	0.05	11.0	4.0			
Custom 450 (XM-25)	S45000	0.05	1.00	1.00	14.0-16.0	5.0-7.0	0.03	0.03	1.25-1.75 Cu; 0.5-1.0 Mo; 8% C min Cb
Custom 455 (XM-16)	S45500	0.05	0.50	0.50	11.0-12.5	7.5-9.5	0.04	0.03	0.5 Mo; 1.5-2.5 Cu; 0.8-1.4 Ti; 0.1-0.5 Cb
PH 13-8 Mo (Tipo 63)	S15700	0.09	1.00	1.00	14.0-16.0	6.5-7.75	0.04	0.03	2-3 Mo; 0.75-1.5 Al
Stainless W (Tipo 63)	S17600	0.08	1.00	1.00	16.0-17.5	6.0-7.5	0.04	0.03	0.4 Al; 0.4-1.2 Ti
17-10 P		0.07	0.75	0.50	17.0	10.5	0.28	---	

Fuente: Ref. 80, p.86



Fuente: Ref. 40, p.p. 16

**FIG. 5.1 LA SELECCION DE LA ALEACION DEPENDE DEL AGENTE CORROSIVO.**

2. El siguiente requerimiento es un criterio de diseño, éste es el esfuerzo, se selecciona de la figura 5.2; por ejemplo si se desea una resistencia general a la corrosión del tipo 405, pero con un esfuerzo de 100,000 psi, se selecciona el tipo 410, si se necesita un esfuerzo igual al ya seleccionado pero un nivel resistente de corrosión del tipo 430 o 304: esto conduce al tipo 431.

El Custom 450 de la Fig. 5.2 será necesario para aplicaciones de resistencia a la corrosión del tipo 304 y una capacidad de esfuerzo del tipo 410.

3. El requerimiento siguiente es la fabricación, más de 11 grados tienen modificación para ayudar en varios procesos de fabricación. Por ejemplo si se selecciona el nivel de corrosión del tipo 410 y un esfuerzo que requiere mayor facilidad de fabricación, se puede seleccionar de la Fig. 5.3, aunque si se ha decidido el nivel del tipo 304 para resistir esfuerzos, pero se requiere para trabajo en frío se selecciona de la modificación mostrada en la Fig. 5.4.

El acero inoxidable puede ser combinado con inhibidores y recubrimientos, permitiendo sustituir a materiales de mayor costo; lo anterior siempre y cuando se realice un análisis detallado.<sup>1</sup>

### 5.3 TITANIO.

Las propiedades físicas y mecánicas de las aleaciones de titanio son mostradas en la tabla 5.6; su esfuerzo y ductibilidad son comparables a otros metales resistentes a la corrosión, sus propiedades con respecto a la fatiga son excelentes y los equipos son poco afectados.

El titanio es un metal ligero con una densidad mayor a las aleaciones con base de hierro y cobre, con un módulo de elasticidad a la mitad del valor en el acero, el calor específico y su conductividad térmica son similares al acero inoxidable.

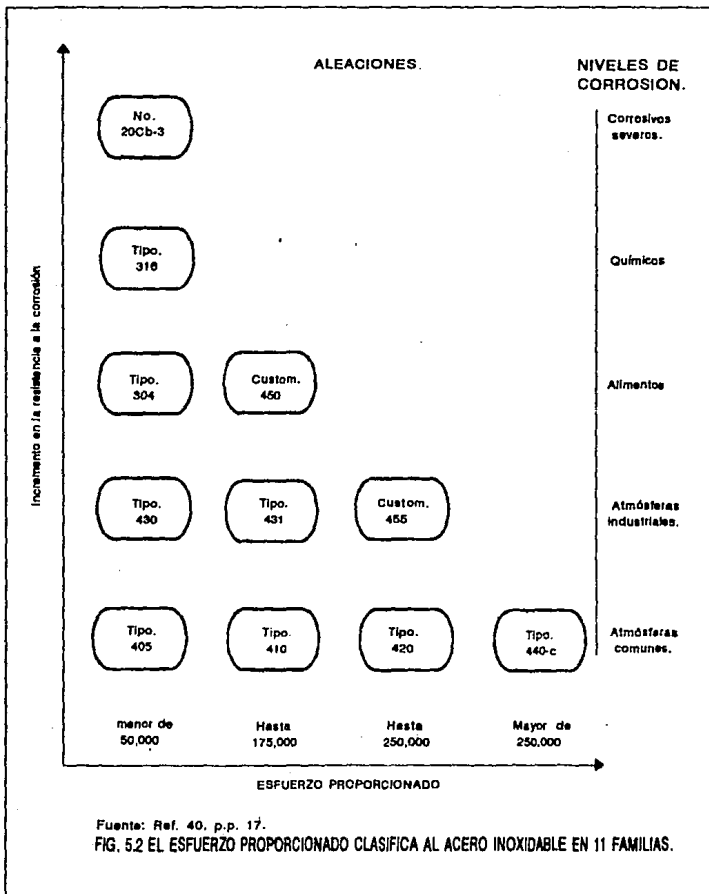
El titanio tiene una alta resistencia eléctrica y un bajo coeficiente de expansión; estas propiedades deben ser cuidadosamente consideradas para el diseño y la fabricación de equipo.

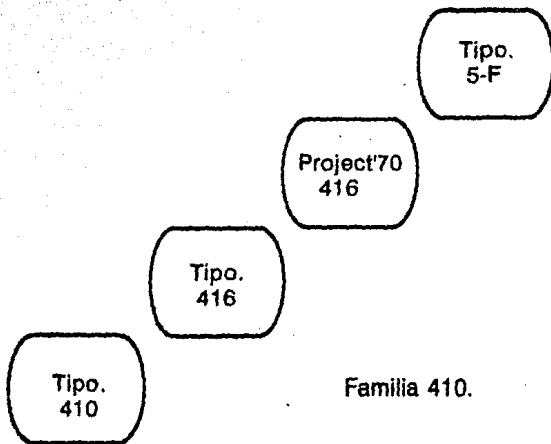
El titanio es más costoso que el acero inoxidable pero menos caro que las aleaciones con base de níquel.

---

1 La ref. 59 presenta recubrimientos para combinar con el acero inoxidable.

La ref. 62 analiza la familia de las aminas en soluciones ácidas.

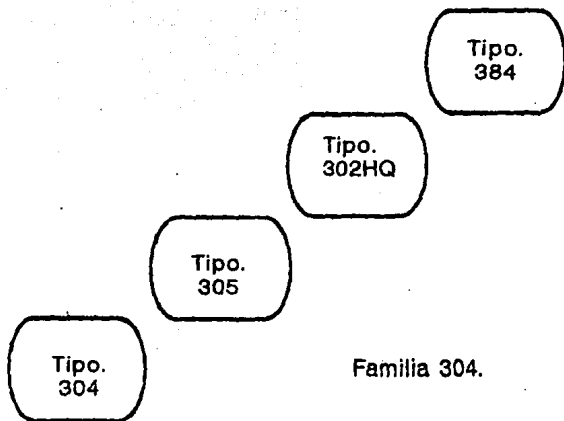




Fuente: Ref. 40, p.p. 18.

**FIG. 5.3. ALEACIONES DE A. INOX. FACILES DE FABRICAR.**





Fuente: Ref. 40, p.p. 19.

**FIG. 5.4. ALEACIONES DE A. INOX. PARA TRABAJOS EN FRIJO.**

**TABLA 5.6 PROPIEDADES FISICAS DEL TITANIO.**

	Ti-50 A (Gr. 2)	Ti-6Al-4V (Gr. 5)	Ti-Pd (Gr. 7)	Ti-Cód. 12 (Gr. 12)
Módulo elasticidad a la tensión (millones de lb/in <sup>2</sup> ).	14.9	16.5	14.9	15.0
Módulo elasticidad a la torsión (millones de lb/in <sup>2</sup> ).	6.5	6.1	6.5	6.2
Densidad (lb/in <sup>3</sup> )	0.163	0.160	0.163	0.164
Calor específico a 75°F. (Btu/lb-°F).	0.125	0.135	0.125	0.130
Conductividad térmica a 75°F (Btu/ft <sup>2</sup> -hr°F/in)	114	50	114	132
Coefficiente de expansión 32 - 600°F, (millonésima de in/°F).	5.1	5.1	5.1	5.4
Resistividad eléctrica. (m-ohm*cm).	56	171	56.7	52

La resistencia a la corrosión del titanio es debida a una capa de óxido estable, protectora y de fuerte adherencia que cubre la superficie. Aunque es muy delgada esta capa, es muy estable y es atacada por pocas sustancias, más visiblemente por el ácido fluorhídrico.

Se ha visto que el titanio es impermeable al ataque de cloruro gaseoso húmedo con un nivel crítico mínimo de alrededor de 0.5 %; donde un ataque puede ser catastrófico.

En condiciones anhidras (ausencia de fuente de oxígeno) debe evitarse el uso del titanio, porque la capa protectora no puede regenerarse si es dañada. 20 años de experiencia en servicio han demostrado que el titanio es inmune a la corrosión de todas las aguas naturales incluyendo al agua de mar altamente corrosiva a temperaturas por arriba de su punto de ebullición.

El titanio también resiste la erosión por vapor ( arriba de 600°F y presión de 2,000 lb/in<sup>2</sup> ) y por alta velocidad del agua.

La velocidad crítica para el titanio es de 90 ft/seg mientras que otros metales resistentes sufren erosión a velocidades tan bajas como 2 a 3 ft/seg.

La unión del titanio con otros metales diferentes, usualmente no acelera la corrosión de este metal. El titanio ocupa un alto lugar en la parte pasiva o noble de la serie galvánica en agua de mar. En muchos ambientes será el miembro catódico de cualquier unión galvánica<sup>1</sup>.

## 5.4 NIQUEL.<sup>(45)</sup>

El níquel generalmente favorece la disminución de la corrosión en condiciones oxidantes, además retarda el ataque de agentes reductores. Un gran número de aleaciones con base níquel están comercialmente disponibles y se mencionan a continuación.

### 5.4.1 HASTELLOY B-2.<sup>(45)</sup>

El hastelloy b-2 es recomendado para el manejo de ácido clorhídrico a todas las concentraciones y todas las temperaturas aun en punto de ebullición; las sales férricas y cúpricas en ácido pueden causar fallas, es por ello que los fabricantes advierten su uso en sistemas con tubos de hierro o cobre.

---

1 Consultar también la ref. 50

La aleación es recomendada para su uso en cloruro de hidrógeno gaseoso y ácido sulfúrico, acético y fosfórico.

B-2 es usada en incineración de desperdicios clorados como resultado de la fabricación de pesticidas, herbicidas y plásticos, tal como el cloruro de polivinilo (PVC).

#### 5.4.2 HASTELLOY C.<sup>(45)</sup>

Esta aleación resiste oxidantes fuertes como cloruro férrico y cúprico, ácidos minerales calientes y sucios, cloro y soluciones clóricas ( orgánicas e inorgánicas), también el ácido fórmico y acético, anhídrido acético, soluciones de hipoclorito y cloro, agua de mar y salmueras.

Sus propiedades a altas temperaturas incluyen resistencia a atmósferas oxidantes y reductoras a temperaturas de 2000°F. La aleación ha sido usada en la maquinación de la pulpa kraft, una pulpa normal contiene 100 ppm de cloruros, 300-400 ppm de sulfatos, 9 PPM de hierro y 2 PPM de sílica. La solución tiene un pH=6 a una temperatura de 240°F.

#### 5.4.3 HASTELLOY C-276.<sup>(45)</sup>

Esta es una mejora del hastelloy C forjado y es resistente a las mismas sustancias y ambientes que ésta; pero su gran mejora es la facilidad al fabricarlo, resiste la formación de precipitados en las zonas de soldados; por lo cual se utiliza en muchos procesos químicos. Tiene excelente resistencia al picado, a la ruptura por tensión y corrosión (RTC) y a atmósferas oxidantes arriba de 1900°F.

La aleación C-276 es usada en la fabricación de intercambiadores de calor para ácido fosfórico en plantas de fertilizantes. Estos intercambiadores manejan ácido sulfúrico diluido por el lado del proceso y agua de mar para enfriamiento.

En la industria farmacéutica se usa el hastelloy para anillos de protección en recipientes con línea de vidrio, para protección en operaciones de carga y limpieza de los recipientes, los cuales manejan ácido clorhídrico y sulfúrico, fosfoxicloruros y ácido monocloroacético arriba de 500°F.

Las hojas de C-276 han sido usadas en revestimientos de ventiladores de flecha inducida, en un molino de pulpa que maneja gases de desperdicio de un quemador, el cual quema orgánicos que son extraídos de la madera.

Estos gases a una temperatura de 220°F, tienen un contenido de humedad del 35% y contienen dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y dióxido de azufre, así como partículas de sulfato y cloruro de sodio.

#### 5.4.4 HASTELLOY C-4.<sup>(45)</sup>

Esta es una versión mejorada de la aleación C-276, pero incluye una estabilidad a altas temperaturas (alta ductibilidad) aún después de un largo período de tiempo en rangos de 1,200 a 1,900°F.

#### 5.4.5 HASTELLOY G.<sup>(45)</sup>

La aleación tiene excelente resistencia a ácido sulfúrico y fosfórico en caliente, resiste agentes oxidantes y reductores y puede manejar soluciones ácidas y alcalinas.

Tiene además una considerable resistencia a mezclas de ácidos, ácido fluosilícico, sulfatos, ácido nítrico contaminado, gases combustibles y ácido fluorhídrico; posee resistencia a la ruptura por tensión y corrosión.

La aleación resiste la precipitación de gránulos, lo cual permite su uso en material de soldadura, aunque en algunos casos sea necesario un tratamiento de calor para una resistencia óptima a la corrosión, después de su fabricación.

#### 5.4.6 INCONEL 600.<sup>(45)</sup>

Esta aleación es superior al níquel puro comercial en condiciones oxidantes y reductoras. La aleación es virtualmente inmune a la rotura de esfuerzos por el ion cloruro (aunque no en altas temperaturas, altos esfuerzos por alcalís, donde se requiere un tratamiento de relevo de esfuerzos y minimización de las operaciones de esfuerzos).

Es usada en manejo de soluciones sulfúricas alcalinas en la elaboración de sulfato o papel kraft, en la fabricación de material fotográfico que contiene sales de nitrato de plata y para el procesamiento de equipo filmico. Da buenos resultados en aplicaciones farmacéuticas en donde la pureza del producto es crítica (en la fabricación de penicilinas estreptomycinas por fermentación, las pruebas han mostrado una velocidad de corrosión de 0.1 mm/año y más bajas). La aleación también es resistente a las soluciones de amoníaco a todas las concentraciones y temperaturas.

### 5.5 COBRE.<sup>(61)</sup>

Las especificaciones para este material vienen identificadas de acuerdo al UNS, y existen más de 300 aleaciones las cuales pueden ser divididas en los siguientes grupos:

**1. COBRES.** Son elaborados con un contenido mínimo del 99.3 % de cobre y regularmente no pueden ser aleados.

**2. ALEACIONES ALTAS EN COBRE.** Incluye materiales que contienen del 96 al 99.3% y no pueden clasificarse en otro grupo de aleaciones.

**3. LATONES.** Contienen zinc como principal elemento aleativo con otros elementos tales como hierro, aluminio, níquel o silicón.

Los latones fundidos caen dentro de tres familias: aleación cobre-zinc, aleación cobre-zinc-plomo, aleación cobre-zinc-estaño.

El Bronce fundido comprende 3 grandes familias: aleación cobre-estaño-zinc (latón rojo, semirojo, amarillo), aleación cobre-estaño-zinc-plomo (rojo plomo, semirojo, latón amarillo) y aleación bronce-manganeso (latón amarillo de alto esfuerzo).

El último grupo de aleaciones fundidas, son conocidas comúnmente como "bronce manganeso", que son latones con zinc como el principal elemento aleativo.

**4. BRONCES.** Son aleaciones de cobre en el cual el mayor elemento aleativo no es otro más que el zinc o níquel en la forma forjada, las 3 principales familias del bronce son: aleación cobre-estaño-fósforo (fósforo-bronce), aleación cobre-aluminio (aluminio-bronce) y aleación cobre-silicón (silicón-bronce).

Hay también 3 familias para el bronce fundido: aleación cobre-estaño (estaño-bronce), aleación cobre-estaño-plomo (plomo y bronce-estaño-alto plomo) y aleación cobre-aluminio (bronce-aluminio).

**5. CUPRONIQUEL.** Son aleaciones que contienen níquel como el principal elemento aleativo.

**6. CUPRONIQUEL-ZINC O NIQUEL PLATEADO.** Contiene zinc y níquel como los principales elementos aleativos.

**7. PLOMO-COBRE.** Serie de aleaciones fundidas con un 20 % o más de plomo y usualmente una pequeña cantidad de plata, pero sin estaño o zinc.

**8. ALEACIONES ESPECIALES.** Son pequeños grupos de aleaciones cuya composición química cae dentro de las categorías aleativas.

El cobre no solo es elegido por su resistencia a la corrosión, sino también por propiedades importantes como su conductividad térmica, esfuerzo, formabilidad, capacidad de aleación y propiedades eléctricas.

En condiciones atmosféricas, la capa protectora es de color verde debido a óxidos, sulfuros y carbonatos de cobre.

En general las aleaciones de cobre tienen buena resistencia al agua y al vapor, pero tienen limitaciones cuando manejan fluidos a altas velocidades. Aleaciones con zinc en un 20 a 40 % son menos resistentes y deben evitarse las siguientes sustancias:

- \* Ácidos diluidos o concentrados y sales ácidas orgánicas e inorgánicas.
- \* Alcalis diluidos o concentrados.
- \* Soluciones neutras de cloruros y sulfatos.
- \* Agentes oxidantes moderados como el hipoclorito de calcio, peróxido de hidrógeno y nitrato de sodio.

En estos medios la corrosión se debe a la dezincificación en donde las aleaciones de alto cobre son inmunes.

Aleaciones con menos del 15 % en zinc, resisten exposiciones en un mayor rango de ambientes químicos, como son: soluciones ácidas, alcalis y sales frías y calientes, diluidas o concentradas mientras no contengan:

1. Aire disuelto u otros materiales oxidantes como: ácido nítrico, crómico, dicromatos y cromatos en soluciones ácidas, cloruros y sales férricas.
2. Compuestos que formen iones complejos solubles con cobre como cianuros y amonios.
3. Compuestos que reaccionan directamente con el cobre, como sulfuros (atacan aleaciones con alto contenido de cobre en mayor grado que a las de zinc.), sales de plata y mercurio y acetileno.

En ácidos no oxidantes como el acético, sulfúrico y fosfórico, el equipo de cobre es altamente usado, la aleación C71300 es la mejor en exposiciones de álcals, aunque algunas soluciones de hidróxido de sodio y potasio a cualquier concentración pueden manejarse a temperatura ambiente en varias aleaciones.

## 5.6 ALUMINIO.<sup>(90)</sup>

El aluminio y sus aleaciones son fabricados en una amplia gama, incluyendo el proceso de fundición. La conductividad térmica del aluminio es 60 % la del cobre

puro, el aluminio sin alea es utilizado en muchas aplicaciones de transferencia de calor. Su alta conductividad eléctrica lo hace popular en dichas aplicaciones, este metal es maleable.

Su esfuerzo de tensión es de 60 MPa (10000 lb/in<sup>2</sup>) pero puede ser endurecido por trabajo en frío (forjado); una limitación del aluminio es que su esfuerzo disminuye arriba de 150°C, el límite de temperatura por seguridad es a 200°C; en condiciones frías puede usarse hasta cerca de -250°C. El aluminio posee una resistencia a condiciones atmosféricas, gases, vapores, aguas dulces y saladas; los ácidos minerales lo atacan, aunque el metal se usa para ácido nítrico concentrado (arriba del 82 %) y ácido acético glacial. El aluminio no se usa en soluciones fuertemente cáusticas.

Las aleaciones de aluminio forjado (tratamiento calorífico) tienen un esfuerzo de tensión de 13000 a 33000 lb/in<sup>2</sup>.

La resistencia de las aleaciones es sensitiva a trazas contaminantes, pequeñas cantidades de mercurio, iones de metales pesados o iones cloruro pueden causar fallas.

## 5.7 PLOMO.<sup>(81)</sup>

El plomo es un material de fabricación económica, además requiere menor energía para su transformación. Cierta instalación de equipo se ha visto favorecida por la introducción del compuesto plomo/acero con enlaces a presión, se ha incrementado la demanda de este equipo para manejar y/o recuperar gases de óxido de azufre y sus hidratos ácidos.

El uso más importante del plomo en la industria química y metalúrgica es la elaboración de tubos para los precipitadores de niebla ácida, usados en la extracción de ácido sulfúrico de una corriente gaseosa cargada de óxido de azufre.

En los últimos años aproximadamente en U.S.A. han levantado 80 unidades con material plúmbico.

El equipo fabricado en la actualidad con plomo es combinado con acero, concreto y madera, la combinación de los materiales es llevada a cabo por sujeción mecánica, enlace adhesivo, enlace metalúrgico, goteo caliente, espreado o electrodeposición. Para esto se introdujo una nueva serie de clasificación para el plomo la cual consta de seis elementos:

1. **Plomo básico (Ba.P.)** Plomo o aleaciones de plomo colado o extruido sin soportes extensivos. Ejemplo: Válvulas y accesorios de plomo colado antimonial.



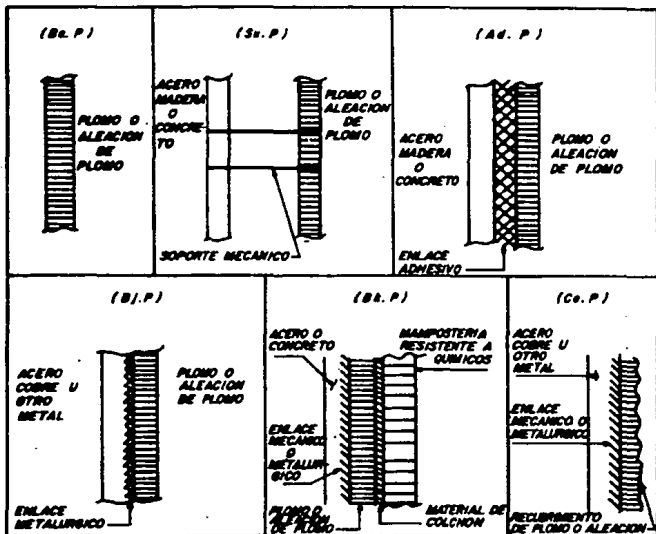


FIG. 5.5 LA SERIE PLUMBICA

**2. Plomo con soporte (Su.P.)** Plomo y aleaciones en cualquier forma de sujeción mecánica a soportes extensivos de estructuras de acero, madera, concreto, cobre y otros materiales. Ejemplo: Recipientes de precipitadores de niebla ácida.

