

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

207

107



**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ACEROS
INOXIDABLES COMERCIALES A LA CORROSION
BAJO TENSION.**

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

JORGE ROSALES CASTRO

MEXICO, D. F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ACEROS INOXIDABLES COMERCIALES
A LA CORROSION BAJO TENSION.

I N D I C E		HOJA.
RESUMEN.		<u>1</u>
C A P I T U L O I.		
INTRODUCCION.. . . .		<u>2</u>
ANTECEDENTES		<u>3</u>
1.1.ASPECTOS HISTORICOS DEL ACERO INOXIDABLE.. . . .		<u>6</u>
C A P I T U L O II.		
GENERALIDADES		<u>9</u>
2.1. USOS DEL ACERO INOXIDABLE		<u>9</u>
2.2. NATURALEZA ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION... <u>11</u>		<u>11</u>
2.3. MECANISMOS DE LAS REACCIONES DE CORROSION... <u>12</u>		<u>12</u>
2.4. EFECTO DEL OXIGENO DISUELTO EN MEDIOS ACUOSOS <u>14</u>		<u>14</u>
2.4.1 AGUA SATURADA CON AIRE		<u>14</u>
2.5. COMPORTAMIENTO DE LA CORROSION		<u>15</u>
2.5.1 PASIVIDAD		<u>16</u>
C A P I T U L O III.		
CORROSION BAJO TENSION		<u>19</u>
3.1 DEFINICION		<u>19</u>
3.2.CARACTERISTICAS DE LA CORROSION BAJO TENSION., <u>26</u>		<u>26</u>
3.2.1. SUSCEPTIBILIDAD DEL METAL		<u>27</u>
3.2.2. MEDIO CORROSIVO		<u>29</u>
3.2.3. ESFUERZO DE TENSION		<u>32</u>
3.2.4 TIEMPO DE FRACTURA		<u>36</u>

3.2.5.	CONCENTRACION DE SOLUCION	37
3.2.6.	TEMPERATURA	37
3.2.7.	TIPO DE ALEACION	38
3.2.8.	ESTRUCTURA METALICA	38
3.2.9.	PLANO DE ESFUERZOS	38
3.2.10.	ESFUERZOS DE BAJO NIVEL	42
3.3	MORFOLOGIA DE LA GRIETA	43
3.4.	MECANISMO DE AGRIETAMIENTO	45
3.4.1.	ELECTROQUIMICO	45
3.4.2.	M E C A N I C O	48
3.5.	CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES	49
3.6.	CARACTERISTICAS DE LOS ACEROS INOXIDABLES USADOS EN EL LABORATORIO	55
3.6.1.	CARACTERISTICAS DEL ACERO TIPO 304	55
3.6.1.1.	TRANSFORMACIONES EN CALIENTE	56
3.6.1.2.	TRATAMIENTOS TERMICOS	56
3.6.2.	CARACTERISTICAS DEL ACERO TIPO 316	56
3.6.2.1.	TRANSFORMACIONES EN CALIENTE	57
3.6.2.2.	TRATAMIENTOS TERMICOS	57
3.7.	METODOS DE PREVENCION DE LA CORROSION BAJO TENSION	57
	C A P I T U L O IV.	
	PRUEBAS DE CORROSION	63
4.1.	CLASIFICACION DE LAS PRUEBAS	63
4.2.	DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS DE CORROSION BAJO TENSION A NIVEL LABORATORIO	69
4.2.1.	NORMA PARA LA PREPARACION DE LA PROBETA DE PRUEBA	75
4.2.2.	NORMA PARA LA PREPARACION DE LA SOLUCION	85

4.3. DESCRIPCION DEL METODO DE INMERSION	88
4.4. DURACION DE LA PRUEBA	90
4.5. EXPRESIONES DE LA VELOCIDAD DE CORROSION	90
4.6. INSPECCION DE PROBETAS DESPUES DE LA CORROSION	91
R E P O R T E	93
C A P I T U L O V.	
EXPERIMENTACION	95
5.1. TIPOS DE ACEROS ENSAYADOS	95
5.2. DIMENSIONES DE LAS PROBETAS	96
5.3. PREPRACION DE PROBETAS	96
5.4. PROCEDIMIENTO PARA EL DOBLADO	97
5.5. DIRECCION DE ESFUERZOS	97
5.6. LIMPIEZA ANTES DE LA EXPOSICION	98
5.7. IDENTIFICACION DE PROBETAS	99
5.8. PESO DE PROBETAS ANTES DE LA EXPOSICION	99
5.9. EXPOSICION DE PROBETAS	99
5.10. PREPRACION DEL MEDIO CORROSIVO	99
5.11. EQUIPO EMPLEADO EN LABORATORIO	100
5.12. AIREACION Y TEMPERATURA	102
5.13. METODO DE EXPOSICION	102
5.14. LIMPIEZA DE PROBETAS DESPUES DE LA CORROSION	102
5.15. PREPARACION PARA EXAMINACION METALOGRAFICA	102
C A P I T U L O VI.	
RESULTADOS	104
DISCUSION DE RESULTADOS	121
C A P I T U L O VII	
CONCLUSIONES	122
BIBLIOGRAFIA.	

R E S U M E N

El presente trabajo es el resultado experimental de una serie de pruebas de inmersión total, practicadas en diferentes medios corrosivos a los aceros inoxidable (austeníticos) más comerciales que se fabrican en México, con el fin de observar su comportamiento a la corrosión bajo tensión en dichos medios.

Se ponen de manifiesto, las influencias que tienen los principales elementos de aleación como Cr, Ni y Mo, sobre las propiedades de corrosión.

También se pretende normar un criterio para la realización de estas pruebas de total inmersión, practicadas a los aceros inoxidable.

CAPITULO PRIMERO

I N T R O D U C C I O N .

De todas las formas de corrosión hay una en especial, que - por sus características típicas y por la forma de manifestarse se distingue de las demás, haciéndola única; se le conoce como Corrosión bajo Tensión.

La corrosión bajo tensión ha creado muchos problemas como - accidentes, daño a equipos y a estructuras metálicas. Con ésto, muchos investigadores se han dado a la tarea de buscar como prevenirla y evitar que suceda o como última alternativa, controlarla. En algunos casos se ha tenido éxito pero en otras no se ha logrado ningún adelanto; y ésto se debe a lo complicado de su mecanismo. Además de que este mecanismo sufre constantes modificaciones dependiendo de las características en que se encuentra la aleación.

Como resultado de la corrosión bajo tensión se produce un agrietamiento de la aleación que conduce a la fractura de la misma, - por lo cual llamaremos en éste texto más general al proceso como "Agrietamiento por Corrosión Bajo Tensión", y en lo subsecuente lo abreviaremos como ACBT.

El ACBT, es uno de los problemas más difíciles con que se - ha topado la Ingeniería.

Esto se observa en el momento de seleccionar un cierto tipo de metal para el diseño y construcción de equipos, los cuales deben -- cumplir con una serie de requisitos para su perfecta operación. El problema de ACBT ha creado una nueva área en el diseño mantenimiento e incluso en el de costos.

Para tener un buen diseño, es necesario la selección del metal adecuado, ya que debe ser totalmente inmune al ACBT. Con los estu-

dios recientes se han desarrollado nuevas aleaciones, de las cuales, se necesita un completo entendimiento de sus características microscópicas, ya que en muchos casos la teoría es insuficiente para la selección de la aleación.

Para comprender la importancia de éste proceso, es necesario conocer algunos antecedentes que dieron origen al estudio del ACBT.

A N T E C E D E