**3. Plomo con adhesivo (Ad.P.)** Plomo y aleaciones en cualquier forma, unido con adhesivo a acero, madera, concreto o materiales de soportes extensivos. Ejemplo: tanques de almacenamiento de ácido elaborados de hojas de plomo unidas por adhesivos a una coraza exterior de Acero.

**4. Plomo enlazado (Bd.P.)** Plomo denso o aleación en capas que es metalúrgicamente enlazado a acero, cobre u otro metal. Ejemplo: Enlace metalúrgicamente alineado de plomo acero para recipiente de reacción.

**5. Plomo aladrillado (Bk.P.)** Láminas de plomo o aleaciones en medio de una capa exterior de concreto o acero y una capa interna de ladrillo cerámico resistente a químicos o vidriados. Ejemplo: Lavadores (Scrubbers) para gas a altas temperaturas.

**6. Plomo cubierto (Co.P.)** Plomo delgado y aleaciones, son aplicados como revestimiento a otros materiales para protección de los mismos. Ejemplo: Capa de plomo esparcida en las orillas del haz de tubos de los intercambiadores de calor.

Dos tipos de plomo se usan comúnmente para la fabricación de equipo, el de soporte de cobre y el antimonial; el de soporte de cobre incluye dos plomos refinados conocidos como químico y plomo sobre ácido, estos contienen de 0.080 % de cobre como en la especificación ASTM B29.

Los dos grados difieren ampliamente en sus niveles de bismuto y plata, los que confieren una mayor resistencia.

El plomo antimonial también llamado plomo duro son aleaciones que contienen de 1 a 13 % de antimonio. Las aleaciones con 6 y 8 % son usadas frecuentemente en aplicaciones químicas porque representan por una parte un balance entre el incremento de esfuerzo y dureza y por otra parte el costo (el antimonio es más caro que el plomo).

El calcio, estaño, telurio, calcio-estaño y antimonio-estaño, aleados al plomo han encontrado aplicación comparable al plomo antimonial.

El plomo es aceptable si se corroe en menos de 30 mpy, éste límite es 50 % más alto que 20 mpy, que es un criterio de diseño, aunque no anticipa el picado.

La resistencia del plomo proviene de la formación de una delgada capa protectora. En ácido sulfúrico al 50 % el plomo forma una capa impermeable, insoluble y adherente de sulfato de plomo, ésta capa es un producto de corrosión que puede proteger al plomo cuando este se encuentra en posición anódica con respecto a otro

metal.

Las dos propiedades claves de la capa son adherencia e insolubilidad, el tiempo de formación de la capa varía; entre 9 o 10 horas pueden ser necesarias para el plomo con soporte de cobre en ácido sulfúrico al 30 % a 70°F. Algunos plomos antimoniales solo necesitan una hora y media en la misma situación.

La formación de la capa depende de la naturaleza del agente corrosivo, su temperatura y concentración. Los efectos galvánicos sobre los otros metales unidos al plomo no deben ser descuidados, si la sal formada por el agente es soluble y adherente la velocidad de corrosión permanecerá baja, este es el caso de muchos ácidos minerales tal como el sulfúrico, sulfuroso, fosfórico, crómico y mezclas de estos. Por el contrario la alta velocidad de corrosión del plomo en ácido nítrico con menos de 50 % es grande debido a la solubilidad del nitrato de plomo en ácido nítrico diluido. En agua oxigenada aun cuando una capa insoluble de hidróxido de plomo es formada, su naturaleza no adherente puede conducir a altas velocidades de corrosión<sup>1</sup>.

En mezclas de ácido sulfúrico ricas de ácido nítrico o clorhídrico a temperatura ambiente, la velocidad de corrosión es menor que en ácido nítrico o clorhídrico solo.

Un ejemplo más dramático es el nivel drásticamente reducido cuando al ácido fosfórico al 85% se le adiciona una cantidad de ácido sulfúrico.

En soluciones que contienen iones que inducen a una capa, si la concentración es demasiado baja, solo ocurrirá una pasivación parcial, cualquier área expuesta sufrirá un ataque acelerado.

Condiciones de operación que afectan la capa protectora incluyen abrasión, agitación, flujo y vibración. Otras condiciones ocasionalmente encontradas incluyen: cavitación, aereación, abuso mecánico y rozamiento. La cavitación causa picado, y acorta la vida de servicio del plomo.

Los efectos erosivos son significativos si el ciclo de formación/erosión remueve el plomo a una alta velocidad a 25°C, con ácido sulfúrico al 20 % se presenta desgaste de 5 mpy, si el ácido fluye a 200 ft/min la velocidad de corrosión es de 20 mpy y a 350 ft/min se duplica.

Los recipientes de plomo colado raramente usados, manejan presiones arriba de 50 psig, este recipiente está compuesto de acero (o concreto) y una coraza con forro de plomo atada o atornillada. Así maneja presiones mayores de 50 psig, esto también aplica para tanques Ad.P.

---

1 Para mayor información consultar ref. 16

A temperaturas bajas disminuye su esfuerzo mecánico y su tendencia a vencer sus esfuerzos; la aleación antimonial soporta con seguridad altos esfuerzos, en donde la aleación de cobre fallaría, pero arriba de 248°F, la aleación de cobre que es menos costosa, tiene mayor resistencia a los esfuerzos.

A temperaturas arriba de 500°F un recipiente Bk.p debe contar con enfriamiento o ventilación en áreas donde el calor pueda aumentar los esfuerzos.

## 5.8 MATERIALES VARIOS.<sup>(32)</sup>

En este apartado se mencionan aquellos tipos de materiales que son novedosos en aplicaciones metalúrgicas y químicas, algunos de ellos son: molibdeno, berilio, magnesio y sus aleaciones, etc.

### 5.8.1 ZIRCONIO.<sup>(32)</sup>

El zirconio ha sido utilizado en situaciones similares al titanio, exhibe buena resistencia a la corrosión en ácidos orgánicos y minerales; también en soluciones alcalinas y salmueras, se utiliza en el manejo de ácido sulfúrico y clorhídrico en donde no haya presencia de iones ferricos.

El Zirconio resiste los cloruros secos a diferencia del titanio, por ejemplo, el tubo de inmersión para introducir cloruro seco en sosa caústica para lavar (o eliminar el color en altas concentraciones de caústicos) es elaborado de zirconio.

El mayor uso del zirconio se encuentra en la rama nuclear y son pocas las aplicaciones en la IQP, es un metal reactivo como el titanio y su desarrollo en corazas y soldaduras es similar. Aunque éste no sufre problemas de agrietamiento que es muy marcado en el titanio.

### 5.8.2 TANTALIO.<sup>(32),(85)</sup>

Es un metal reactivo, el cual absorbe gases tales como el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno e hidrocarburos a altas temperaturas; volviéndose quebradizo porque se forman compuestos intersticiales no dúctiles. Pero el uso de atmósferas inertes durante el soldado y el forjado a altas temperaturas resuelve el problema.

El tantalio es inerte a prácticamente todos los fluidos orgánicos e inorgánicos a menos de 200°F. La excepción son los ácidos fluorhídrico, sulfúrico fumante, oxálico, clorhídrico y álcalis concentrados. El ataque del fluoruro se elimina con un baño de cromo, su alta densidad y alto precio han disminuido su desarrollo, el tantalio es más caro que el titanio.

El metal llega a ser catódico en un circuito de celda galvánica, con respecto a todos los metales. Libera hidrógeno que es absorbido y trae como resultado su fragilidad, por eso debe evitarse su uso en donde pueda haber una reacción catódica.

De todos los metales, el tantalio es considerado el más parecido al vidrio en cuanto a resistencia, usándose unidos ambos o en equipo de acero cubierto de vidrio.

Además proporciona un alto coeficiente de transferencia de calor, por la formación de burbujas de vapor en la superficie cuando se calientan líquidos; construyéndose así paredes delgadas y resistentes.

El equipo de tantalio se usa en concentradores de ácido sulfúrico, calentadores y enfriadores, producción de ácido clorhídrico y destilados, calentadores de bromo y silenciadores, calentamiento y concentración de ácido nítrico, en la elaboración de químicos de alta calidad y farmacéuticos.

### **5.8.3 NIOBIO.**<sup>(32)</sup>

El niobio algunas veces llamado columbio, es ligeramente menos resistente que el tantalio, y sufre fragilidad por hidrógeno si es catódico en una unión galvánica. Muchas aplicaciones son basadas en sus propiedades a altas temperaturas, y a su baja sección transversal para capturar neutrones.

En equipo para petróleo, el columbio es especificado por su resistencia, propiedades mecánicas y su fácil fabricación. Aunque es muy costoso y es usado mayormente en varillas de control nuclear.

### **5.8.4 COBALTO.**<sup>(32),(15)</sup>

El cobalto es vecino del níquel en la tabla periódica, mientras éste tiene cristales hexagonales y el níquel cúbicos centrados en las caras su radio atómico es similar, - tienen la misma valencia en sus formas más comunes y sus propiedades son parecidas, forman aleaciones en solución sólida y son difíciles de separar cuando se alea con el níquel.

Durante la escasez del níquel, se hicieron esfuerzos para que fuera sustituido por el cobalto en muchas de las aleaciones de alto níquel, los resultados eran bastante favorables pero el precio del cobalto se incrementó.

El uso más amplio del cobalto, es como elemento de aleaciones resistentes al calor como la estelita. Otras aplicaciones importantes son los magnetos permanentes donde el cobalto es combinado con aluminio y níquel.

### **5.8.5 MAGNESIO.<sup>[32]</sup>**

La más amplia aplicación del magnesio es en la industria de naves aéreas donde es favorecido por su alta proporción esfuerzo/peso. El magnesio se encuentra en el extremo de las series eléctricas y galvánicas, es necesario usar una capa de conversión para la protección de la corrosión, debido a su actividad puede ser usado como ánodo para la protección catódica del acero y otros metales menos activos.

El magnesio juega un importante rol en la reducción térmica de sales y óxidos de titanio, uranio, hafnio, berilio y otros metales.

### **5.8.6 MOLIBDENO.<sup>[32],[80]</sup>**

El molibdeno es usado en programas de misiles espaciales y para elaborar conexiones a equipo de vidrio. También es aplicado en válvulas especiales para manejar ácido sulfúrico a altas temperaturas y en corazas de equipo para reacciones de cloración orgánica. La aleación de 70 % de molibdeno y 30 % de tungsteno es una solución completamente sólida y ha demostrado su superioridad como material de construcción para aplicaciones de metales fundidos como el bombeo de zinc fundido.

El alto módulo de elasticidad del molibdeno es benéfico en aplicaciones como flechas de agitadores. El molibdeno no está sujeto a la fragilidad o debilitamiento por hidrógeno comparado con las aleaciones de tantalio y níquel.

Es capaz de aguantar shocks térmicos y mecánicos después de ser expuesto a hidrógeno libre y altas temperaturas.

Como materiales de aleación se encuentra en el acero inoxidable austenítico, aleación 20 y hastelloy B con excelente resistencia al ácido clorhídrico. El molibdeno es un metal reactivo y debe ser fundido en vacío y preferentemente soldado en atmósfera inerte. A pesar de esto no ha sido limitada su utilidad.

### **5.8.7 METALES PRECIOSOS.<sup>[32]</sup>**

Los metales del grupo del platino (rutenio, radio, paladio, osmio, iridio y platino) son llamados preciosos por razones obvias, son muy caros. El oro y la plata son considerados en este grupo, pero solo son usados donde ningún otro material haría el trabajo, ya que puede ser favorable en donde el alto costo de mantenimiento inicial está presente.

Los metales preciosos son especificados por su resistencia más otras propiedades como el alto punto de fusión, alta reflectividad y resistencia a la oxidación.

Los discos de ruptura de platino son populares por que no son muy afectados por la

corrosión; el platino y algunas de sus aleaciones tienen buenas características eléctricas.

En protección catódica, el platino es usado como ánodo para transmitir altas densidades de corrientes, se elaboran "ánodos pequeños" de la fibra de vidrio, los llamados "bushings" de platino son calentados aproximadamente a 255°F bajo condiciones oxidantes, estos bushings contienen agujeros extremadamente finos a través de los cuales el vidrio fundido fluye como filamento, cada bushing forma 400 fibras. La alta temperatura a la que se someten sus esfuerzos y la resistencia al agrietamiento y a la oxidación de la aleación Pt-Rh son importantes en su conjunto en esta aplicación.

## 5.9 PLÁSTICOS.<sup>(76)</sup>

Los plásticos se dividen en dos grandes grupos: **termofijos** y **termoestables**. Los termofijos son aquellos plásticos que, en el estado de monómeros son generalmente líquidos o sólidos de bajo punto de fusión, los cuales bajo la acción del calor, presión, luz ultravioleta, catalizadores y aceleradores son transformados en productos rígidos ( a este proceso se le llama **curado** ), son relativamente insolubles e infusibles.

A diferencia de los termoplásticos no pueden ser ablandados o fundidos para poderse volver a recuperarse y moldearse después de ser "curados"; poseen gran resistencia física, son más resistentes a la humedad y aunque más frágiles que los termoplásticos, son más usados actualmente por sus excelentes propiedades.

Un grupo importante en la actualidad son los plásticos reforzados, este es el grupo más versátil de los materiales plásticos. Combinan la ligereza de los plásticos con la fuerza de los metales, son los últimos y únicos plásticos estructurales; resisten la mayoría de los ambientes corrosivos, pueden ser translúcidos, al poderse asociar con otros materiales, incluyendo a los metales, tienen pocas limitaciones en su diseño industrial.

El término "plásticos reforzados" cubre cualquier asociación de material fibroso (refuerzo) con cualquier plástico ( polímero orgánico moldeable, que sirve como aglutinante de las fibras en un artículo determinado). Puede compararse como el concreto reforzado, en donde el concreto contribuye con el esfuerzo a la comprensión, siendo también aglutinante y dando cuerpo.

En esencia la resina (o plástico termofijo) actúa como coraza para proteger químicamente al miembro fuerte (en este caso, la fibra reforzante). Cada tipo de resina, refuerzo y posible combinación de estos, tiene sus propias características, diferentes en término de costo, aplicación y fabricación.

Existe una gran variedad de materiales que, por sus características, pueden reforzar a las resinas plásticas, como son: fibras de vidrio, fibras textiles, naturales o sintéticas, acetatos, papel y en cierto modo, también a los metales. Estos refuerzos se encuentran en forma de filamentos o tejidos y se moldean por diferentes métodos, uno de los más conocidos es el laminado. Las principales ventajas de los plásticos reforzados son:

- Alta relación de resistencia mecánica con respecto a su peso ( la cuarta parte en peso de acero al carbón), excepcional resistencia al Impacto. Su módulo de elasticidad es de  $2.5 \cdot 10^6$ .
- Resistencia a la humedad y estabilidad dimensional.
- Capacidad de orientar las diferentes resistencias mecánicas en cualquier dirección o direcciones, mediante arreglos del refuerzo
- Buenas propiedades dieléctricas dependiendo del tipo de resina (no sufren corrosión galvánica).
- Amplia gama de resistencias químicas (por su estructura molecular que comparado con los metales no es afectada por fenómenos electroquímicos); no requieren acabados de protección.
- Inmunidad contra todas las formas de ataque microbiológico.
- Buena resistencia a temperaturas, dentro de ciertos límites y condiciones; además son aislantes (tanques con soluciones a 99°C están tibios en la pared exterior).
- Versatilidad en el diseño.
- Translucidez, pueden tener color integral.
- Pueden ser combinados con otros materiales satisfactoriamente.
- Prácticamente no tienen límite en cuanto a tamaño, pueden ser modulados y unidos sucesivamente.
- Buena resistencia a la intemperie son muy durables.
- Bajo costo inicial de adquisición comparado contra otros materiales (a mitad de precio comparado con el acero inoxidable y una sexta parte en valor de hastelloy).
- Muy bajo costo de mantenimiento.



- Fácilmente reparables en frío.

Las principales limitaciones de los plásticos, que deben tenerse presentes para su diseño adecuado, son las siguientes:

- Terminado imperfecto dependiendo del método de fabricación; pueden existir varios defectos por equipo elaborado.
- Piezas poco maquinables; son muy pocas veces compatibles con accesorios de metal.
- Presentan poca resistencia a la abrasión.
- **Baja resistencia a la presión**

Las principales aplicaciones de los plásticos reforzados en la industria son: Tanques (de Almacenamiento, proceso y separación-contenedores de pipas); tapas y accesorios; ductos, chimeneas colectores de polvos y gases; tuberías y conexiones; scrubbers, placas y marcos para filtros prensa; corazas y cubiertas protectoras de motores y ventiladores, así como piezas estructurales y arquitectónicas.

---

**CAPITULO.****SEIS.**

---

**Selección de materiales y control de la corrosión en equipo de proceso.****6.1 MONITOREO DE LA CORROSION.**<sup>(11),(37),(79)</sup>

El equipo de proceso sufre las consecuencias de la corrosión cuando se encuentra totalmente requisitado y en operación.

A estas alturas no es posible un reemplazo del equipo ni la sustitución por otro, debido a que el factor económico lo impide; así, se tiene que dar una alternativa para controlar el fenómeno, si no es así, las consecuencias son graves.

De esta forma es utilizado un monitoreo de la corrosión a partir de dos tipos de resistencias: la resistencia eléctrica y la polarizada; la primera puede ser utilizada en todos los ambientes, miden la corrosión más que la velocidad de corrosión, por lo cual no son equipados con alarma o circuitos de control.

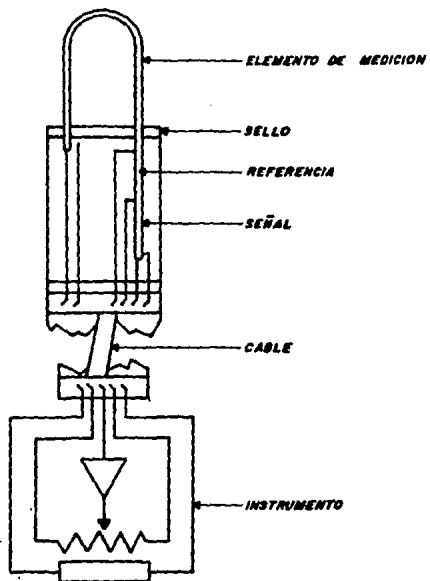
Los instrumentos de resistencia polarizada monitorean la velocidad de corrosión en ambientes conductivos y están disponibles con alarma o circuitos de control.

Un instrumento de resistencia eléctrica es mostrada en la fig. (6.1.)

El elemento de prueba consta de un alambre de plomo y un sensor que son parte del circuito en puente, cuando la corrosión ocurre, el tamaño del elemento de prueba disminuye y su resistencia aumenta.

El cambio de resistencia es compensado por el instrumento y una señal de salida, que es proporcional a la cantidad de corrosión.

La velocidad de corrosión promedio que ocurre durante un período de tiempo puede ser calculada como sigue:



fuate: Ref. 1, p 43

FIG. 6.1 RESISTENCIA ELECTRICA

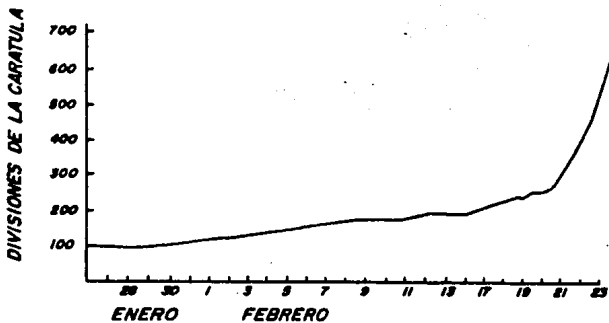


FIG. 6.2 REGISTRO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

$$\text{velocidad de corrosión} = \frac{\text{cambio en la resistencia}}{\text{cambio de tiempo}} * \text{constante del medidor.} \quad (6.1)$$

La parte terminal de una resistencia eléctrica fue colocada en un SCRUBBER de ácido, esto es mostrado en la fig. (6.2).

Este tipo de registros permite detectar condiciones corrosivas fácilmente. Con lo anterior se pueden realizar los cambios operacionales que eliminen los problemas.

Los instrumentos de resistencia polarizada son capaces de monitorear una señal de alarma para la velocidad de corrosión y también puede proporcionar información relativa al tipo de corrosión. Un dibujo de un instrumento de tipo "T" con tres electrodos y alambre de plomo es mostrado en la fig. 6.3.

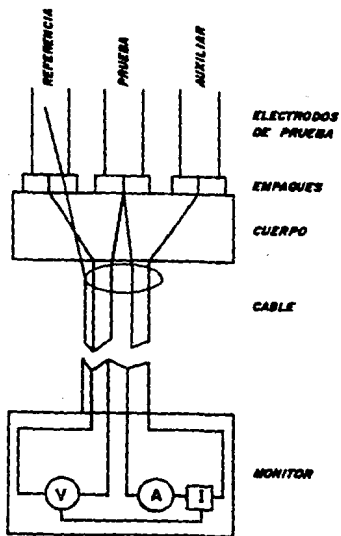
El área marcada "V" es un circuito de alta resistencia con un voltaje ajustable a cero y puede nulificar diferencias de potencial de 100 a 500 Mv entre los electrodos de referencia y prueba. Una fuente de corriente "I" abastecerá la potencia necesaria para polarizar el electrodo de prueba de 10 a 20 M en dirección catódica o anódica a partir del punto nulo.

La salida A puede ser un circuito de corriente o una señal de voltaje que es proporcional a la velocidad de corrosión del metal.

Un monitor de resistencia polarizada medirá la velocidad instantánea de corrosión del metal y es diferente a la pérdida de peso como se ve en la fig. (6.4). Este resultado fue obtenido en el acero templado para un sistema de torre de enfriamiento con agua inhibidor.

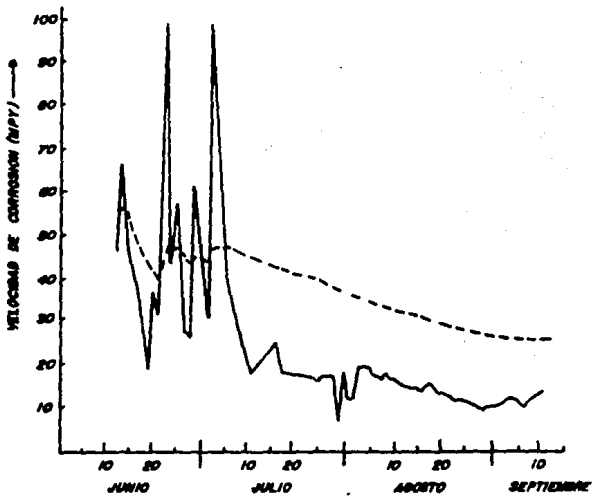
Después de haber conocido el principio de la determinación de la corrosión existen factores adicionales que deben ser considerados en la adquisición del equipo para monitorear como son: principio de operación y ambiente de aplicación; estos factores se encuentran en la tabla 6.1

Existen otros métodos para determinar la corrosión, como el probolog (instrumento portátil para determinar fallas en tubos de intercambiador) y el método de la tinta penetrante (para determinar defectos en superficies de plástico), sin embargo las desventajas son mayores que las ventajas por lo cual no son discutidos con profundidad. La tabla 6.2 contiene un resumen de los principales métodos para determinar la corrosión incluyendo las características y limitaciones en forma condensada para una selección adecuada.



Fuente: Ref. 1, p. 43

FIG. 6.3 INSTRUMENTO DE RESISTENCIA POLARIZADO



— VELOCIDAD DE CORROSION INSTANTANEA  
 - - - VELOCIDAD DE CORROSION INSTANTANEA PROMEDIO

fuenta : Ref. 1, p 43

FIG. 6.4 MEDICION DE LA VELOCIDAD INSTANTANEA DE CORROSION

TABLA 6.1 EQUIPO UTILIZADO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CORROSION.

TIPO OPERACION.	PRINCIPIO DE	AMBIENTE
Corrosometro Magna.	Resistencia eléctrica.	Corrientes líquidas y/o gaseosas.
Petrolite. polarizada.	Resistencia	Corrientes líquidas.
Detector de prueba de hidrógeno.	Difusión gaseosa.	Gas hidrógeno.
Detector de espesores. (ultrasonido)	conversión de ondas sónicas a señales eléctricas que son registradas	Todo ambiente.
Detector de pH.	Potenciométrico.	Ambientes ensayados con conocimiento de pH.
Cámara infraroja.	Diferencia de espesores por radiación	En todos, con temperaturas de -30 a 1000 °F.
Radiografía.	Rayos X.	Varios.
Pruebas de emisión acústica (PEA).	De tipo sónico.	líquido, gaseoso o mezclas.
Utilización de muestras. (coupons)	De tipo mecánico. (desgaste de las mismas.)	Varios.

fuentes: generada a partir de la ref. 79.



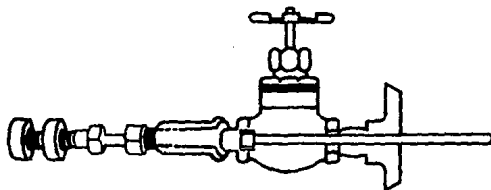
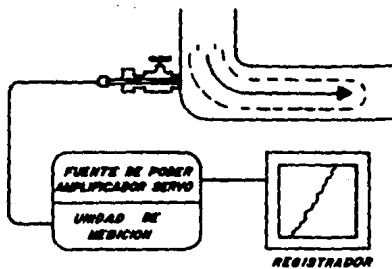
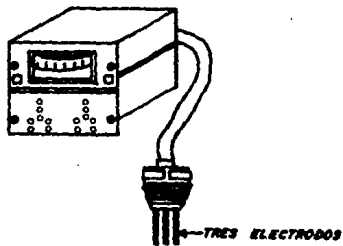


FIG. 6.5 CORROSOMETRO MAGNA



**FIG. 6.6 CORROSOMETRO PETROLITE**

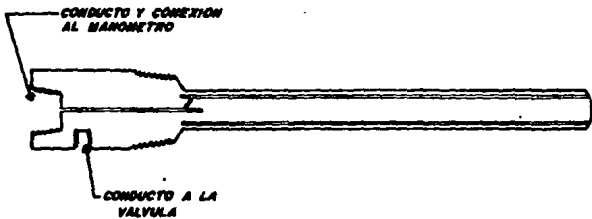
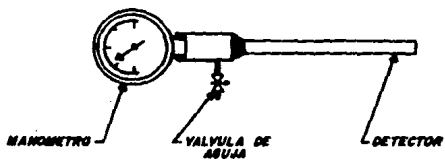


FIG. 6.7 DETECTOR DE PRUEBA DE HIDROGENO

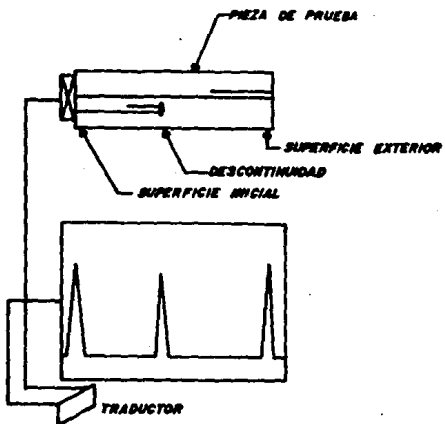


FIG. 6.8 PRUEBA UTILIZANDO ULTRASONIDO

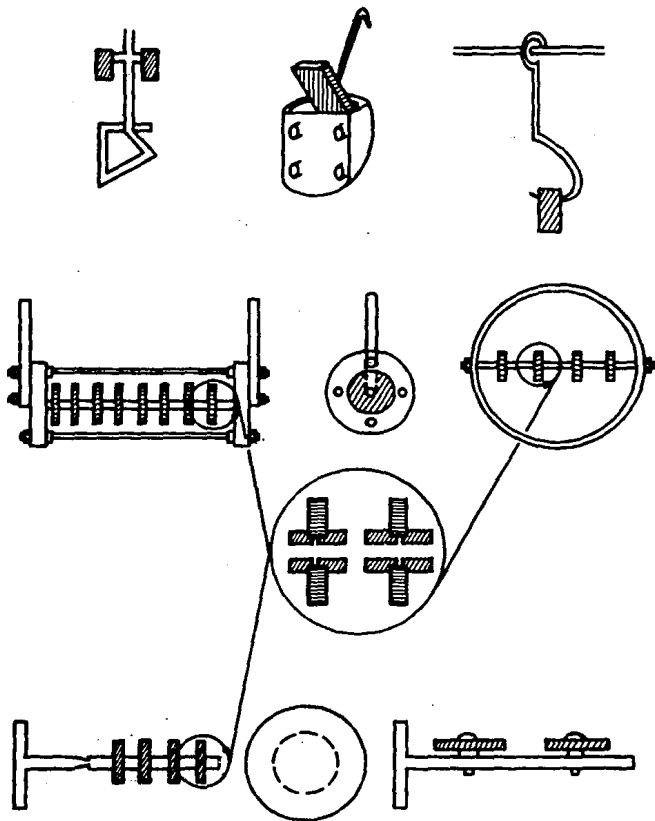


FIG. 6.9 COUPONS DE CORROSION

## 6.2 CORROSION EN SCRUBBERS (DEPURADORES/LAVADORES).<sup>(30),(31)</sup>

Este equipo es indispensable en la IQP debido a las reglamentaciones de emisiones de gases tóxicos. La mayor parte de los scrubbers tienen una alta eficiencia y apagan los gases a su temperatura de saturación; como el gas es humidificado dentro de éste, serios problemas de corrosión pueden desarrollarse, los gases de interés son:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{NO}_2$ .

Los gases arrastran partículas salinas provocando abrasión en parte del equipo. Los gases en la entrada del scrubber poseen altas temperaturas (de 350 a 2000 °F) y las altas concentraciones de ácidos formados por el contacto de humedad-gases, aumentan por evaporación.

El ataque varía en las zonas del scrubber a utilizar dependiendo del tipo, generalmente es una torre la cual contiene platos o empaques con espumas (fig. 6.10), existen también unidades tipo venturí (fig. 6.11).

Los scrubbers tienen un rango de operación con partículas de 1 a 2  $\mu$  y su eficiencia en partículas de menor tamaño es baja, aunque sus costos en energía son bajos, mientras que su pérdida de presión es de 3 a 8 pulgadas de agua.

Las áreas de mayor ataque por corrosión son en la entrada del gas y arriba del separador por arrastre de sólidos (Fig. 6.10).

Si son bien diseñados los internos del scrubber producen un contacto gas-líquido sin tener zonas de mayor velocidad.

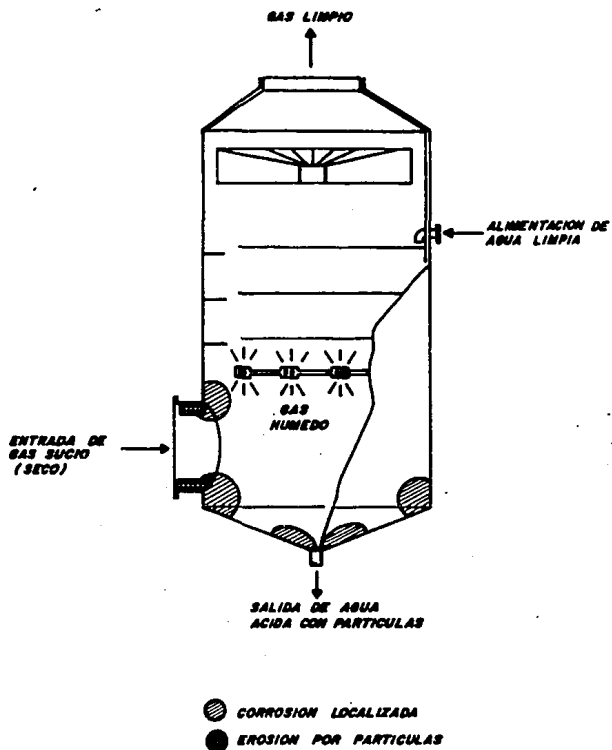
Si no es así, los gases no son retenidos en la zona de entrada y en el interior chocan sobre las paredes parcialmente mojadas, creando interfases húmedo/secas. Esta es la primera área de corrosión en los scrubbers.

Después que el gas pasa a través de lavado, el líquido formado por humedad, gases y sólidos conocido como "licor" es eliminado en una etapa de separación, en el fondo del scrubber, pero en una zona arriba del separador (ver fig. 6.10) donde no hay exceso de agua en la corriente gaseosa, las partículas residuales pueden gradualmente acumularse y forman concentraciones altas de contaminantes en áreas estancadas.

Para evitar la desventaja en la entrada, los gases son propagados en la entrada del scrubber; esto es realizado por un rociado a presión elevada. Este arreglo también elimina sólidos antes de que la corriente gaseosa sea lavada (ver fig. 6.12).

Tabla 6.2. METODOS DE MONITOREO DE CORROSION

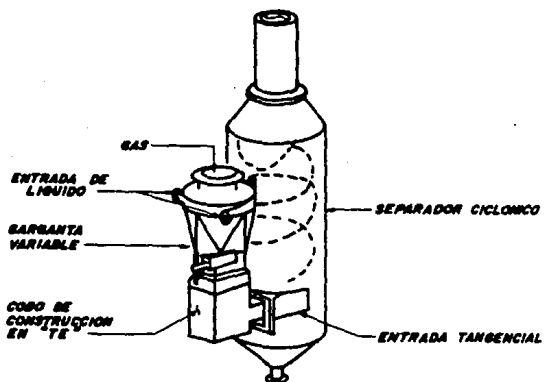
METODO	AREA DE APLICACION	TIPO DE DATOS DE PRODUCCION	LIMITACIONES BASICAS DEL METODO
PERDIDA DE PESO DE LAS MUESTRAS	APLICACION GENERAL	LARGAS CANTIDADES DE DATOS DE CORROSION GENERAL Y EN OCASIONES LOCALIZADA. UNIDADES [ MPY ]	INTEGRA LOS DATOS SOBRE UN PERIODO DE EXPOSICION, DANDO UN VALOR PROMEDIO. SE REQUIERE MUCHO TRABAJO DEL PERSONAL.
PROBENS DE HIDROGENO TIPO --- PRESION	GASES Y ACEITES DE PROCESO EN REFINERIAS Y PLANTAS PETROQUIMICAS	CANTIDAD MEDIA DE DATOS SOBRE LA ACTIVIDAD DEL HIDROGENO, POR INDICADORES DIRECTOS E INDIRECTOS. UNIDADES [ lb/sq in ]	INTEGRA O ACUMULA LOS DATOS ENTRE LAS LECTURAS, APLICA SOLO EN SISTEMAS DONDE EL HIDROGENO SE DISUELVE EN ACERO.
RESISTENCIA ELECTRICA MEDICION DE ESPESOR	APLICACION GENERAL	CANTIDAD MEDIA DE DATOS REPRESENTACION CON RESPECTO A LA CORROSION Y EROSION GENERALES. UNIDAD [ Poly de Prof. ]	ACUMULA DATOS ENTRE LAS LECTURAS.
RESISTENCIA POLARIZADA ( POLARIZACION ). MEDICION DE LA VELOCIDAD DE LA CORROSION	SISTEMAS ELECTROLITICOS ( NORMALMENTE DONDE HAY PRESENCIA DE AGUA )	TIEMPO DE OPERACION REAL Y DATOS DE CORROSION GENERAL. UNIDAD [ MPY ]	REQUIERE ELECTROLITOS.
PENETRACION DE HIDROGENO MEDICION DE LA VELOCIDAD	GASES Y ACEITES DE PROCESO EN REFINERIAS Y PLANTAS PETROQUIMICAS	INDICADORES INDIRECTOS DE LA CORROSION. UNIDADES ( Velocidad de Penetracion del Hidrogeno $\text{cm}^2/\text{min}$ )	APLICA A SISTEMAS EN DONDE EL HIDROGENO DISUELVE AL METAL.
MEDIDAS DE POLARIZACION	SISTEMAS ELECTROLITICOS	DATOS SOBRE LA CORROSION GENERAL Y LOCALIZADA. UNIDADES [ $\mu\text{m}$ y Datos Electroquimicos de Todos los Tipos ]	REQUIERE LA INTERPRETACION DE UN EXPERTO.



fente : Ref. 30, p 43

FIG. 6.10 AREAS VULNERABLES EN UN SCRUBBER DE TORRE





**FIG. 6.11 SCRUBBER VENTURI**

Las torres de rociado son ampliamente usadas, tienen buena eficiencia con partículas de 3 a 5  $\mu$ , son utilizadas para un lavado primario y apagado de corrientes que se dirigen a scrubbers de alta operación, absorben  $\text{SO}_2$ , fluoruros y otros gases ácidos.

La zona de ataque en las torres de rociado, es la entrada después del separador por arrastre de sólidos y en las boquillas de rociado, cuya presión de atomizado es arriba de 15 psig. Cuando suspensiones de ácido débil son reciclados a través de boquillas de acero inoxidable se deteriora la capa que resiste la corrosión. Así que se recomienda un material refractario como el **refrax** (carburo de silicón).

En el scrubber venturi (fig.6.11), los gases viajan hacia abajo y aceleran rápidamente cuando pasan a través de la garganta y se mezclan con el líquido, el cual es inyectado tangencialmente arriba de la garganta, la corrosión es evitada por el flujo del líquido irrigado a lo largo de la pared del ducto.

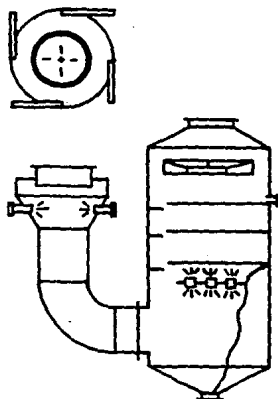
La garganta y el área por debajo de ésta, son atacados por gases ácidos a alta velocidad y muchas aleaciones fuertes, no resisten las condiciones en estos lugares, la alta velocidad no permite el desarrollo de una capa protectora en la superficie del metal y rápidamente se vuelve vulnerable; otra parte afectada es el codo que dirige la corriente gaseosa al separador ciclónico.

El codo es protegido por una construcción en "T", la cual proporciona una superficie de impacto, esta parte contiene líquido que salvaguarda al codo de ataque de corrosión/erosión.

La entrada tangencial dentro del separador ciclónico es sujeta a condiciones severas de corrosión, en donde hay altas velocidades de entrada, las cuales están en un rango de 3500 a 5000 ft/min; cuando se lavan gases provenientes de incineradores con lodos de aguas negras; la corrosión es evitada por el uso de una entrada radial, además de equipo adicional de separación por arrastre, el cual se encuentra después de la torre, separadores con espas radiales y cajas en "V" se encuentran disponibles para este propósito.

Doquiera que se espere una razonable vida del equipo, se prefieren las aleaciones para el manejo de gases corrosivos, éstas cuestan menos que el recubrimiento refractario y soportan fallas por temperatura, además permiten un fácil mantenimiento.

Cuando ya se encuentran instalados los scrubbers de acero inoxidable, se corre un alto riesgo de un ataque severo de corrosión y en tales circunstancias se prefiere revestir refractariamente al equipo, principalmente la garganta del venturi y la entrada del separador ciclónico.



fuenta : Ref. 30, p 44

FIG. 6.12 MODIFICACION DE DISEÑO EN EL SCRUBBER DE TORRE

Un sistema de revestimiento resistente al ácido y a la abrasión puede usar capas de plomo, hule o plástico y soportera estructural de acero al carbón.

Los revestimientos tanto refractarios como de capas, al igual que las aleaciones de acero inoxidable tienen ciertas limitaciones, la pizarra y la arcilla no pueden soportar temperaturas alrededor de 800 a 1000°F, condiciones en las cuales los gases se neutralizan ( o apagan ).

Cuando las gotas del líquido chocan con el gas, intermitentemente en el revestimiento a una temperatura a la entrada por arriba de 800°F, el revestimiento se resquebraja. Para estas condiciones se recomienda utilizar revestimientos de carburo de silicón, los cuales tienen mayor resistencia estos pueden manejar temperaturas por arriba de 2500°F pero su alto costo de instalación limita su uso, el revestimiento con carburo se utiliza cuando el fluoruro esta presente en el licor ( o solución ), sin embargo se tienen una limitación en la temperatura a 1000°F. Además no puede estar en contacto directo con capas de plomo, por que se puede presentar acción galvánica.

El recubrimiento ácido es frecuentemente aplicado en combinación con el mortero y una membrana de protección; cuando poliéster reforzado con fibra de vidrio tiene un espesor entre 60 y 80 milésimas, una capa de asbesto como material adicional es empleado.

Similarmente una membrana adicional de teflón, por ejemplo, es requerido para prevenir daño al plomo cuando son usados recubrimientos de carbón.

Los recubrimientos de ladrillo refractario restringen la forma del recipiente del scrubber, incrementan grandemente el peso, dificultan el acceso al recipiente, tienen una costosa instalación, se requiere control de temperatura y seguridad adicional, además de estorbar en soldaduras de campo en el equipo.

A pesar de estas serias limitaciones, los revestimientos de ladrillo son vitales en zonas críticas del scrubber.

### **6.3 RECIPIENTES Y TANQUES.**

En el sentido estricto, los tanques son un tipo de recipientes aunque con características de diseño muy específicas. Sin embargo cuando se tengan solo datos correspondientes a tanques de almacenamiento o experiencias en recipientes, se deberán analizar estos, para poder extrapolarlos a equipos como reactores, corazas de intercambiadores y torres de destilación; todos estos son una subclasificación de recipientes.<sup>(87)</sup>

Debe recordarse que muchos recipientes en la industria tienen más de 20 años de instalación, por lo tanto, el mantenimiento de este equipo en la mayoría de las ocasiones es un problema.

Un espesador de 52 ft. de diámetro en servicio para una solución de cloruro de calcio al 50 % y operando a una temperatura de 200°F, construida en 1938, contiene 2 compartimientos de aproximadamente 10 ft de altura con aspas internas, éstas rotan lentamente dentro de la unidad, se pensó en utilizar recubrimientos, pero duran poco en este ambiente.

De esta forma se decidió aplicar una protección catódica para el mantenimiento de la unidad. Pero debido a la naturaleza agresiva del cloruro de calcio y la temperatura mencionada. No se conocían exactamente los parámetros requeridos para el diseño de la protección catódica. Así, se llevaron a cabo una serie de estudios en el laboratorio para determinar los valores de la densidad de corriente y el potencial requerido para la protección catódica, por el tamaño de la superficie de la unidad (espesador) y la corrosividad de la solución, una protección catódica de corriente impresa se prefirió a un sistema de ánodo galvánico. Así, a partir de un experimento se determinaron las condiciones y los requisitos necesarios.

Un recipiente circular pequeño se utilizó para dicha prueba, una área de aproximadamente 3 ft<sup>2</sup> fue equipada con calentadores externos, los cuales permiten el control de la temperatura en el recipiente, una solución de cloruro de calcio al 50% obtenida directamente de la planta se mantuvo a una temperatura de 200°F y un ánodo de acero fue conectado a un rectificador de corriente impresa por medio de un resistor variable, el cual permitió el control de la corriente de salida.

El potencial de la superficie interna del recipiente, se midió con un potenciómetro-voltímetro tomando como referencia un electrodo de calomel, ver fig. (6.13a).

Con este experimento se obtuvo una curva de E vs I, cuando ésta cambia de tendencia significa un cambio en la polarización es decir, la mínima corriente suficiente para proteger el material en cuestión fig. (6.13b).

El experimento llegó a conclusiones que implican cambiar el material del electrodo hasta llegar a una conclusión final, la cual indica que el material seleccionado para el ánodo fue el grafito; este material fue descartado desde el inicio de la prueba por su fragilidad, sin embargo, fue el único que soportó las condiciones y temperaturas del cloruro de calcio. La reseña del experimento se muestra en la fig. (6.14).

Originalmente se tenía un diseño en el cual el mejor método de instalar los ánodos, era sobre un soporte en posición horizontal del techo de cada compartimiento. El diseño requería 20 ánodos en la parte superior y 30 ánodos en la parte inferior.

Las conexiones cable-cable y cable-ánodo, así como los colgadores se encapsularon en resinas epóxicas, las varillas de soporte fueron colocadas con aislantes de goma, para asegurar que no existan cortos de los techos al tanque, ver fig. (6.15).

Este diseño después de 70 días de operación se suspendió, debido a que originalmente los ánodos de hierro forjado con unión cromo alto silicón fueron degradados severamente y su vida sería más corta de lo calculado. Además el encapsulado epóxico también se encontraba deteriorado, sin embargo no falló.

Debido a esto se hicieron nuevas consideraciones para la implementación de los ánodos de grafito, la forma de los ánodos fue en placas con aislante no metálico y atornillados en la pared del espesador, lo suficientemente delgados para librar el movimiento de las aspas raspadoras. El diseño aseguró que las características frágiles del grafito se minimizaran por la reducción del número total de ánodos requeridos en la unidad, asegurando que su instalación evitara cualquier falla metálica<sup>1</sup>.

Un problema frecuentemente observado en tanques de techo flotante utilizados para gasolina, son las picaduras y las goteras, estas se presentan en la circunferencia soldada.<sup>(7,3)</sup>

Una inspección visual de la superficie interna del tanque picado y fuera de servicio, indica que en las costuras superiores del tanque una costra café seca ( $Fe_2O_3$ ) estuvo adherida fuertemente en la superficie del metal, en las costuras medias del tanque se encontró una corrosión pronunciada (picado), las costras (una mezcla de óxidos e hidróxidos de hierro) de un espesor considerable (1/4 a 1/2 pulgada) tuvieron poca adherencia en la superficie del metal, también debido al techo flotante que rascaba la costra. El ataque acelerado en esta sección del tanque es atribuido a al oxígeno absorbido de la atmósfera y al agua presente en pequeñas concentraciones en la gasolina y no a la gasolina misma.

La corrosión en esta área es acelerada por la remoción y descascaramiento por las costras de óxidos por las condiciones húmedo-secas. Además, el techo flotante raspa el óxido, la corrosión es más severa en la sección intermedia debido a que el techo flotante estuvo en nivel intermedio por largos períodos de tiempo.

---

1 Para tanques con amoniaco consultar la ref 29.

Para protección de tanques para bebidas y alimentos consultar la ref 82.

La ref 64 contiene información sobre tanques para petróleo.

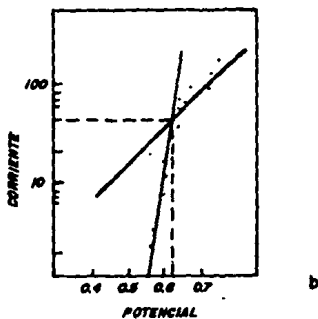
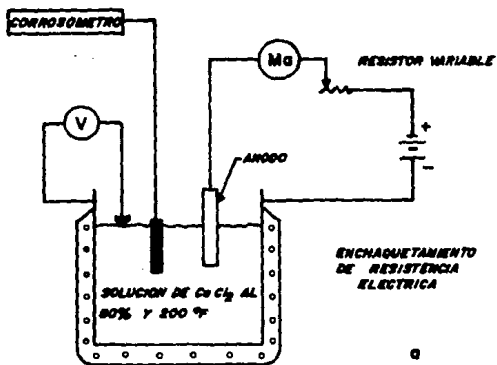


FIG. 6.13 CONDICIONES DEL EXPERIMENTO

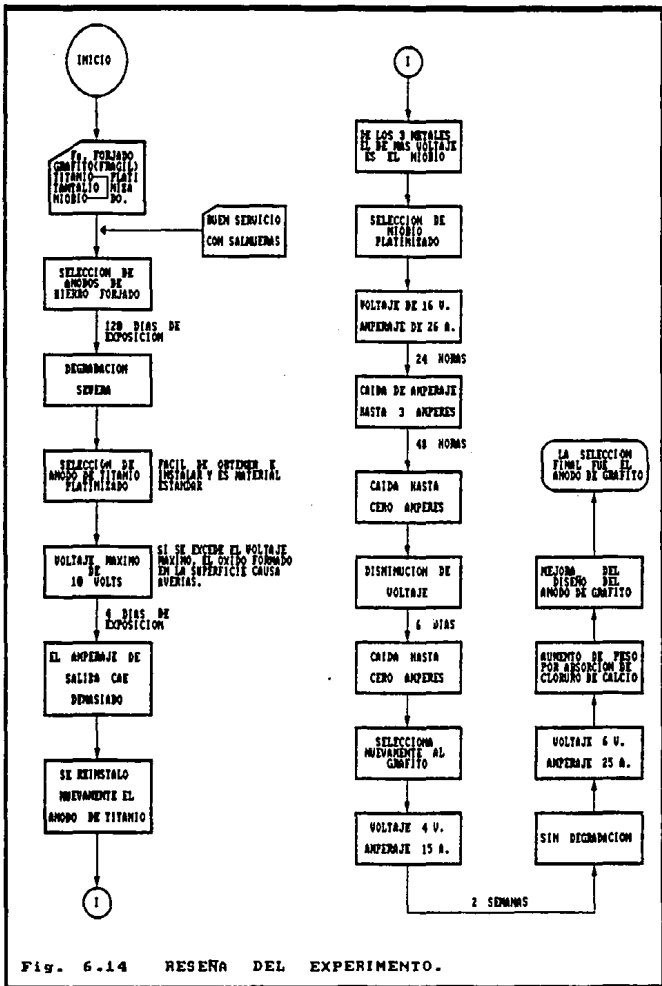


Fig. 6.14 RESEÑA DEL EXPERIMENTO.



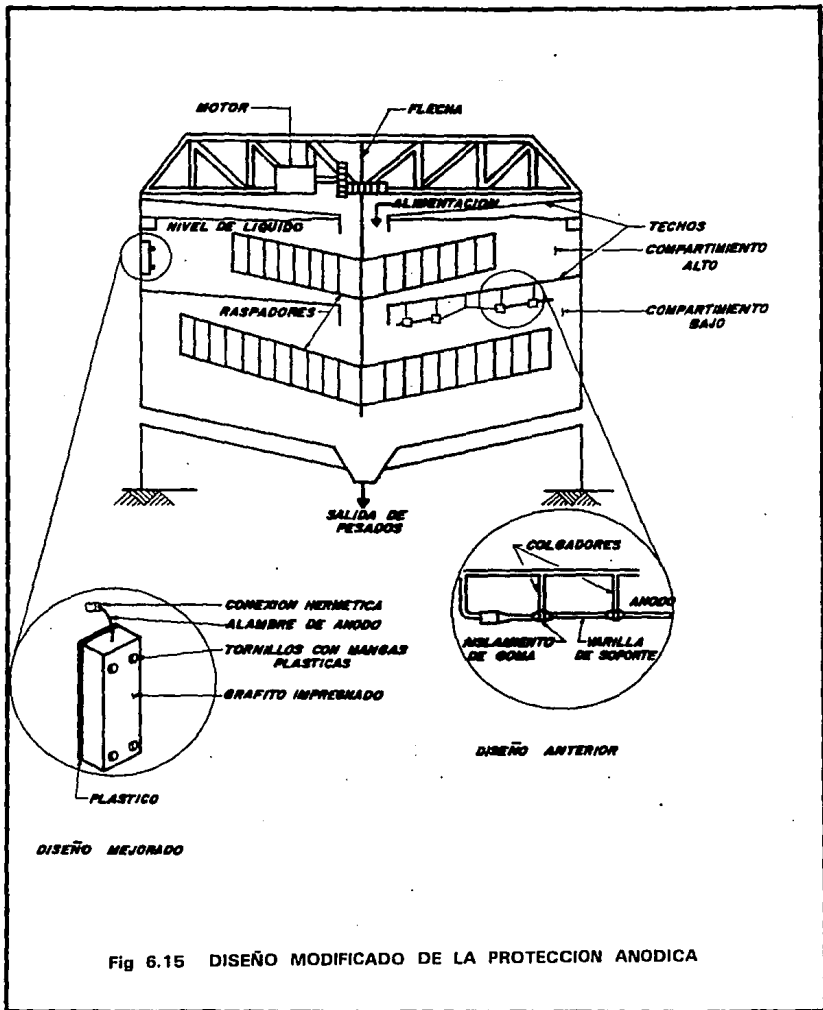


Fig 6.15 DISEÑO MODIFICADO DE LA PROTECCION ANODICA

El probable mecanismo de absorción de aire de la atmósfera, es asociado con el ciclo de respiración del tanque de gasolina. Grandes fluctuaciones de temperatura causan evaporación y condensación en el espacio entre la periferia del techo flotante y la coraza, durante la noche cuando la temperatura cae, baja el punto de rocío y la gasolina condensada cede al aire el espacio del vapor.

El oxígeno concentrado en la porción mojada de la coraza del tanque, bajo la línea del líquido acelerará la corrosión en presencia de agua e impurezas ionizantes en la gasolina.

A partir de esta discusión, al reducir el oxígeno o el agua, disminuirá la corrosión; las aguas son difíciles de excluirlas por que alguna cantidad siempre está presente en el proceso. La cantidad de oxígeno absorbido de los sellos en el techo flotante, pueden ser reducidas manteniendo una cercanía de éstos en la coraza, pero la absorción no puede ser eliminada completamente por el diseño del techo flotante.

Lo que EXXON ha hecho con este tipo de problemas es reemplazar las corazas desde la segunda costura y aplicar un recubrimiento de epoxi-fenilico sobre un silicato de zinc a toda la coraza.

En algunas condiciones se han puesto en operación tanques de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Las principales razones para la amplia aceptación de éste material en servicios donde el acero inoxidable se usó por mucho tiempo, son su resistencia y su bajo costo inicial.

La baja corrosión del PRFV ayuda a proteger los líquidos almacenados de la contaminación como ocurre con los tanques de acero, la incidencia de agujeros es detenida.<sup>(78)</sup>

Los métodos de fabricación de los tanques (PRFV) son el enrollado de filamentos y el módulo de contacto. En el primer método las paredes del tanque inician con una aplicación de una capa interior rica en resina sobre un molde, múltiples hebras de fibra de vidrio son enredadas sobre una capa a una orientación y grosor especificado. Se utiliza de preferencia para grandes estructuras que requieren altos esfuerzos.

Con el segundo método, la resina y el reforzamiento de fibra de vidrio se aplican al molde. El moldeo en contacto proporciona una buena apariencia en la superficie y bajo costo de materiales para tanques más pequeños.

El enrollado de los filamentos en los tanques es de acuerdo a las especificaciones ASTM D-3299, y los tanques por moldeo de contacto son descritos por la National Bureau of Standards Voluntary PS-15-69. El estándar NBS se coteja por la ASTM.

Los criterios de diseño para los tanques PRFV son divididos en dos categorías: diseño de corrosión y diseño estructural.

En el diseño de corrosión, se debe seleccionar una resina apropiada al servicio químico y al modo de construcción.

Muchos tanques (PRFV) resistentes se fabrican con bisfenol A, fumarato polyester o resinas de vinyl ester, las cuales pueden manipular muchos ácidos y bases, además hay otras resinas, como los furanos resistentes en algunas ocasiones a temperaturas excesivas de 200°F.

Los epoxis son también usados ofreciendo una buena resistencia a los álcalis en ocasiones a temperaturas mayores de 200°F. Antes de seleccionar una resina debe conocerse el material a ser almacenado, su rango de concentración temperatura y corrosividad del material.

La clave para una buena fabricación es mantener una gran cantidad de resina (la cual proporciona la resistencia a la corrosión) mientras se proporciona el adecuado reforzamiento contra el resquebrajamiento.

En el diseño estructural se analizan los esfuerzos; la más grande carga sobre los tanques verticales de fondo plano, es la circunferencial debido a la cabeza líquida (presión que ejerce un líquido dependiendo de la altura que presente en el tanque). Al aumentar el reforzamiento de fibra de vidrio en el laminado, se proporciona la resistencia adecuada. La dureza de la pared del tanque aumenta proporcionalmente con el porcentaje de fibra de vidrio.

Los arreglos de fibras de vidrio determinan la dirección y el nivel de dureza llevado a cabo en el laminado, tres orientaciones son usadas en la fabricación de tanques, ver tabla (6.3).

Muchos tipos de tanques (PRFV) tienen fácil instalación subterránea para el almacenaje de combustibles flamables, este tipo de uso se inició aproximadamente en 1960<sup>1</sup>.

Los rangos de dimensiones van de 550 a 50000 galones de capacidad y la lista de productos de petróleo almacenados incluye gasolina regular y sin plomo, diesel, combustible jet (turbosina), aceites para calentamiento, de desperdicio y fluidos anticongelantes.

---

1 Kraus N.J. "FRP underground horizontal tanks for corrosive chemical", Chem. Eng., 87(3), 125, 1980.

Algunas de las muchas aplicaciones químicas corrosivas para los cuales los tanques (PRFV) subterráneos se construyen son: alumbre, etilenglicol, cloruro férrico, ácido fórmico, ácido clorhídrico, peróxido de hidrógeno, alcohol isopropílico, permanganato de potasio, cloruro de sodio y ácido sulfúrico. Algunas ventajas de los tanques subterráneos son las siguientes:

- Temperaturas constantes en profundidades de 3 a 4 pies, las temperaturas son de 50-55°F.
- Minimiza costos, no se construyen escaleras, pasarelas y andamios a diferencia de los terrestres.
- Espacios libres, ya que al estar enterrados simplifican la instalación a nivel de piso.
- Facilidad de drene, utilizan la gravedad sin necesidad de bombeo cuando se utilizan en servicios de lavado y tratando, no obstante para la recirculación, se necesita una bomba.
- Seguridad, no son vulnerables a sufrir accidentes debido a vientos, polvos o vandalismo.

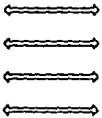
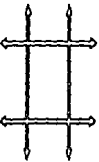
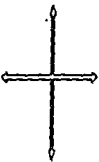
Para recipientes de mayor capacidad se utiliza soportería y relleno. Este tipo de tanques (PRFV) aplican excelentemente en fluidos que flashean por debajo de 200°F y de acuerdo a los requerimientos de la National Fire Protection Association (NFPA 30) para manejo de tales aplicaciones.

Típicos de este tipo de servicios son: formaldehído, metanol, alcohol isopropílico, acetato de celulosa, nafta, formulaciones de barnices y formulaciones de pinturas.

Los tanques (PRFV) para servicios químicos son parecidos en cuanto a fabricación a los utilizados para combustibles la superficie inferior incluyendo el laminado secundario, usado para la construcción de los tanques y accesorios, consta de 20 mm de capa rica en resina y reforzada con un velo de vidrio, seguido por una capa interior (con 75 % de resina) reforzada con fibra de vidrio orientada aleatoriamente para formar un espesor combinado de 100 milímetros.

Se tienen algunas pruebas para este tipo de equipo; el tanque 1 instalado en Houston en 1964 y removido 6 años 10 meses después; el tanque 2 instalado en Stone Ridge, Ohio, en octubre de 1964 y removido del servicio 12 años 9 meses después. La superficie exterior exhibía apariencia de gis, típico de equipo expuesto a la humedad por largos períodos de tiempo, así que los tanques fueron limpiados con abrasivos. En su interior se encontraban en condiciones excelentes, sin evidencias de roturas u otro tipo de ataque, aunque un recubrimiento café oscuro cubría el interior de la pared, esto fue lavado y se obtuvo la superficie lisa sin cambios de color.

Tabla 6.3. ORIENTACION DE LAS FIBRAS EN EL PRFU.

ORIENTACION DE LA FIBRA	TIPO DE REFORZAMIENTO	OBSERVACIONES
<p data-bbox="174 230 366 251">UNIDIRECCIONAL</p> 	<p data-bbox="474 309 591 330">DE AISLAMIENTO</p> <p data-bbox="501 361 563 382">CONTINUO</p>	<p data-bbox="705 269 843 290">ABASTECE FORTALEZA</p> <p data-bbox="718 322 829 343">EN LA TENSION</p> <p data-bbox="718 375 829 396">CIRCUNFERENCIAL</p>
<p data-bbox="174 559 360 580">BIDIRECCIONAL</p> 	<p data-bbox="491 651 560 672">DE TIPO</p> <p data-bbox="484 717 566 738">ENTRETEJIDO</p>	<p data-bbox="702 638 840 659">REFUERZA EN FORMA</p> <p data-bbox="729 690 812 711">VERTICAL Y</p> <p data-bbox="718 743 822 764">CIRCUNFERENCIAL</p>
<p data-bbox="153 901 381 922">MULTIDIRECCIONAL</p> 	<p data-bbox="464 940 584 961">DE TIPO COLCHON</p> <p data-bbox="433 1019 619 1040">CON AISLAMIENTO CONTINUO</p> <p data-bbox="484 1098 567 1119">Y ALEATORIO</p>	<p data-bbox="698 940 837 961">MEJORA LA BARRERA</p> <p data-bbox="733 993 806 1014">CONTRA LA</p> <p data-bbox="733 1046 801 1067">CORROSION</p>

Las secciones fueron cortadas y las pruebas de propiedades físicas se compararon con propiedades promedio obteniéndose excelentes resultados. Cabe aclarar que dichos tanques contenían combustibles líquidos y actualmente no se cuentan con datos para otros fluidos químicos.

#### **6.4 INTERCAMBIADORES DE CALOR.**<sup>(24),(25)</sup>

En este tipo de equipos representa una complejidad adicional el material a seleccionar, debiéndose tomar en cuenta su alta conductividad térmica, es imposible hacer una elección óptima de materiales, ya que el número de variables es amplio.

Además deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El material de la hoja de incrustación de los tubos (tubesheet).
2. La forma de incrustar los tubos en la hoja ( expansión explosiva, soldadura de fusión, soldadura de explosión, etc.)
3. Naturaleza química de la sustancia utilizada así como sus impurezas.
4. En unidades enfriadoras de agua, puede haber necesidad de medidas de protección como revestimiento, conductos de agua; protección catódica (ánodo de sacrificio o de corriente aplicada) para proteger conductos de agua, hojas de los tubos y bordes de los mismos; así como los accesorios de plástico o metal, colocados en la entrada de los tubos. También los tratamientos de agua pueden ser necesarios para prevenir costras y fallas por corrosión ( ya sea agua de mar, cloración para combatir bacterias, dosis de sulfato ferroso para proporcionar una capa protectora sobre los tubos ).
5. Material para la coraza y para soportar las placas y/o baffles.
6. Debe existir compatibilidad con electrolitos utilizados de tal forma que se eviten los efectos excesivos de la corrosión galvánica. Deben ser además compatibles con los métodos de construcción involucrados ( como el soldar por fusión ) y tener un espesor adecuado al esfuerzo de tensión; que resista las temperaturas y presiones de operación involucradas.

En la industria química y petroquímica, los ambientes de trabajo del equipo son muy diversos, existiendo intercambio de calor entre dos líquidos o dos gases o un líquido y un gas; en algunos casos un líquido puede ser evaporado o un vapor condensado o ambos casos. En el enfriamiento de algunos gases la presencia de vapor de agua es importante, ya que si la temperatura cae por debajo de la temperatura de rocío, una

solución corrosiva es formada. En el caso de soluciones acuosas, el contenido de oxígeno disuelto es frecuentemente el mayor factor que determina la velocidad de corrosión.

En el caso de aguas de enfriamiento; muchos factores, junto a los ya mencionados, pueden ejercer una influencia como las burbujas de aire retenidas en el agua o la presencia de partículas sólidas suspendidas que pueden causar abrasión o la polución del agua (por ejemplo el sulfuro de hidrógeno como resultado de la actividad de las bacterias reductoras de sulfatos).

El agua con sal (salmueras, agua de mar) es usada para enfriar intercambiadores de calor tubulares, en muchas aplicaciones industriales. Esta fluye a través de los tubos, pero ocasionalmente (cuando el producto a ser enfriado está a presión muy alta) la salmuera se encuentra del lado de la coraza con el producto en los tubos. La acción de la salmuera en los materiales depende de muchos factores como la velocidad del agua, efectos de turbulencia local, presencia de burbujas de aire, temperatura, composición (incluyendo gases disueltos y agentes de polución), presencia de sólidos suspendidos, uso de cloración y otros tratamientos de limpieza de tubos, etc. Un resumen cualitativo de las clases de material y sus susceptibilidades son dados en la tabla (6.4). Otros puntos que se mencionan son:

- Pequeñas cantidades de cobre disuelto en las aleaciones, disminuyen los crecimientos marinos y confieren características de resistencia.
- Para tubos roscados, donde la configuración promueve algún grado de turbulencia en el interior, es deseable usar materiales con buena resistencia a la erosión.
- El acero inoxidable con estructura austenítica, ferrítica o mixta puede sufrir corrosión por picado, agrietamiento intercrystalino y por rotura de esfuerzos; con agua de mar y otras soluciones cloradas. Ciertas composiciones con mayor cantidad de molibdeno, son mucho más resistentes a estas formas de corrosión.

La mayoría de los materiales son resistentes al agua pura a excepción del acero templado. Sin embargo los condensados, contienen oxígeno disuelto y otros gases no condensables ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) pueden ser agresivos al cobre y latón y en menor extensión a las aleaciones de cobre-níquel, en soluciones alcalinas, el aluminio y sus aleaciones no son usadas, hay ciertas limitaciones para usar cobres y latones (dependiendo de concentración, temperatura y velocidad). Los demás materiales pueden ser usados satisfactoriamente. El cobre y sus aleaciones son prohibidas en ambientes amoniacales.

El acero inoxidable, titanio y otras aleaciones con alto níquel se utilizan sobre un amplio rango de condiciones de operación; pero ninguno es satisfactorio bajo todas

**TABLA 6.4 MATERIALES PARA EL DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR.**

MATERIALES.							
Materiales req. para el proceso	Hoja de Varillas	Canal ó Espaciadores	Tubos	Coraza	Baffles	Incrustación	Cabeza
Condensadores y enfriadores con ciclo de agua por la coraza.							
Acero	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero
Al	Al	Al	Cobre revestido con Al ó Al solamente	Cobre	Al, Everdur Admiralty ó Bronce naval	Al	Everdur Cobre ó Al
Cobre.	Everdur	Cobre	Cobre	Cobre Admiralty ó Bronce naval	Everdur	Al Cobre ó Al	Everdur
Condensadores y enfriadores con ciclo de agua por los tubos.							
Acero.	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero
Al	Al	Cobre forrado con Al	Cobre	Al	Al	Al	Al,
Cobre.	Everdur	Cobre	Cobre	Cobre Admiralty ó Bronce naval	Everdur	Everdur	Cobre

Al. = Acero inoxidable.

fuelle : R.E. Smallwood, Heat Exchanger Tubing Reliability, Materials Performance, 16, 27, (1977)



**las circunstancias.** Deben consultarse publicaciones especializadas o técnicas de distribuidores cuando no existan experiencias previas de operación<sup>1</sup>.

Los criterios proporcionados para los tubos pueden ser extrapolados a la coraza, así mismo debe tenerse en mente que la coraza es un recipiente y que ciertos criterios para los recipientes pueden tener aplicación.

Otro material que puede elegirse para la construcción de este equipo es el grafito, este material con características anafóticas conserva de los metales buena conducción del calor y la electricidad, y de los no metales resistencia a la corrosión química como los refractarios y hules, otras propiedades de interés son las siguientes:

- Habilidad para resistir cambios rápidos y repentinos de temperatura sin fractura.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Estabilidad a altas temperaturas. A 1500°C el acero se funde mientras que el grafito mejora su resistencia.

A pesar de su gran potencial no es muy utilizado, es bueno en compresión, pero pobre en tensión.

La resistencia a la corrosión del grafito es utilizado por el lado de los tubos, del lado de la coraza puede utilizarse recubrimientos o enviar un fluido poco corrosivo por la coraza.

El cabezal para los tubos generalmente es de grafito y se unen con cemento, lo que trae problemas de mantenimiento, ya que en roturas de tubos o goteras debe reensamblarse toda la estructura requiriendo períodos largos de tiempo.

## **6.5 TORRES DE ENFRIAMIENTO.** <sup>(71),(28),(88)</sup>

Las torres de enfriamiento son equipos muy importantes ya que sus servicios son enviados a muchas partes del proceso de esta forma sus aguas acumulan impurezas como sólidos, óxidos metálicos, etc.

Por otro lado se puede encontrar agrietamiento del equipo debido a los depósitos de sales, causados por la corriente de aire. Los recubrimientos de galvanizado pueden convertir catódico al acero a altas temperaturas de agua (158°F).

---

1 Para mayor información consultar las ref. 8 y 74.

Las aleaciones de cobre deberán seleccionarse con mucho cuidado, la aleación llamada latón, contiene más de 20 % de zinc y esta sujeta a la dezincificación, pérdida de resistencia y rompimiento en tratamiento continuo de agua, la aleación silicon-bronce (everdur), presenta buenas propiedades anticorrosivas; son duras y funcionan bien en toda la torre, pero su costo es muy elevado.

Los aceros inoxidable 316, 304, 304L y 316L; están sujetos a perder resistencia por corrosión y rompimiento causado por la precipitación de carburos en el momento de aplicar la soldadura.

El hierro colado, es muy usado para los ejes del ventilador, es un material con propiedades anticorrosivas pero debe tenerse mucho cuidado en la fabricación e instalación para evitar rompimientos.

El aluminio colado es un material usado para las aspas del ventilador con un servicio de 15 a 20 años, si se tiene cuidado en su instalación. En muchos casos es necesario aislar con fibra de vidrio el eje de las aspas de aluminio, para prevenir una corrosión desigual del metal. El aluminio en torres a altas temperaturas proporciona un servicio adecuado.

Los plásticos tienden a ser usados en servicio de torres de enfriamiento, el más común es el políester reforzado con fibra de vidrio (PRFV), este plástico es muy utilizado en lo que es el cilindro del ventilador, sellos, aspas, empaque y revestimiento con muy buenos resultados.

El tipo de proceso involucrado es uno de los factores de importancia que hay que considerar, por ejemplo se presentará una filtración de amoníaco dentro de una torre que se utiliza en un sistema de refrigeración; el latón y aleaciones de cobre, son materiales mal seleccionados.

Si existe una filtración de aceite en el sistema de circulación de la torre, el balance de calor y el relleno podrían verse afectados considerablemente. En las termoeléctricas, la cantidad de agua a manejar, hace que estas plantas elijan el concreto como material de construcción de sus torres; con internos o rellenos de material plástico tipo película, este tipo de torres también son muy comunes en la industria de fertilizantes.

Los componentes en una torre de enfriamiento pueden estar inundados, sujetos a salpicaduras, esparcidos de agua o expuestos al aire húmedo caliente; estas exposiciones son peligrosas. Si los materiales y los recubrimientos fueran seleccionados para un servicio duradero considerando todas las condiciones; las torres podrían resultar demasiado costosas; así se deben usar materiales y recubrimientos estándar para obtener un buen funcionamiento.

La mayoría de los fabricantes denominan condiciones normales a las siguientes:

" El agua circundante con un pH entre 6 y 8, un contenido de cloro por debajo de 750 ppm; como NaCl un contenido máximo de sólidos totales disueltos de 1500 ppm, una temperatura máxima de 130°F (54.4°C), una contaminación poco significativa de químicos extraños o sustancias externas; y un adecuado tratamiento del agua para minimizar las incrustaciones y con una atmósfera no extrema como medio de operación ".<sup>1</sup>

La torre es un equipo que esta en contacto directo con el agua y sus sales y gases disueltos; provoca incrustaciones y agentes corrosivos en los materiales. Por lo tanto además de un mantenimiento mecánico debe existir un mantenimiento químico.

Los requerimientos de descarga o desalojo (blow down) y de reposición de agua, son habituales en la operación de la torre y deben ser tomadas en cuenta para su modificación o diseño final. Al circular el agua por la torre, una porción de esta se evapora por lo cual hay que reponer (make up) una cantidad de agua; porque si no es así se incrementa el porcentaje de sólidos disueltos lo que provoca incrustaciones, de esta forma también hay una descarga continua (blow down) de agua para evitar el aumento en la concentración de partículas y sustancias suspendidas, la otra cantidad de agua se recircula a la torre, ver fig. (6.16).

De aquí la importancia del mantenimiento químico a las torres de enfriamiento; los objetivos de un tratamiento al agua de enfriamiento comprende la prevención de formación de incrustaciones, óxido, crecimientos orgánicos, obstrucciones y corrosión de los materiales.

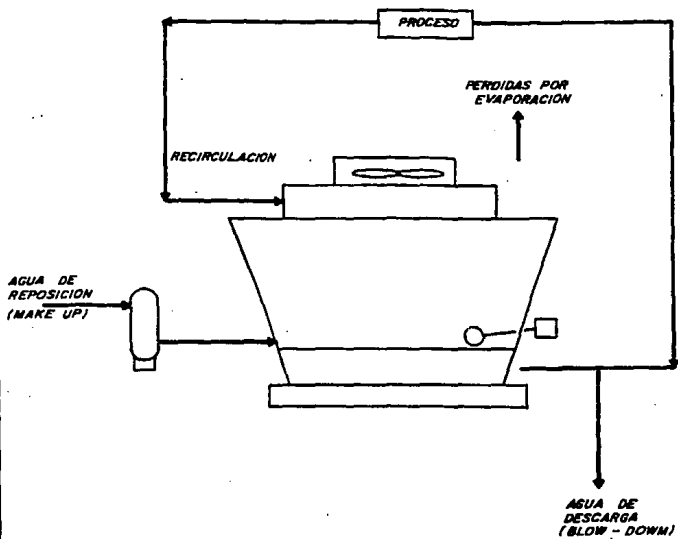
Un inhibidor es necesario para proteger las superficies de los metales. Los cromatos son considerados los mejores inhibidores para estas condiciones en donde un rango de pH de 6.2 a 6.8 es aplicable.

Los cromatos se adicionan a la torre de enfriamiento, estos son considerados inhibidores anódicos, forman una capa pasiva de óxidos férrico y crómico. Cuando la capa es formada no existe la diferencia de potencial entre las áreas catódica y anódica y la corrosión se detiene.

Aunque los cromatos son inhibidores muy efectivos en sistemas de enfriamiento, son considerados tóxicos y contaminantes por lo que cuando se descarga (blow down) una cantidad de agua; se violan las leyes ambientales y esto es una desventaja de peso.

---

1 Referencia 7 p.p. 123



fuenta : Ref. 28, p 52

Fig 6.16 ARREGLO TIPOICO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Por lo cual se tiene que aplicar un proceso que elimine el exceso de cromato sin que la descarga de las torres viole las leyes<sup>1</sup>.

De esta forma se mencionarán los tratamientos con cromatos, una primera alternativa es no descargar al agua y al mismo tiempo mantener el agua en condiciones de proteger al sistema contra la corrosión. A continuación se mencionan algunas:

1. Suavización con cal apagada al agua de reposición y descarga.- Instalando suavizadores de cal apagada y sales alcalinas las cuales reducen los sólidos disueltos y en suspensión, proporcionando estabilidad al agua de enfriamiento; sin embargo los cloruros y la sílica limitan la suavización.
2. Suavización con zeolita al agua de reposición.- Es necesario también instalar un filtro de sedimentos, ver figura (6.17).

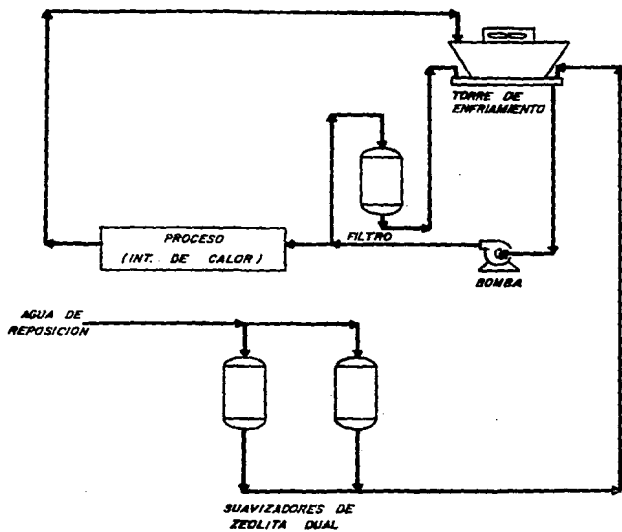
Una segunda forma de tratar los problemas de cromatos es eliminarlos del agua de descarga y desalojar el agua sin problemas los métodos descritos son:

1. Destrucción del cromo.- Esto es reducir el cromo de su forma hexavalente a la trivalente con agentes como el dióxido de azufre, el bisulfito de sodio o el metabisulfito de sodio a un pH de 2 a 3 y después elevarlo a 8.5 con cal o sosa caústica y precipitar el cromo trivalente a hidróxido de cromo se requiere sedimentar y clarificar con polímeros y un depósito de desechos.
2. Remoción del cromo por intercambio iónico.- Con resinas ligeramente básicas, además se utilizan operaciones como filtración, disminución y recuperación de pH.
3. Reducción electroquímica del cromo.- Con ánodos y cátodos de hierro; cuando se aplica una corriente eléctrica se produce hidróxido ferroso, el cual reacciona con el cromo hexavalente para formar un estado insoluble trivalente, así que también son necesarios los clarificadores, sedimentadores y un depósito de desechos.

Para mayor información consultar referencias (28) y (88); estos tratamientos son costosos, sin embargo debe considerarse que el agua tratada viaja por todo el proceso por lo cual también se debe mantener en buenas condiciones todos los intercambiadores donde el agua es necesaria.

---

<sup>1</sup> Consultar ref 63.



fuenta : Ref. 28, p 53

Fig 6.17 SUAVIZACION DE AGUA DE REPOSICION POR EL PROCESO DE ZEOLITAS

## 6.6 EVAPORADORES. <sup>(75)</sup>

La evaporación juega un rol crítico en la fabricación de una variedad de productos en la industria química de proceso incluyendo alimentos, pulpa y papel, farmacéuticos, químicos orgánicos e inorgánicos, polímeros y fertilizantes.

Esta operación unitaria puede también aplicarse en plantas de energía, la evaporación se usa para concentrar una solución consistente de un soluto no volátil y un solvente volátil, a diferencia de la cristalización; en la evaporación se tiene como producto un líquido y casi nunca llega a la saturación a las condiciones de operación, por lo que no se obtienen cristales.

En plantas de proceso el diseño de varios equipos, depende de las características del soluto y solvente. El soluto muchas veces tiene calor sensible o tiende a polimerizar o aglomerarse sobre la superficie de transferencia de calor; en plantas generadoras de energía la evaporación separa agua pura de agua tratada además:

- El producto es vapor separado del residuo (soluto y solvente) que es descargado como un lavado.
- En flujos continuos es necesario prevenir la formación de impurezas en el sistema.
- No aumentar el punto de ebullición.

En la selección de materiales para la fabricación de estos equipos debe de considerarse lo siguiente:

1. Tendencias corrosivas y erosivas del fluido en proceso.
2. Aplicación industrial, plantas alimenticias y farmacéuticas en donde la contaminación del producto y/o los requerimientos de higiene son mandatorios para el uso de aleaciones de alto grado.
3. Economía (de ser posible).
4. Preferencia de uso, los requerimientos de materiales de construcción afectan no únicamente la metalurgia de la unidad, sino también de los equipos que interactúan con éste.

## 6.7 TUBERIAS.

Los criterios para la selección de tuberías son diversos, si los materiales no son seleccionados adecuadamente, los productos de la corrosión pueden causar daño a otras áreas del proceso y puede existir un mayor costo debido a un alto mantenimiento y reposición, así como tiempo de paro.

Un criterio muy común utilizado para diseñar tuberías en plantas petroquímicas, es el ANSI B 31.3, este código prescribe: mínimos requerimientos de material, diseño, fabricación, erección, inspección y pruebas de sistemas de tuberías sujetas a presiones o vacíos sobre un rango de temperatura arriba de 1500°F.

Diseños inapropiados de tuberías pueden fallar como resultado de niveles de esfuerzos excesivos durante el servicio el esfuerzo permisible básico para un material es particular a una temperatura dada, esto es basado en varios criterios y cualquiera de ellos puede gobernar.

De acuerdo a este código, los esfuerzos permisibles no excederán por debajo de los siguiente:

- Un tercio de mínimo esfuerzo de tensión del material a temperatura ambiente.
- Un tercio de mínimo esfuerzo de tensión del material a temperatura de diseño.
- Un tercio de mínimo esfuerzo de tracción del material a temperatura ambiente.
- Un tercio de mínimo esfuerzo de tracción del material a temperatura de diseño.
- 67 % del esfuerzo promedio al final de 100,000 hr.
- 80% esfuerzo mínimo para ruptura al final de 100,000 hr.

Muchas tuberías se elaboran de metales y su resistencia a la corrosión es igual a la formación de una "película pasiva" sobre la superficie.

Los metales pueden formar esta película después de un período de exposición al aire. Sin embargo, el tratamiento químico puede ayudar a la formación de la película mucho más rápidamente. Por ejemplo la exposición de acero inoxidable austenítico en ácido nítrico puede producir esta película. Ciertos químicos, no obstante, pueden atacar varias películas; los halógenos (los cloruros, por ejemplo, pueden atacar y penetrar la película en el acero inoxidable) pueden generar un deterioro total en la tubería.



El conocimiento de estos factores es provechoso para permitir en el diseño :

1. Determinar la disponibilidad de un material específico para resistir el ataque.
2. Diseñar el sistema para prevenir el ataque.
3. Diseñar el sistema para disminuir la relación de ataque hasta un nivel aceptable cuando no es posible la eliminación completa.<sup>1</sup>

Los siguientes puntos pueden ayudar a elaborar una evaluación económica de los materiales candidatos. Una regla fundamental es: "ningún material debe ser eliminado solo por su precio".

- \* Listar todos los materiales disponibles para el proceso.
- \* Para cada material listar tamaños (diámetro y cédula) y cantidades basadas en velocidad de corrosión, dureza y transferencia de calor.
- \* Estimar el costo de la tubería para cada material.
- \* Estimar la vida de la tubería para cada material.
- \* Determinar si la vida adicional de la tubería bajo ciertas condiciones disminuye después de un tiempo, con lo cual los materiales pierden sus características.
- \* Calcular los costos de mantenimiento y reparación, para cada material.
- \* Recopilar y comparar los costos totales.
- \* Seleccionar el material que proporcione el mejor servicio.

Debe recordarse que para procesos a presión baja las tuberías de materiales plásticos siempre serán buenos candidatos.

## 6.8 CALDERAS. <sup>(87)</sup>

El vapor es ampliamente utilizado para calefacción, para evaporar disoluciones químicas, para mover turbinas, máquinas y bombas; para realizar los miles y miles de procesos en todas las ramas de la industria.

---

(1) consultar Ref. 49 para recubrimientos en tuberías.

El promedio de vida de una buena caldera es de alrededor de 25 años y durante este tiempo es de gran importancia el costo de funcionamiento de la misma. Para realizar una compra adecuada en lo que se refiere a calderas es necesario considerar una serie de factores bastante importantes, que son:

- Cálculo preciso de la demanda de vapor que se está requiriendo; esto determinará la capacidad de la caldera.
- Es importante la determinación de la presión que el vapor debe tener para el buen desarrollo de un proceso determinado.
- No debe haber desperdicios de combustible.
- Tiempos de operación de la caldera; esto determinará el mantenimiento adecuado
- Selección del combustible a usar.
- Selección del número de equipos.
- Espacio disponible para el equipo.
- Costos de operación del equipo.

Los llamados gases no condensables son gases que no pasan al estado líquido a la temperatura normal encontrada en el agua cruda, son agentes corrosivos que invariablemente son arrastrados por el agua. El más peligroso de los gases es el oxígeno disuelto en el agua y en segundo lugar el bióxido de carbono.

Las consecuencias del oxígeno disuelto en una caldera es que ataca al hierro formando hidróxido férrico. Este deterioro se presenta como ampollas en el material y dependiendo del tiempo que el oxígeno ataca al material, puede llegar a perforarlo.

El bióxido de carbono corroe los materiales muy especialmente en presencia de oxígeno disuelto. El bióxido de carbono combinado con el agua, forma ácido carbónico, el cual es un agente corrosivo para metales férricos, aleaciones de níquel y cobre.

Ocasionalmente se presenta otro gas no condensable en el agua, llamado hidróxido de amonio, el cual si bien no ataca las partes metálicas de la caldera, si ataca las aleaciones de cobre comúnmente empleadas en válvulas, tubos y otras conexiones.

Con cierta frecuencia, llega a presentarse corrosión en las líneas de retorno de condensados, debido a la presencia de oxígeno y  $\text{CO}_2$ , el primero se encuentra disuelto en el agua, pero también puede ser absorbido del aire con el cual entra en contacto

el agua.

El agua de lluvia es la más pura pero siempre contiene oxígeno disuelto y dióxido de carbono que toma del aire, haciéndose más corrosiva.

La corrosión en calderas es muy común en las industrias, pero la mayoría soluciona el problema con un programa de mantenimiento el cual incluye: limpieza de líneas y caldera, así como adición de inhibidores y suavizantes (algunos nombres comerciales de estos productos son suargo, neutroquim y oxiplus entre otros).

## 6.9 BOMBAS

Las bombas para las industrias de procesos químicos difieren de las utilizadas en otras industrias, principalmente en los materiales de que están hechas.

Cada uno de los materiales se ha incorporado en las bombas por una sola razón: eliminar o reducir los efectos destructores de los productos químicos en las piezas de la bomba. Dado que el tipo de líquido corrosivo determinará que material será el adecuado, primero se debe hacer un cuidadoso estudio de las características del producto químico que se va a manejar.

Lo más importante al estudiar cualquier producto químico es el conocimiento de sus constituyentes, no sólo los mayores, sino también los menores porque en muchos casos los constituyentes menores serán los más importantes, porque pueden alterar radicalmente los regímenes de corrosión y se necesita un análisis detallado de ellos. También se recomienda indicar el porcentaje por peso de cualquier traza, aunque sólo sean partes por millón. Por ejemplo, el hierro al alto silicio puede ser adecuado cuando no hay fluoruros presentes; pero, si el producto tuviera un contenido de unas cuantas ppm de fluoruros, el hierro al alto silicio sufriría daños muy serios.

Se debe considerar la temperatura del medio para evaluar la corrosión existente, esto es muy importante para los materiales de bombas que están sujetos a choques térmicos y a corrosión más intensa, a temperaturas elevadas.

Con demasiada frecuencia no se tiene en cuenta el pH del producto químico, una razón por la cual se puede pasar por alto el pH es que, por lo general, no se sabe si el producto corrosivo es ácido o alcalino. También es importante saber si un producto cambiará de ácido a alcalino durante el proceso, pues puede tener un pronunciado efecto en la selección de materiales; algunos, que pueden ser idóneos para manejar un líquido ácido o alcalino dado, no serán adecuados para los casos en que hay cambios.

El diseño de la bomba es un factor importante cuando el líquido contiene sólidos en suspensión o en solución.

La presencia de aire en un líquido puede ser muy importante, pues es factible que el aire convierta en oxidante a un producto reductor. En estas condiciones, se puede necesitar un material totalmente distinto.

Cuando la bomba se utiliza para transferencia o recirculación, puede haber una posible acumulación de productos de corrosión o contaminantes que reducirán su duración útil.

Puede haber adición intencional o accidental de inhibidores y aceleradores al producto. Los inhibidores le reducirán la corrosividad y los aceleradores la aumentarán.

Según sea el líquido del proceso, el contacto continuo o intermitente puede influir en el tiempo de vida del material. El trabajo intermitente en algunos sistemas puede ser más destructivo que el continuo, si la bomba retiene cierta cantidad de material corrosivo durante el tiempo de paro, se aumenta la corrosión en los puntos de contacto. También influye el que se lave o vacíe la bomba cuando no esté en servicio.

Los materiales para las bombas se dividen en general en metálicos y no metálicos. los metálicos se pueden subdividir en aleaciones ferrosas y no ferrosas con amplia aplicación en los procesos químicos. Los no metálicos se pueden subdividir en cauchos naturales y sintéticos, plásticos, cerámicas y vidrio, carbono y gráfito.

Los no metálicos tienen aplicaciones definidas en el manejo de sustancias muy corrosivas. los plásticos en particular, tienen especial resistencia a la corrosión y se emplean mucho para productos químicos.

La corrosión que se produce en las bombas para productos químicos puede parecer exclusiva al compararla con la que hay en otros equipos de proceso. No obstante las bombas, como cualquier equipo de proceso, experimenta los siguientes tipos de corrosión: uniforme, por celdas de concentración o intersticios, por picaduras, grietas por esfuerzos, intergranular, galvánica, por erosión y por deslave corrosivo.

Los materiales de construcción que más se emplean en las bombas para productos químicos son los aceros inoxidable. De ellos los más usuales son los austeníticos como tipo 304 y 316. En general los aceros inoxidable son más adecuados para atmósferas oxidantes que reductoras. Los ácidos orgánicos y las soluciones de sales entre neutras y alcalinas también se manejan con bombas de acero inoxidable.

Las aleaciones a base de níquel, por su alto costo relativo, sólo se utilizan cuando no resulta adecuada ninguna aleación a base de hierro.

Para máxima resistencia a los productos químicos, las resinas de fluorocarbono como el politetrafluoroetileno (PTFE) y los fluorados de etileno-propileno (FEP) tienen numerosas aplicaciones. Cuando se necesita resistencia química está disponible una serie de plásticos reforzados con fibra de vidrio (FRP); los más comunes son resinas epoxi, poliéster y fenólicas. Los plásticos se emplean cada vez más porque ofrecen la misma resistencia a la corrosión que los metales a un costo más bajo.

## Conclusiones y recomendaciones.

La siguiente información es guía en la selección de materiales para servicios corrosivos. No se puede esperar que un solo material resista la acción de la corrosión de todos los muchos fluidos que se encuentran en la industria moderna. Sin embargo, a través de la experiencia se encontró que ciertos materiales pueden utilizarse satisfactoriamente con ciertas limitaciones.

Las propiedades físicas de un material son afectadas diferentemente por cada medio corrosivo y en algunos casos es necesario sacrificar valores de una propiedad para ganar un máximo valor en otra propiedad. Esto es necesario, sin embargo el usuario debe decidir cual de las propiedades es de mayor importancia para esa aplicación.

De los capítulos anteriormente expuestos, hay factores que siempre deben tomarse en cuenta para afrontar problemas de corrosión:

1. ¿ Qué tipo de corrosión se está presentando ? o en su defecto a partir del diseño. ¿ Qué tipo de corrosión puede ocurrir ?
2. ¿ Qué fundamentos electroquímicos se conocen para afrontar el problema? (recordar que esto es para metales, si se trata de materiales plásticos, dependiendo del tipo se determinará si es posible aplicar capas impermeabilizantes u otra opción). Esto contempla elaborar una lista con el tipo de materiales y las sustancias a manejar en estos, así es posible analizar cuales materiales sufren oxidación y cuales tienden a reducirse.
3. A partir del punto anterior deben incluirse también otros factores como son: pH, temperatura, aireación.
4. Tener conocimiento de las sustancias a manejar y ¿ Qué efectos causan?, debe recordarse que existen sustancias inflamables, reductoras, oxidantes, solventes, extremadamente reactivas, venenosas, contaminantes, etc.

Un ejemplo bastante común es el HCl, uno de los agentes más corrosivos; cuando se utilizan metales o aleaciones no es posible detener la corrosión en un nivel apropiado, (este nivel es en la mayoría de las ocasiones es de 10 a 15 MPY), ya sea su concentración diluida o alta, deben considerarse materiales plásticos, sin embargo si la presión es considerable, estos materiales se descartan y se opta por aleaciones resistentes y caras, aumentando también la tolerancia a la corrosión. Esto es permitir valores mayores de mpy (de 15 a 25 y a veces más).

5. Familiarizarse con materiales de construcción, determinando cuales materiales enriquecen se resistencia si se alean, las aleaciones y sus familias es la forma en que se clasifican, deben conocerse por consiguiente: códigos grados, cédulas, espesores, así como medidas y capacidades estándar de equipos.

6. El conocimiento de los puntos 3, 4 y 5; proporcionan combinaciones de sustancias materiales metálicos; pudiendo formar una **capa pasiva** (que protege y resiste), materiales como el plomo resisten la corrosión al utilizar ácido sulfúrico, ya que forma una capa de sulfato de plomo, las condiciones (ver punto 2) determinarán cuando la capa pasiva se forma.

7. Lo mencionado en los puntos anteriores es obtenido a partir de experiencias con equipo, estableciéndose criterios, esto ayuda a diseñar ánodos de sacrificio mejores, obtener una aleación más resistente, elegir un inhibidor para un mayor rango de operación, hacer modificaciones de equipo favorables etc.

De esta forma se propone un diagrama de flujo para afrontar problemas de corrosión ya sea para diseñar equipo o para aplicarlo en equipo funcionando (ver fig. I).

En muchos casos no será posible encontrar una solución óptima, aunque habrá soluciones adecuadas y alguna de ellas aplicará en un determinado problema.

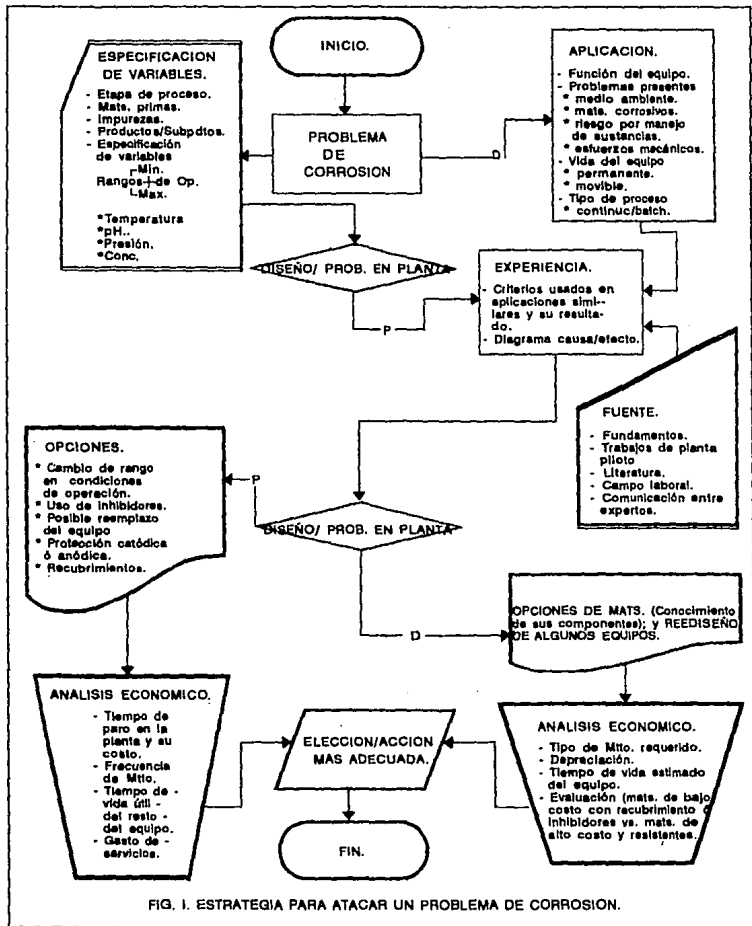
La mayoría de las ocasiones se creó que el equipo funcionará continuamente durante los 20 años que contempla el diseño (este es el tiempo medio más común); pero industrialmente existen muchos procesos batch (o intermitentes), los cuales permiten un mantenimiento frecuente, cada vez que se tenga planeado o cada que se termine un lote. Esto puede permitir el uso de materiales económicos inspeccionados continuamente.

Si las especificaciones de los productos a obtener de un proceso químico lo permiten se puede utilizar inhibidores.

Teniendo un programa de mantenimiento e inhibidores adecuados; un material económico puede competir con aleaciones de alto grado o importadas (en donde debe cotizarse también el transporte o flete).

Los plásticos están en constante innovación abarcando rangos mayores en cuanto a condiciones de proceso, siempre debe actualizarse en este tipo de materiales.

Quando se trata de productos de importación y especialidades químicas con ventas importantes, el precio de estos puede permitir el uso de equipo sofisticado como lo





son los vidriados, de recubrimiento plástico y de ladrillos refractarios, debiendo realizar un análisis económico que proyecte a futuro.

En la industria farmacéutica y de alimentos, el acero inoxidable es común, y utilizando el sistema *selectaloy* (cap. 5), no existirán problemas para la mejor elección.

En México no existe un interés muy marcado en el combate a la corrosión; pero lo que cuesta a nivel real; es la modificación de equipos y líneas de proceso, para de áreas de producción y compras de equipo a corto plazo para intercambiarlo. Además, las restricciones ambientales modernas es un factor a analizarse para la construcción y diseño en las plantas de proceso.

Verificando el ejemplo del apéndice A, se conocerán factores y detalles útiles, mientras se obtiene la adecuada experiencia en el diseño y protección de la corrosión.

De esta forma se cumple el objetivo del trabajo ya que es posible proporcionar una alternativa para controlar la corrosión a partir de los fundamentos de la misma y con el conocimiento de los materiales más conocidos.

## Apéndice A.

### " SELECCION DE MATERIALES EN LA NEUTRALIZACION DE CLORO GASEOSO "

Las actuales plantas de caústicos y cloros se equipan con sistemas eficientes de neutralización para los cloros gaseosos en condiciones anormales para prevenir emisiones; una apropiada selección de materiales es extremadamente importante.

La fig A.1 es un diagrama de flujo simplificado del sistema de neutralización de cloro, muestra equipos mejorados y la lista de los materiales de construcción. El cloro gaseoso seco del ventao es dirigido al lavador o scrubber en tubería de acero al carbón. El cloro gaseoso húmedo es entubado en un diseño apropiado de fibra de vidrio y poliéster bisfenol-fumarato. El hidróxido de sodio ( NaOH ) al 20% es abastecido para la neutralización y se maneja en tanques y tubería de acero al carbón. El scrubber empacado puede construirse de plástico vinil-éster o poliéster reforzado con fibra de vidrio, en Europa se reportan muchos éxitos con plástico reforzado con fibra de vidrio forrado con cloruro de polivinilo ( PRFV y PVC ), el cual proporciona mayor resistencia a las condiciones variables del proceso que el PRFV usado solo.

El depósito del scrubber es construido de acero forrado con hule; las bombas de circulación y los intercambiadores de calor con placas usados para limitar la temperatura en el proceso, son elaborados de titanio.

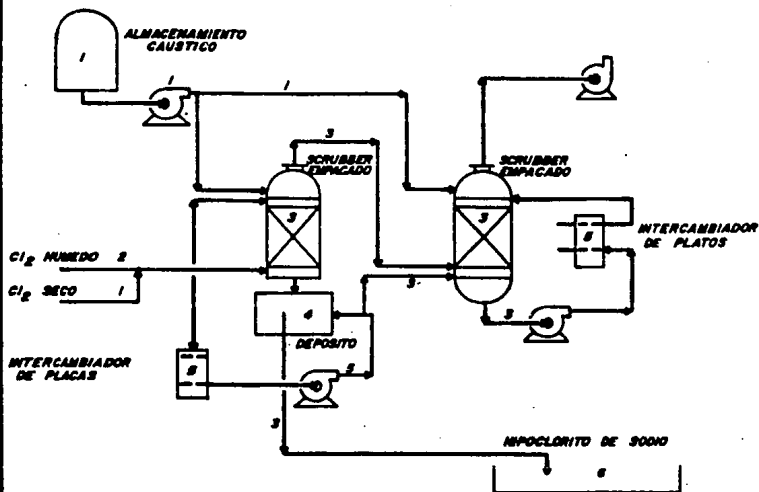
La tubería de recirculación y de servicio de hipoclorito es de acero forrado con polipropileno o de PRFV revestido con PVC, el tanque de efluentes es también del mismo material.

El sistema de neutralización debe ser capaz de absorber emisiones gaseosas de alta o baja presión y se lleva a cabo por el contacto con una solución caústica (NaOH al 20% aproximadamente ) para formar hipoclorito de sodio vía la siguiente reacción, muy rápida y exotérmica:



Muchos sistemas usan torres de lavado en lugar de recipientes de neutralización. Las torres tienen una recirculación caústica absorbe la producción completa de cloro.

Algunos sistemas utilizan intercambiadores de calor para eliminar el calor de reacción y prevenir aumentos de temperatura. Después de neutralizada, la solución de hipoclorito de sodio es transferida a un tanque de descomposición para destruir el hipoclorito y tener un depósito final.



**NOTAS:**

- 1- ACERO AL CARBON
- 2- POLIESTER REFORZADO
- 3- (PRFY) FORRADO CON PVC
- 4- ACERO REVESTIDO CON NMLE
- 5- TITANIO
- 6- ACERO REVESTIDO CON PROPILENO

fuerza: Ref. 44, p.105

FIG. A.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE NEUTRALIZACION DE CLORO, CON MATERIALES TIPIOS DE CORROSION.

La selección de materiales de construcción para la neutralización del cloro requiere conocimientos básicos para el manejo de cloro, hipoclorito e hidróxido de sodio.

El cloro gaseoso húmedo ( definido por  $> 50$  ppm en volumen de agua ) formado es extremadamente corrosivo en muchos materiales de construcción, particularmente metales. El titanio es virtualmente el único metal comercial que lo resiste a diferentes temperaturas de proceso; el hastelloy C-276 tiene una resistencia útil en un rango de la temperatura ambiente a  $140^{\circ}\text{F}$ .

De los materiales de construcción no metálicos, el plástico bisfenol-fumarato poliéster reforzado con fibra de vidrio ( llamado comercialmente atlac 382 ) ofrece una excelente resistencia a precio económico. Considerables experiencias relacionadas al uso de este tipo de plástico en servicios de cloro ha sido recopilada. El funcionamiento óptimo es llevado a cabo por la aplicación de una barrera interior de  $1/8$  ", más gruesa que la cubierta estándar descrita en el boletín NBS-PS15-69 del voluntary product standard en plásticos reforzados. La fig A.2 muestra la cubierta típica y su secuencia de laminado para la construcción de PRFV para el servicio de cloro.

Algunos termoplásticos y materiales elastoméricos, así como los fluorocarburos son atacados por cloro gaseoso húmedo y no son recomendados para su uso.

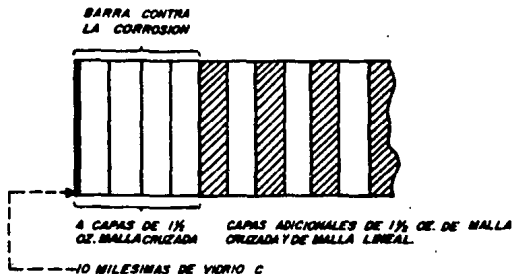
El cloro gaseoso seco (  $< 50$  ppm de agua ) es relativamente no corrosivo y puede ser manejado por muchos materiales de construcción. El acero al carbón es utilizado normalmente a temperaturas de  $250^{\circ}\text{F}$  aproximadamente ( ver fig A.3 ).

Las aleaciones níquel 200 y monel 400 son usados comúnmente para vástagos de válvulas e instrumentación debido a su resistencia a la corrosión extrema.

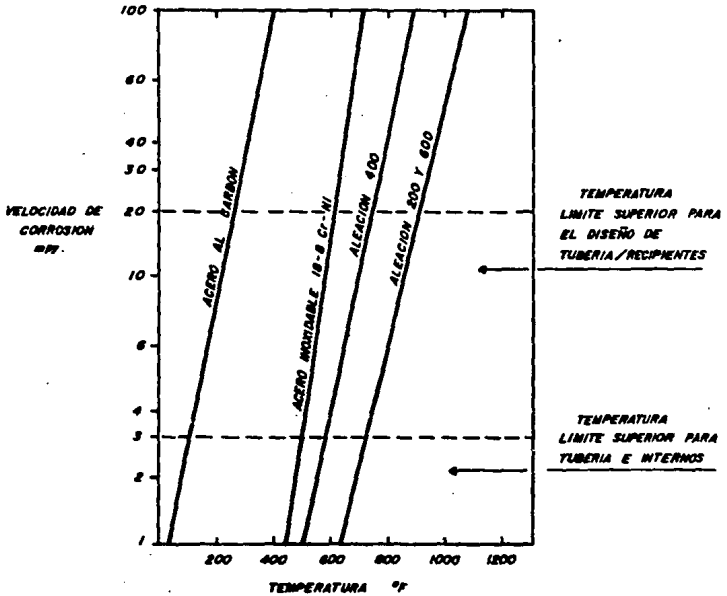
Consideraciones de proceso y económicas dictan el uso de soluciones cáusticas diluidas en los procesos de neutralización.

De los materiales metálicos, el acero al carbón es el más económico para manejar soluciones cáusticas por arriba de una concentración del 50% y a temperaturas de  $190^{\circ}\text{F}$ , las tablas A.1 y A.2 muestran la velocidad de corrosión del acero y otros metales a diferentes concentraciones de cáusticos. Dos factores deben ser considerados antes de usar acero en servicios cáusticos :

1. La posible presencia de ruptura por tensión y corrosión inducida por cáusticos.
2. La tolerancia del sistema por contaminación del hierro



**FIG. A.2 SECUENCIA DE LAMINADO TÍPICO PARA LA TUBERÍA (PRFV) EN SERVICIOS DE CLORO.**



Fuente: Ref. 44, p 106

FIG. A.3 SELECCION DE ALEACIONES PARA CLORO

**TABLA A.1 VELOCIDAD DE CORROSION EN METALES  
CON CONCENTRACIONES DE NaOH DEL 5 AL 14 %.**

<u>METAL</u>	<u>VELOCIDAD DE CORROSION &lt; MPY &gt;</u>		
	<u>5-10% (1)</u>	<u>10% (2)</u>	<u>14% (3)</u>
TITANIO	0.04	NULO	-
ZIRCONIO	0.24	0.07	-
NIQUEL	0.20	0.003	0.02
MONEL	0.30	NULO	0.05
INCONEL	0.05	NULO	0.03
ACERO MEDIO	4.00 (*)	0.60 (**)	8.20
HIERRO FUNDIDO	-	-	8.20
NIQUEL RESISTENTE ( TIPO 1 )	-	-	2.90

NOTAS .- DURACION DE LA PRUEBA 124 DIAS, TEMPERATURA 70 F

(2) PRUEBA CON NaCl al 15% ADICIONAL, DURACION DE LA PRUEBA 207 DIAS,  
TEMPERATURA 100 F.

(3) EXPOSICION CON DURACION DE 90 DIAS, TEMPERATURA 190 F, EN  
EVAPORADORES DE EFECTO MULTIPLE.

\* ATAQUE POR PICADO LIGERO

\*\* ATAQUE LIGERO ( PRUEBA DE AGRIETAMIENTO ).

**TABLA A.2 VELOCIDAD DE CORROSION EN METALES  
CON CONCENTRACIONES DE NaOH DEL 30 AL 50 %.**

<u>METAL</u>	<u>VELOCIDAD DE CORROSION ( MPY )</u>
NIQUEL	0.1
MONEL	0.2
COBRE-NIQUEL-ZINC	0.5
COBRE	2.3
ACERO MEDIO	3.7
HIERRO FUNDIDO	7.0
ACERO CON 14 % CROMO	33.0

NOTA .- EXPOSICION DE SODA CAUSTICA DEL 30 AL 50 X EN UN  
EVAPORADOR DE SIMPLE EFECTO , DURACION DE LA PRUEBA  
16 DIAS , TEMPERATURA PROMEDIO DE 179 F .

**TABLA A.3 VELOCIDAD DE CORROSION DE METALES  
EN SOLUCIONES DE HIPOCLORITO DE SODIO AL 16 %.**

<u>MATERIAL</u>	<u>VELOCIDAD DE CORROSION ( MPY )</u>	<u>PICADO</u>
TITANIO	< 0.1	NINGUNO
ZIRCONIO	< 0.1	NINGUNO
HASTELLOY C	0.1	NINGUNO
CLORIMET 3	0.3	NINGUNO
DURICLOR	0.8	NINGUNO

NOTA .- BASADOS EN EXPOSICIONES REPETIDAS DE MANUFACTURA INTERMITENTE CON  
HIPOCLORITO DE SODIO , INICIO CON NaOH DE 18 A 20% , TEMPERATURA  
70 F . DURACION DE LA PRUEBA 170 DIAS .



La fig. A.4 indica la temperatura y concentración en la cual el acero al carbón puede ser usado con seguridad sin que exista corrosión por rotura de esfuerzos. La curva señala que el acero al carbón puede ser usado a altas concentraciones y temperaturas si áreas altamente esforzadas como las soldadas o dobladas son relevadas de esfuerzos ( el código ASME para calderas y recipientes a presión sección VIII div. 1 especifica en detalle el procedimiento para relevo de esfuerzos ).

No existe interés con respecto a la contaminación con hierro cuando el cloro es neutralizado. Ya que el hipoclorito de sodio formado será destruido al último. No obstante algunos procesos pueden ser diseñados para colectar y usar el hipoclorito de sodio como producto. En estas instancias, la contaminación por hierro es extremadamente importante, ya que el hierro puede catalizar la descomposición del hipoclorito. Para evitar la contaminación, el revestimiento por orgánicos aplicados con spray se usan frecuentemente en el interior del tanque.

Materiales disponibles para revestir incluye los epoxi-fenolicos, poliésteres clorados y polietileno clorosulfonado son especificados para sistemas de tubería de acero inoxidable tipo 304 y aleaciones de níquel.

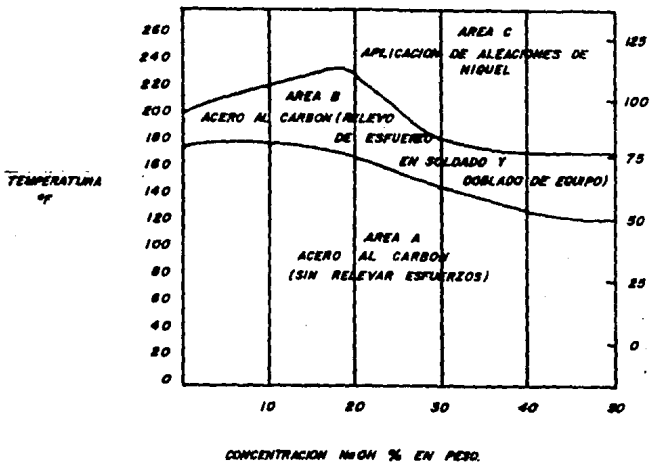
Muchos no metálicos ofrecen excelente resistencia a cáusticos dentro de sus límites normales de temperatura. Los materiales más comunes incluyen PVC, polipropileno epoxy, PRFV, fluorocarbonados como el tetrafluoroetileno ( TFE ), propileno-etileno fluorado ( PEF ) y Kynar, hule natural, neopreno y elastomeros.

Las soluciones del hipoclorito de sodio son extremadamente agresivas, particularmente a altas temperaturas, cuando estas se convierten en inestables, la tabla A.3 y A.4 muestran la velocidad de corrosión de varios metales en soluciones de hipoclorito de sodio a 70 °F y en un rango de 150-200 °F.

A altas temperaturas el titanio es el único metal para construcción con una resistencia útil; esto debe ser analizado, no obstante que el titanio es atacado por cloro gaseoso seco, por eso la utilidad de este material en un sistema de neutralización de cloro es limitado.

El fuego ha sido provocado en las torres de neutralización de titanio, como resultado de la reacción violenta entre el titanio y el cloro seco ( el gas seco puede estar presente en los ramales de entrada y por evaporación puede causar grietas ). No obstante el titanio es usado exitosamente en aplicaciones donde el mojado completo del cloro es asegurado.

Muchos no metálicos tienen excelente resistencia al hipoclorito de sodio estable. El poliéster, vinil-éster reforzado con fibra de vidrio, clorobutil, los hules etileno-propileno, PVC y polipropileno son los más notables y económicos; desafortunadamente el



fuente : Ref. 44, p 107

FIG. A.4 CARTA DE SERVICIO PARA LA SOSA CAUSTICA

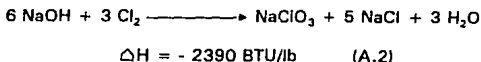
TABLA A.4 CORROSION DE METALES EN SOLUCIONES DE HIPOCLORITO DE SODIO DEL 1 AL 4 % .

<u>MATERIAL</u>	<u>VELOCIDAD DE CORROSION ( MPY )</u>	<u>EFECTADO</u>
TITANIO	0.1	NINGUNO
ZIRCONIO	4.0	SEVERO
HASTELLOY C	46.0	SEVERO
ACERO INOX. 316	> 100 (CONSUMIDO)	-
DURIRON	12.0	SEVERO
DURICLOR	7.0	SEVERO
ACERO MEDIO	> 200 (CONSUMIDO)	-

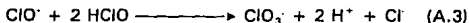
NOTA .- AMBIENTE CONTENIDO NaClO DE 1.5 A 4% , NaCl DE 12 A 15% ,  
NaOH 1% , TEMPERATURA DE 150 A 200 F .  
DURACION DE LA PRUEBA 72 DIAS.

Fuente : Ref. 44, p. 107

hipoclorito de sodio estable no siempre está presente en las torres de neutralización de cloro. La siguiente reacción, altamente exotérmica ocurrirá si el exceso de cáustico no es mantenido durante la neutralización :



La reacción incluye la descomposición del hipoclorito de sodio vía :



La reacción (A.3) hará una rápida deterioración de muchos materiales no metálicos para construcción incluyendo los mencionados previamente; la tremenda cantidad de calor emitida durante esta reacción provocará goteos y localizará fallas en las paredes del recipiente. Los plásticos termofijos sufren un deterioro general y fallas por rotura; los termoplásticos también, especialmente cuando son usados como forros, solo el TFE, PEF y PFA ( Perfluoroalcoxy ) fluoropolímero, han demostrado resistencia completa en sistemas que manejan hipocloritos.

La descomposición térmica del hipoclorito de sodio debe ser considerada en la selección de materiales no metálicos cuando la temperatura exceda los 140 °F, el cloro liberado continua debido a una baja de pH y a las reacciones A.1 y A.2 .

Antes de desecharla, la solución de hipoclorito de sodio debe ser destruida por cumplimiento ambiental. Un método común es vía la siguiente reacción catalítica :



La reacción (A.4) es llevado a cabo en presencia de catalizadores de níquel e hierro, la velocidad de descomposición puede duplicarse por incrementos de 10 °F. Varios no metálicos son disponibles para manejar la descomposición con catalizador del hipoclorito, proporcionando que la temperatura se encuentre en límites normales de trabajo aquí se incluyen: PVC, cloruro de polivinylideno ( saran ) polipropileno, y hules sintéticos. Tanques de concreto se pueden usar, pero su deterioro es enorme.

## Apéndice B.

### TABLAS DE SELECCION DE MATERIALES

Las partes internas en movimiento, en contacto con los fluidos, deben ser de materiales marcados con la letra **A**.

Para partes de cuerpos de equipos a exposición de fluidos corrosivos, se pueden usar los materiales marcados con la letra **B**, ya que en estos la relación de corrosión no presenta un peligro rápido.

Esta información se basa en muchas experiencias. Esta intenta que las personas que la usen tengan elementos técnicos, así como sus datos de operación y riesgo. Sin embargo, adicionalmente se recomienda la elaboración de un examen completo con las condiciones de operación hasta obtener no sólo un material adecuado para el servicio, sino que se obtengan otras alternativas.

#### "NOMENCLATURA"

**A** = EXCELENTE

**B** = BUENO

**C** = RECOMENDABLE ,PROBABLEMENTE NO ADECUADO

**D** = NO RECOMENDABLE

#### NOTAS:

1. El espacio en blanco indica carencia de información.
2. Todos los fluidos se encuentran a temperatura ambiente excepto en los casos en que se señale algo diferente.

TFE = TETRAFLUROETILENO.

fuelle : Ref. "Handbook of Corrosion Resistant Piping"  
Kenneth Lish, Nuclear Engineer. Burns and Roe, Inc.

FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENTOS				
	FORJADO	ALUMINIO	ACERO	VIDRIO	BRONCE	ALUMINIO	ACERO	BRONCE	ALUMINIO	ACERO	BRONCE	NEOPRENO	BITUMEN	CAUCHO	ASBESTO
ACETALDEHIDO	C	B	C	D	C	A	A	A	A	A	D	D	B	C	A
ACETATO ( SOLVENTES )	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	D	D	D	D	A
ACIDO ACETICO ( AEREO )	B	B	D	D	D	A	A	A	A	A	C	C	D	D	A
ACIDO ACETICO (LIBRE DE AIRE)	D	B	D	B	D	A	A	A	A	A	C	C	D	D	A
ACIDO ACETICO ( CRUDO )	C	B	C	C	C	B	A	A	A	A	D	D	D	D	A
ACIDO ACETICO ( PURO )	C	B	C	C	C	B	A	A	A	A	D	D	D	D	A
ACIDO ACETICO ( 10 % )	C	B	C	C	C	B	A	A	A	A	D	D	D	D	A
ACIDO ACETICO ( 80 % )	C	B	C	C	C	B	A	A	A	A	D	D	D	D	A
ANHIDRIDO ACETICO	D	B	D	C	D	B	B	B	A	C	C	D	D	D	A
ACETONA	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	C	A	D	A	A
ACETILENO ( SECO )	A	A	A	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ACRILONITRILLO	C	B	C	A	A	A	A	A	A	D	D	D	C	A	A
AIRE	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ALCOHOLES (METILICO Y ETILICO)	B	A	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ALCOHOL ANILICO	B	A	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ALCOHOL METILICO	B	A	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ALUMINIO CLORURO... ( SECO )	B	B	B	B	B	C	A	A	A	B	B	A	A	A	A
ALUMINIO SULFATO.....	C	B	C	C	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ALUMINA	C	B	C	C	C	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
ANIMAS	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	D	A	D	A	A
ANONIO ANHIDRIDO.....	B	B	B	D	A	A	A	A	B	B	B	C	A	A	A
ANONIO ( ACUOSO )	A	B	A	D	A	A	A	A	B	B	B	A	A	A	A

FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENTOS			
	L. CARBONATO K. CARBONATO	SILICIO P. P. S. S. S.	D. S. S. S.	B. S. S. S.	C. S. S. S.	I. S. S. S.	N. S. S. S.	A. S. S. S.	R. S. S. S.	S. S. S. S.	N. S. S. S.	N. S. S. S.	E. S. S. S.	T. S. S. S.
AMONIO ( SOLUCIONES )	B	D	B	D	B	A	A	A	B	B	B			A
AMONIO BICARBONATO.....	B	B	B	B	C	B	B	B	B	B	A	A	A	A
AMONIO CARBONATO.....	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	B	A
AMONIO CLORURO.....	D	C	D	D	D	C	C	C	B	B	A	A	A	A
AMONIO HIDROXIDO..... ( 2BX )	C	C	C	D	C	B	B	B	D	B	A		A	A
AMONIO HIDROXIDO..... (CONC.)	C	C	C	D	C	B	B	B	D	C	A	A	A	A
AMONIO MONOFOSFATO.....	D	B	D	D	D	B	B	B	C	A	A	B	A	A
AMONIO NITRATO.....	D	B	D	D	D	A	A	A	D	A	A	A	A	A
AMONIO FOSFATO.....(DIBASICO)	D	B	D	C	D	B	B	B	C	A	A	A	A	A
AMONIO FOSFATO.....(TRIBASICO)	D	B	D	C	D	B	B	B	C	A	A	A	A	A
AMONIO SULFATO.....	C	B	C	B	C	B	B	B	C	A	A	A	A	A
ANIL ACETATO.....	C	B	C	B	C	B	B	B	B	D	D	B	D	A
ANILINA	C	C	C	C	C	B	B	B	B	D	C	A	C	A
ANILINA TIEME	C	C	C	C	C	A	A	A	A	C	B	A	B	A
ANTIMONIO TRICLORURO.....	D	D	D	D	D	D	D	C	D	C	C	A	A	A
ARSENICO ACIDO.....	D	D	D	D	D	B	B	B	D	A	A	A	A	A
ASPALTO EMULSION.....	A	C	A	A	A	A	A	A	A	B	B	A	A	A
ASPALTO LIQUIDO.....	A	C	A	A	A	A	A	A	A	C	C	A	A	A
BARIO CARBONATO.....	B	B	B	B	B	B	B	A	B	A	A	A	A	A
BARIO CLORURO.....	C	D	C	B	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A
BARIO HIDROXIDO.....	B	D	B	B	C	B	B	A	B	A	A	A	A	A
BARIO SULFATO.....	C	D	C	C	C	B	B	B	A	A	A	A	A	A





FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENOS			
	ALUMINIO 3003 5052	ALUMINIO 5056	ALUMINIO 5083	ALUMINIO 5085	ALUMINIO 5086	ALUMINIO 5089	ALUMINIO 5090	ALUMINIO 5095	ALUMINIO 5105	ALUMINIO 5110	ALUMINIO 5115	ALUMINIO 5120	ALUMINIO 5130	ALUMINIO 5140
CARBONO TETRAFLUORURO... (HUMEDO)	D	C	D	D	D	B	B	B	B	D	D	A	B	A
CARBONATA AGUA.....	B	A	B	D	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
CLORINADOS SOLVENTES... (SECO)	C	D	C	C	C	B	B	B	B	D	D	A	C	A
CLORO GAS..... (SECO)	B	B	B	C	B	B	B	A	A	C	C	A	B	A
CLORO (NUMERO)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	B	D	D		A
CLORACETICO ACIDO.....	D	C	D	C	D	C	C	C	C	B	D	C		A
CLOROBENCENO (SECO)	B	B	B	B	B	A	A	A	A	D	D	A	A	A
CLOROFORMO (SECO)	B	D	B	B	B	A	A	A	A	D	D	A	B	A
CLOROSULFONICO ACIDO... (SECO)	B	B	B	B	B	B	B	A	A	D	D			A
CLOROSULFONICO ACIDO... (HUM.)	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	D	D		A
CRONO ALUMINA.....	B	C	B	C	B	A	A	A	B	B	B			A
CRONICO ACIDO.....	D	C	D	D	D	C	C	C	B	D	D	D	C	A
CAFE EXTRACTO... (CALIENTE)	C	A	C	B	C	A	A	A	A					A
COBRE GAS.....	B	A	B	C	B	A	A	A	B	B	C		B	A
COBRE ACETATO.....	D	C	D	D	D	A	A	A	C					A
COBRE CLORURO.....	D	C	D	D	D	C	C	C	C	A	A	A	A	A
COBRE NITRATO.....	D	C	D	D	D	B	B	A	C	A	A	A	A	A
COBRE SULFATO.....	D	C	D	D	D	B	B	A	B	A	A	A	A	A
CRISILICO ACIDO.....	D	C	D	C	C	B	B	B	B	D	D	D	B	A
CICLOHEXANO	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	D	A	A	A
DIACETONA ALCOHOL.....	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	C			A
DIESEL COMBUSTIBLE	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A

FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENTOS			
	CONCRETO FORJADO	ALUMINIO Puro	DUCTIL OPORTO	RODIL Puro	ALACRICO ALACRICO M	INDOXIDABLE ALACRICO	INDOXIDABLE ALACRICO	ALUMINIO 2024	INOXIDABLE ALACRICO	BRONCE H	NYLON 66	NYLON 66	NYLON 66	NYLON 66
DIETILANINA	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	C			A
ETANO	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A
ETERES	B	A	B	B	A	A	A	A	B	C	C	C	C	
ETILO ACETATO.....	C	A	C	C	B	B	B	A	A	D	D	A	D	A
ETILO ACRILATO.....	C	C	C	B	C	A	A	A	B				D	A
ETILO CLORURO.....(SECO)	B	B	B	B	B	A	A	A	B	C	C	A		A
ETILO CLORURO.....(HUMEDO)	D	D	D	C	D	B	B	A	B	C	C			A
ETILENGLICOL	B	A	B	B	B	B	B	A	B	A	A	C	A	A
ETILENO OXIDO.....	C	A	B	D	B	B	B	B	B	D	D	A	D	A
FERRICO CLORURO.....	D	D	D	D	D	D	D	C	C	A	A	A	A	A
FERRICO NITRATO.....	D	D	D	D	D	C	C	C	C	A	A	A	A	A
FERRICO SULFATO.....	D	D	D	D	D	B	B	A	C	A	A	A	A	A
FERROSO CLORURO.....	D	D	D	B	D	D	D	D	C	A	A	A	A	A
FERROSO SULFATO.....	D	D	D	B	D	B	B	A	B	A	A	A	A	A
FERROSO SULFATO.....(SAT.)	C	C	C	C	C	A	A	A	A	C	C			A
FERTILIZANTES SOLUCIONES....	C	B	C	C	B	B	B	B	B	B	B			A
FLUOR (SECO)	D	D	D	D	D	D	D	C	B					C
FLUORSILICO ACIDO.....	D	D	D	A	D	B	B	A	A	C				A
FORMALDEHIDO (FRIO)	B	A	B	A	A	A	A	A	A	B	B	A		A
FORMALDEHIDO (CALIENTE)	D	B	D	B	D	C	C	C	B	B	B	A		A
FORMICO ACIDO.....(FRIO)	D	D	D	B	D	C	B	B	B	D	A	D		A
FORMICO ACIDO.....(CALIENTE)	D	D	D	B	D	C	B	B	B	D		D		A

FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENTOS				
	FORJADO HIERRO	ALUMINIO	DUCTIL HIERRO	NO DUCTIL HIERRO	ACERO	ACERO AL CARBONO	INOXIDABLE ACERO	INOXIDABLE ACERO	INOXIDABLE ACERO	INOXIDABLE ACERO	NIQUEL	NIQUEL BRUNO	NIQUEL BLANCO	NIQUEL BLANCO	NIQUEL BLANCO
FREON (SECO)	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	C	C		C	A
FURFURAL	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	D	C	A	D	A
GALICO ACIDO.....	D	A	D	C	D	B	B	B	B	B	A	A	A		A
GAS MANUFACTURADO	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
GAS NATURAL	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
GAS ODOORIZADO	B	A	B	A	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A
GASOLINA (PESADA)	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	C	D	A	A	A
GASOLINA (SOBREPESADA)	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	C	D	A	A	A
GASOLINA (AVIACION)	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	C	D	A	A	A
GASOLINA (MOTOR)	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	C	D	A	A	A
GASOLINA (ACIDA)	B	A	B	B	B	A	A	A	A	A	C	D	A	A	A
GLUCOSA	B	A	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
GLICERINA O GLICEROL	B	A	B	B	B	A	A	A	A	B	A	A	C	A	A
GLICOLIS	B	A	B	B	B	B	B	B	A	B		A	C	A	A
GMSA	A	A	A	B	A	A	A	A	A	B	A	B		A	A
HEPTANO	B	A	B	A	B	A	A	B	B	B	A	B	A	A	A
HEXANO	B	A	B	B	B	B	B	B	B	B	A	C	A	A	A
HEXANOL	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A					A
HIDROBROMICO ACIDO.....	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C			A
HIDROCLORICO ACIDO.....	D	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	C	D		A
HIDROCIANICO ACIDO.....	C	A	C	D	C	A	A	A	A	C		B	D		A
HIDROGENO GAS (FRIO)	D	D	D	D	D	D	D	D	C	B		C	D		A



FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENIENTOS				
	FORJADO	ALUMINIO	HIERRO	BRONCE	ACERO	CAJON	INCOX	INCOX DOBLE	ALUMINIO	HONDA	BUNA	ACETILENO	NYLON	ELASTOMERO	TELU
MAGNESIO HIDROXIDO...(CALTE)	B	D	B	D	B	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
MAGNESIO SULFATO.....	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
MALICO ACIDO.....	D	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A
MALICO ACIDO.....	D	B	D	B	D	B	B	A	B	A	A	A	A	A	A
MERCURIO CLORURO.....	D	D	D	D	D	D	C	C	B	A	A			A	A
MERCURIO CIANURO.....	D	D	D	D	D	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A
MERCURIO	A	C	A	D	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A
NETAMO	B	A	B	A	B	D	B	B	B	A	B	A	A	A	A
NETIL ACETATO	B	A	B	A	B	A	A	A	A	D	D		D	A	A
NETIL ACETONA	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	D		D	A	A
NETILANINA	B	A	B	D	B	A	A	A	C						A
NETIL CELOSOLVE	B	A	B	A	B	A	A	A	B						A
NETIL CLORURO.....(SECO)	B	D	B	A	B	B	A	A	B	C	C	A			A
NETIL ETIL CETONA	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	D	A	D	A	A
NETIL FORMATO	C	C	C	A	C	B	B	B	B	D	B				A
NETILENO CLORURO.....(SECO)	B	A	B	A	B	A	A	A	B	D	D		C	A	A
NINA AGUA DE.....(ACIDA)	D	D	D	C	D	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
MINERAL ACEITE.....	B	A	B	B	B	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A
MISCLA DE ACIDOS (FRIO)	C	D	C	D	C	B	A	A	B			D			A
MURIATICO ACIDO.....	D	D	D	D	D	D	D	D	B	B	B	D	A	A	A
NAFTA	B	A	B	B	B	B	B	B	B	A	C	A	A	A	A
NAFTALENO	B	B	B	B	A	B	B	B	B	C	D	A	A	A	A

FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENTOS			
	ACERO	ALUMINIO	BRONCE	BRONCE	ACERO	ALUMINIO	BRONCE	ACERO	ALUMINIO	BRONCE	NEOPRENO	NYLON	ETANOL	TEFLON
	ALUMINIO	ALUMINIO	BRONCE	BRONCE	ACERO	ALUMINIO	BRONCE	ACERO	ALUMINIO	BRONCE	NEOPRENO	NYLON	ETANOL	TEFLON
NIQUEL CLORATO.....	D	D	D	D	D	B	B	B	B	A	A	A	A	A
NIQUEL NITRATO.....	D	C	D	D	D	B	B	B	B	A	A	A	A	A
NIQUEL SULFATO.....	D	D	D	D	D	B	B	B	B	A	A	A	A	A
NICOTINICO ACIDO.....	B	A	B	A	B	A	A	A	A					A
NITRICO ACIDO.....(10%)	D	D	D	D	D	A	A	A	D	C	B	D	A	A
NITRICO ACIDO.....(20%)	D	D	D	D	D	A	A	A	D	C	C	D	A	A
NITRICO ACIDO.....(80%)	D	B	D	D	D	A	A	A	D	D	D	D	B	A
NITRICO ACIDO.....(100%)	A	B	A	D	A	A	A	A	D	D	D	D	B	A
NITRICO ACIDO AMEIDRO....	A	B	A	D	A	A	A	A	D		D			A
NITROBENCENO	B	C	B	D	B	B	B	A	B	D	D		C	A
NITROGENO	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
NITROSO ACIDO.....(10%)	D	D	D	D	D	B	B	B	D	C	A		A	A
NITROSOS GASES.....	C	B	C	D	B	A	A	A	D					A
NITROSO OXIDO.....	C	C	C	D	B	B	B	B	D	B	B	A		A
OLEICO ACIDO.....	B	A	B	B	B	A	A	A	B	A	C	A	A	A
OLEUM	D	B	D	D	B	B	B	B	D	C	C	D	C	A
OXIGENO	B	A	B	A	B	A	A	A	A	C	C		B	A
OSONO (HUMEDO)	C	B	C	B	C	A	A	A	A					A
OSONO (SECO)	A	A	A	A	A	A	A	A	A					A
PINTURAS Y SOLVENTES	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	D			A
PALMITICO ACIDO.....	C	B	C	B	C	B	B	B	B	B	B	A	A	A
PARAFINA	B	A	B	A	B	A	A	A	A	A	B	A	A	A

FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENTOS			
	FLUORURO DE BROMURO	ALUMINIO	CLORO	FLUORURO DE SODIO	CLORURO DE SODIO	CLORURO DE POTASIO	CLORURO DE POTASIO	CLORURO DE POTASIO	CLORURO DE POTASIO	CLORURO DE POTASIO	CLORURO DE POTASIO	CLORURO DE POTASIO	CLORURO DE POTASIO	CLORURO DE POTASIO
PARAFORMALDEHIDO	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A
FENIANO	B	A	B	A	B	A	A	B	B	A	B	A	A	A
PERCLORURETILENO (SECO)	B	A	B	C	B	A	A	A	B	D	D		A	A
PICRICO ACIDO.....	C	B	C	B	C	B	B	B	A	C	A		A	A
POTASIO BISULFATO.....	D	C	D	C	D	B	B	B	D	A	A	A	A	A
POTASIO BROMATO.....	D	C	D	C	D	A	A	A	B	A	A	A	A	A
POTASIO CARBONATO.....	B	C	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A
POTASIO CLORATO.....	B	C	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A
POTASIO CLORURO.....	B	B	B	B	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A
POTASIO CIANURO.....	B	D	B	D	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A
POTASIO DICROMATO.....	B	A	B	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A
POTASIO DIFOSFATO.....	A	B	A	B	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
POTASIO FERRICIANURO....	B	B	B	C	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A
POTASIO FERROCIANURO....	B	A	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A
POTASIO HIDROX. (DIL. FRIO)	A	D	A	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
POTASIO HIDROX. (DIL. CAL.)	B	D	B	D	B	A	A	A	A	B	B		A	A
POTASIO HIDROX. (<70% FRIO)	B	D	B	D	A	A	A	A	A	B	A		A	A
POTASIO HIDROX. (<70% CAL.)	B	D	B	D	A	A	A	A	A	C	B		A	A
POTASIO IODATO.....	C	C	C	B	C	A	A	A	B	A	A	A	A	A
POTASIO NITRATO.....	B	A	B	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A
POTASIO PERMANGANATO	B	A	B	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A
POTASIO SULFATO.....	C	A	C	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A







FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENTOS				
	ALUMINUM OXIDADO	ALUMINUM Puro	ALUMINUM REACTIVO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO	ALUMINUM REACTIVO CANTONADO CANTONADO
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
SULFURO DIOXIDO....(SECO)	B	A	B	B	B	A	A	A	A	C	C	A	A	A	
SULFURO TRIOXIDO....(SECO)	B	A	B	B	B	A	A	A	A	C	D	A	A	A	
SULFURICO ACIDO....(8-7%)	D	B	D	C	D	C	B	A	A	B	A	C	A	A	
SULFURICO ACIDO....(20%)	D	D	D	C	D	D	D	C	B	C	B	C	A	A	
SULFURICO ACIDO....(50%)	D	D	D	B	D	D	D	C	B	C	C	D	A	A	
SULFURICO ACIDO....(100%)	B	D	B	A	B	A	A	A	A	D	D	D	B	A	
SULFUROSO ACIDO.....	D	C	D	C	D	B	B	B	D	C	C	C	A	A	
TARTARICO ACIDO.....	D	B	D	A	D	B	B	B	B	C	A	A	A	A	
TETRAETIL (PESADO)	C	B	C	B	C	B	B	B	A			A	A	A	
TOLUENO	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	D	A	B	A	
TRIBUTIL FOSFATO	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C			A	
TRICLOROETILENO	C	A	C	B	B	B	B	B	A	D	D	A	B	A	
UREA	C	B	C	B	C	B	B	A	A			A		A	
VINAGRE	D	C	D	B	D	A	A	A	A	D	D		D	A	
(WATER) AGUA DESTILADA	D	A	D	A	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
(WATER) AGUA FRESCA	C	A	C	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
(WATER) AGUA DE MAR	D	B	D	B	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
XILENO (SECO)	A	A	A	A	A	A	A	A	A	D	D	A	B	A	
ZINC CLORURO.....	C	D	C	D	D	D	D	B	B	B	A	A	A	A	
ZINC HIDROSULFURO.....	B	D	B	C	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	
ZINC SULFATO.....	D	D	D	B	D	B	B	B	B	A	A	A	A	A	

FLUIDO	MATERIALES DE CONSTRUCCION										MATERIALES DE SELLOS Y ASIENTOS				
	CONCRETO ARMADO	ALUMINIO CORUJ EUA	HIERRO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA	ACERO CORUJ EUA
PARAFORMALDEHIDO	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A		A	
PENTANO	B	A	B	A	B	A	A	B	B	A	B	A	A	A	
PERCLOROMETILENO (SECO)	B	A	B	C	B	A	A	A	B	D	D		A	A	
PICRICO ACIDO.....	C	B	C	B	C	B	B	B	A	C	A			A	
POTASIO BISULFATO.....	D	C	D	C	D	B	B	B	D	A	A	A	A	A	
POTASIO BROMATO.....	D	C	D	C	D	A	A	A	B	A	A	A	A	A	
POTASIO CARBONATO.....	B	C	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	
POTASIO CLORATO.....	B	C	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	
POTASIO CLORURO.....	B	B	B	B	C	C	C	C	B	A	A	A	A	A	
POTASIO CIANURO.....	B	D	B	D	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	
POTASIO DICROMATO.....	B	A	B	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A	
POTASIO DIFOSFATO.....	A	B	A	B	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	
POTASIO FERRICIAMURO....	B	B	B	C	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A	
POTASIO FERROCIAMURO....	B	A	B	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	
POTASIO HIPOX. (DIL. FRIO)	A	D	A	D	A	A	A	A	A	A	A			A	
POTASIO HIPOX. (DIL. CAL.)	B	D	B	D	B	A	A	A	A	B	B			A	
POTASIO HIPOX. ((70% FRIO)	B	D	B	D	A	A	A	A	A	B	A			A	
POTASIO HIPOX. ((70% CAL.)	B	D	B	D	A	A	A	A	A	C	B			A	
POTASIO IODATO.....	C	C	C	B	C	A	A	A	B	A	A	A	A	A	
POTASIO NITRATO.....	B	A	B	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A	
POTASIO PERMANGANATO	B	A	B	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A	
POTASIO SULFATO.....	C	A	C	B	B	A	A	A	B	A	A	A	A	A	

## Apéndice C.

### COSTO RELATIVO DE LAS PLACAS DE LOS DISTINTO METALES Y ALEACIONES COMPARANDO AREAS IGUALES

ALEACION	BASE	COMPOSICION APROX. (%)	COSTO RELATIVO
C-276	Ni	59 Ni-16 Cr-16 Mo	7.3
625	Ni	61 Ni-21 Cr-9 Mo	5.5
Zirconio R607202	Zr	99.2 min. (Zr+Hf); 4.5max Hf	5.0
Titanio-Grado 7	Ti	99 Ti-0.2 Pd	4.5
Niquel 700	Ni	99 Ni max.	3.5
600	Ni	72 Ni-15 Cr-8 Fe	3.3
Titanio-Grado 12	Ti	98 Ti-0.3 Mo-0.8 Ni	3.0
*Ferrítico 29-4-2	Fe	64 Fe-29 cr-4 Mo-2 Ni	2.8
400	Ni	65 Ni-32 Cu	2.5
20Cb-3	Fe	34 fe-20 Cr-33 Ni-2.2 Mo	2.5
Titanio-Grado 2	Ti	99 Ti	2.5
*Ferrítico 26-1	Fe	71 Fe-26 Cr-1 Mo	1.9
*904-L	Fe	47 Fe-20 Cr-25 Ni-4.5 Mo	1.8
*Duplex 255	Fe	62 Fe-25 Cr-5.5 Ni-3 Mo-.2N	1.7
*317L	Fe	63 Fe-19 Cr-12 Ni-3.2 Mo	1.3
*316L	Fe	67 Fe-17 Cr-11 Ni-2.2 Mo	1.0

\* = Acero inoxidable

Fuente: Referencia (52).

## Referencias Bibliográficas:

1. Arnold, C. G. "Using real time corrosion monitors in chemical plants", *Chem. Eng. Prog.*, 75(3), 43, (1978).
2. Avner S. H. Introducción a la metalurgia física, 2a edición, Mc. Graw Hill, México 1988.
3. Bard A. J; Faulkner L. R, *Electrochemical methods fundamentals and applications*, John Wiley and sons, New York 1980.
4. Bartos M; Macak J; Vesta J, "Organic compounds for metals evaluation for corrosion", *Sb. Vys. Chem-Technol Praze, D Technol Paliv*, D58, 139, Czechoslovakia 1990.
5. Bauman T. C; Querstreet L. T, "Corrosion and piping materials in CPI", *Chem. Eng.*, 75(9), 59, (1978).
6. Borshchevskii A. M; Sukhotin A. M; Esina L. I, "Inhibition of steel corrosion in cooling brines", *Zashch. Met.*, 26(4), 661, USSR 1990.
7. Bracho H. M; Mendez G. A. E, "Estudio técnico comparativo de los materiales de construcción para torres de enfriamiento de proceso", Lic. I. Q., UNAM, Fac. Química, México D.F. 1989.
8. Bremhorst K; Flint P. J, "The effect of flow patterns on the erosion-corrosion of shell and tube heat exchangers", *Wear*, 143(1), 123, Australia 1991.
9. Cangi. J. W, "Characteristics & corrosion properties of cast alloys", *Chem. Eng. Prog.*, 75(3), 61, (1978).
10. Cimicka H; Pelikan J; Hluchan V, "Corrosion of steam turbine blades", *Sb. Vys. Chem-Technol Praze, D Technol Paliv*, D58, 21, Czechoslovakia 1990.
11. Collins J. A, *failure of materials in mechanical design*, John Wiley and sons, New York 1981.

12. Costa J. M, Fundamentos de electródica cinética Electroquímica y sus aplicaciones, Alhambra, España 1981.
13. Couington L. C, Schutz R. W. & Franson I. A, "Titanium alloys for corrosion resistance", *Chem. Eng. Prog.*, 75(3), 67, (1978).
14. Craig D, "Handbook of corrosion data", Ed. by American Society for Metals, USA 1990.
15. Crook P; Asphahani a, "Alloys to protect against corrosion and wear", *Chem. Eng.*, 90(1), 127, (1983).
16. Da Costa S. F. L; Agostinho S. M. L; Rubm J. C, "Spectroelectrochemical study of passive films formed on brass electrodes in 0.5M sulfuric acid solutions containing benzotiazole (BTAA)", *J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem.*, 295(1-2), 203, (1990).
17. D' Alba F; Di Lorenzo S; Lucarine C, "Electrochemical features of instability in iron corrosion", *Mater. Eng.*, 2(2), 277, Italy 1991.
18. Dawson J. D, "Designing high temperature piping", *Chem Eng.*, 76(9), 127, (1979).
19. Ehmann I; Heitz E, "Performance of construction materials in multiphase liquid/solid flows", *Chem. Eng. Technol.* 15(2), 91, U.K. 1992.
20. Evans V. R, *Corrosiones Metálicas*, Reverté, España, 1987.
21. Fernandez Moran D, "Paints, their composition, types of pigments, solvents and additives, priming-thickness sizes and finishes", *Rev. Iberoam. Corros. Prot.*, 21(2) 63, Spain 1990.
22. Fisher W; Mader W, "(CORROS & LABASS) an expert system for the prediction of the corrosion behavior", *Swiss-chem*, 12(6), 31, Swittherland 1990.
23. Fontana M. G, "Corrosion engineering", Third Edition, Mc. Graw

Hill International, (1987).

24. Foxall D. H. & Gilbert P. T, "Selecting tubes for CPI heat exchangers-I", *Chem. Eng*, 83, 6, 99, (1975).

25. Foxall D. H. & Gilbert P. T, "Selecting tubes for CPI heat exchangers-II", *Chem. Eng*, 83(8), 147, (1976).

26. Francis P. E, "Testing of corrosion inhibitors", (*U.K. Natl. Phys. Lab., Div. Mater. Metrol.*), *DMM(A)*65, 31 U. K. 1992.

27. French E. C, "Control corrosion in sour water system", *Hydrocarbon Processing.*, (8), 147, (1976).

28. Gasper K, "Non chromate methods of cooling water treatment", *Chem. Eng. Prog*, 75(3), 52, (1978).

29. Gayk W; Krautz H. R, "Crack formation in welds of ammonia storage tanks made of stE355, preventive measures" *VGB Kraftwerkstech*, 70(2), 151, Germany 1990.

30. Gleason T. G, "How to avoid scrubber corrosion", *Chem. Eng. Prog*, 71(3), 43, (1975).

31. Gleason T. G, "Halt corrosion in particulate scrubbers", *Chem. Eng*, 84(23), 145, (1977).

32. Gleekman L. W, "Trends in CPI materials: Nonferrous metals-I", *Chem. Eng.*, 66(22), 84, (1970).

33. Goldie B. P. F; Othen D. G, "Corrosion control by surface coating; the use of chemical inhibitors", *Spec. Publ.-R. Soc. Chem*, 71 (*Chem. Inhib. Corros. Control*), 21, U.K. 1990.

34. Guyonvarch A; Gras V. M, "Corrosion in natural environments: the behavior of metalized coatings and paints used to protection of unalloyed steels", *Mater. Tech.*, 78(7-8), 33, France 1990.

35. Hadi Noegroho, "Corrosion problems in oil and gas industries and the role of PPPTM6B Lemigas in preventing them", *Lembaran Publ. Lemigas*, 25(1), 10, Indonesia 1991.
36. Harada Yoshio, "Corrosion protection technology for young technicians", *Fushoku Boshoku Bumon Iinkai Shiryo*, 31(2), 43, Japan 1992.
37. Harrell J. B., "Corrosion monitoring in the CPI", *Chem. Eng.*, 75(3), 57, (1978).
38. Henthorne M., "Electrochemical corrosion", *Chem. Eng.*, 78 (14), 102, (1971).
39. Henthorne M., "Polarization, data yield corrosion rates" 78(16), 99, (1971).
40. Henthorne M., "Metals selection for corrosion control" *Chem. Eng.* 79(6), 15, (1972).
41. Henthorne M., "Understanding corrosion", *Chem. Eng.*, 79, (26), 77, (1972).
42. Hermatschweiler P. J., "Anticorrosive inorganic, organic bonded", *Oberflaeche-Surf.*, 33(5), 8, Switzerland 1992.
43. Hine Fumio, "Chemical industry and corrosion prevention", *Fushoku Boshoku Bumon Iinkai Shiryo (Nippon Zairyo Gakkui)*, 30(3), 45, Japan 1991.
44. Horowitz N. C., "Selecting materials for chlorine-gas neutralization", *Chem. Eng.*, 87(10), 105, (1981).
45. Hugson R. V., "High-Nickel alloys for corrosion resistance", *Chem. Eng.*, 83(24), 66, (1976).
46. Iguchi Takayuki, "Durability of organic linings", *Nippon Setchaku Gakkaishi*, 26(4), 158, Japan 1990.



47. International Nickel, "corrosion resistance of the austenitic Chromium-Nickel stainless steel in chemical environments", The international nickel company, (1963).
48. Inomata J; Tsuneta K; Hasui K, "New corrosion prevention spraying system", *Bosci kanri*, 35(2), 69, Japan 1991.
49. Jacob R, "New developments of corrosion protection of pipeline with tapes", *3R int.*, 31(6), 342, Germany 1992.
50. Kalb W, "Titanium alloy coating materials for wear resistance", *Metall*, 43(10), 951, Germany 1989.
51. Kirby G. N, "Corrosion performance of carbon steel" *Chem. Eng*, 86(6), 76, (1979).
52. Kirby G. N, "Selecting alloys for chloride service" (part 1), *Chem. Eng*, 92(3), 81, (1985).
53. Kirby G. N, "Selecting alloys for chloride service" (part 2), *Chem. Eng*, 92(5), 99, (1985).
54. Kishimoto K; Amaya K; Aoki S, "Optimization of cathodic protection by using boundary element method", *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu*, 56(625), 1287, Japan 1990.
55. Kluser P, "anticorrosive organics", *Oberflaeche-Surf.*, 33(5), 13, Switzerland 1992.
56. Krasin U. P; Lyublinskii I. E; Mitin Y. U, "Calculation of the solubility of construction materials in multicomponent metal melts", *Zh. Fiz. Khim.*, 64(5), 1237, USSR 1990.
57. Kuzub V. S, "Anodic Protection of Industrial Equipment (Anticorrosion Protection of Metals)" ( *Anodnaya Zashchita Tekhnologicheskogo Oborudovaniya (Zashchita Metallov ot Korrozii)*), *Metallurgiya*, Moscow 1989.
58. Kuzub V. S; Novitskii V. S; Makarov V. A, "Anodic protection of

- Chem-process equipment", *Khim. Neft. Mashinostr*, (10), 24, USSR 1991.
59. Leclercq Marcel, "Modern metallic zinc-based products for steel protection by coating", *Galvano Organo*, 59 (605), 357, France 1990.
60. Levichev A. N; Kardash N. V, "Amines for iron or steel in acid solutions", *Zashch Met.*, 27(6), 971, USSR 1991.
61. Lyman W. S, "Engineering with copper alloys-I", *Chem. Eng*, 83(6), 99, (1978).
62. Mack W. C, "Selecting steel tubing for the CPI", *Chem. Eng.*, 80(24), 94, (1973).
63. Maeda Yasuaki, "Air pollution and material damage", *Nippon Sutenresu Giho*, 26, 1, Japan 1991.
64. Maksimovich B. I; Leinachuk V. E; Netesa I. V; Borisenko A. I; Timets P. A, "Gas- thermal spraying of powdered aluminum on steel tanks for the storage of petroleum products", *Avtom Suarka*, (7), 76, USSR 1989.
65. "Materials Engineering I" (selecting materials for process equipment), Kenneth J. Mc. Naughton & the staff of chemical engineering magazine, Mc. Graw Hill Co. New York, N.Y, (1980).
66. Mc Evily A. J. J, "Atlas of stress corrosion and corrosion fatigue curves", Ed. by American Society for Metals, USA 1990.
67. Mc Millin F. A, "Crude unit corrosion", *Hydrocarbon Processing.*, (4), 141, (1978).
68. Mercer A. D, "Corrosion inhibitor testing: Principles and practices", *Spec. Publ-R. Soc. Chem*, 71 (Chem. Inhib. Corros, Control), 46, U.K. 1990.
69. Mitchell L. V, "Preventing corrosion under insulation" *Chem. Eng.*, 94(7), 97, (1987).

70. Moore R. E, "selecting materials to resist corrosive conditions", *Chem. Eng*, 86(16), 91, (1979).
71. Morello T. J, "Fireside at occidental's energy from waste plant", *Incinerating Munic. Ind. Waste: Fireside Probl. Prospects Improv.* [Proc. Int. Conf. 1989] Ed by Bryers R. W, Hemisphere, New York 1991.
72. Munger Ch. G, "Inorganic coating systems", *Mater. Perform*, 30(11), 34, (1991).
73. Neill W. J; Forolis Z. A, "Internal corrosion in floating roof gasoline tanks", *Hydrocarbon Processing.*, (8), 145, (1976).
74. Okuma M; Maeda H, "Fouling prevention agents for heat exchangers", *Kagaku Sochi.*, 32(12), 43, Japan 1990.
75. Pelosi P. F; Cappabianca C. J, " Corrosion control in steam and condensate lines", *Chem. Eng.*, 92(13), 61, (1985).
76. "Perry's chemical engineers' handbook", Sixth Edition, Green D. W, Mc. Graw Hill international, sec. 23, 1984.
77. Pickard S. S, "Sulfur concrete for acid resistance", *Chem. Eng.*, 92(16), 77, (1985).
78. Puckett D, B, "What you should know about fiberglass reinforced plastic tanks", *Chem. Eng*, 83(20), 129, (1976).
- 79 Rak G. R; "Corrosion monitoring equipment", *Chem. Eng. Prog*, 75(3), 46, (1978).
80. Redmond J. D. & Miska H. K, "The basic of stainless steel", *Chem. Eng*, 89(21), 78, (1982).
81. Ross A. P, "Rediscovering lead-I", *Chem. Eng*, 82(25) 79, (1975).

82. Schelleberg C, "Anticorrosive epoxy resins for stainless steel tanks in drinks and foods industry, *Lebensmittel und Milchwirtschaft*, 112(4), 1287, Germany 1991.
83. Schillmoller C. M, "Alloys to resist chlorine, hydrogen chloride and hydrochloric acid", *Chem. Eng.*, 87(7), 161, (1980).
84. Shinik G. M; Zobov E. V; Chernyshenko I. S, "Use of a paint to protect cooling equipment", *Sodovod. Vinograd, Mold.*, (8), 25, USSR 1989.
85. Shuker F. S, "When To use refractory metals & alloys in the plant", *Chem. Eng.*, 90(9), 81, (1983).
86. Sing P. K; Sharma V. P, "Status of corrosion problems in oil industry and remedial methods", *Res. Ind.*, 36(1) 41, India 1991.
87. Skabo R. R, "International maintenance of vessels", *Chem. Eng. Prog.*, 66(10), 33, (1970).
88. Taylor "The electrolytic process for chromate removal in cooling towers", *Chem. Eng. Prog.*, 78(6), 70, (1982).
89. Timonin V.A; Stepanova I. A; Kreindlin Y. G; Koshikova N. N; Klimanova N. V, "Expert systems in corrosion engineering (review)", *Zashch. Met.*, 28(1), 3, USSR 1992.
90. Verik E. D, "Alluminum alloys for saline waters", *Chem. Eng.*, 81(9), 103, (1974).
91. Vigdorovich V. I; Safronova N. V; Prokhorenkov V. D, "Protective effectiveness of oil-soluble inhibitors of corrosion of carbon steel", *Zh. Prikl. Khim.*, 63(3), 636, USSR 1990.
92. Von Baeckmann W. "Development of cathodic corrosion protection", *Tech. Mitt.*, 82(5), 371, Germany 1989.
93. Webster H. A, "Economics of cathodic protection", *Mater Perform.*, 31(3), 25, (1992).

94. Ysygulev O. V; Grechanyuc N. I; Grabin U. V, Brailovskii G. E, "Alumina and titanium nitride, on nickel alloy, for carburization protection", *Probl. Prochn*, (9) 86, USSR 1989.

95. Zinevich A. M; Kozlouskaya A. A, "Anticorrosion coatings (Science-for the Building Industry)" (*Antikorrozionnye Pokrytiya (Nauka-Stroitel'nyy proizvodstvu)*), *Stroiizdal*, Moscow 1989.

## Glosario:

**AA** (Asociación del aluminio) Esta encargada específicamente de las aleaciones de aluminio.

**ACI** (Instituto de Aleaciones Fundidas). Se encarga de la modificación de las aleaciones que son llevadas a su estado líquido para ser mezclados.

**AISI** (Instituto Americano de Hierro y Acero). Organismo emergido a partir de todos los tipos de acero de composición variable.

**ANSI** (Instituto Nacional Americano de Estándares). El cual es parte de la Asociación Americana de Estándares (ASA), se encarga de los códigos de tuberías en la industria química de proceso.

**ASME** (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos). Esta sociedad esta relacionada con los códigos de recipientes a presión y calderas.

**ASTM** (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales). La cual genera especificaciones para los materiales usados en los códigos ANSI y ASME.

**Austenítico**. Es una solución de elementos (en general son metales) con una estructura cúbica centrada en las caras (el centro generalmente es hierro).

**CDA** (Asociación de Desarrollo para el Cobre). Se encarga de la designación y codificación de las aleaciones del cobre.

**Colado**. Forma de fabricar estructuras de metales y aleaciones, es necesario para esta operación fundir metales y aprovechar su fluidez, es de bajo costo comparado con el forjado, es llamado también **fundido**.

**Ferrítico**. Es una solución de metales con una estructura cúbica centrada en el cuerpo (el centro es hierro).

**Forjado**. Elaboración de estructuras metálicas a partir de ciclos térmico-mecánicos, para aumentar su fortaleza, el tamaño de los gránulos metálicos es menor con respecto al colado.

**ISO** (Organización Internacional de Estandarización). Genera estándares para el uso mundial, tiene miembros en 80 países.

**Martensítico.** Es una estructura de transición metaestable (estable bajo ciertas características), entre las formas ferrítica y martensítica del acero. Tiene la ventaja de disolver grandes cantidades de soluto a alta temperatura. Esta transición ocurre cuando la forma austenítica pasa a la ferrítica.

**MPY.** Es la medida más común de determinar el deterioro de los materiales debido a la corrosión significa milímetros por año (millimeters per year en inglés).

**NACE** (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión). Organismo encargado recopilar todos los criterios de diseño y estandares para combatir la corrosión, además se encarga de investigar materiales no metálicos.

**SAE** (Sociedad de Ingenieros Automotrices). Se encarga de clasificar materiales de acero inoxidable principalmente, ya que es de los materiales de mayor uso en la industria automotriz.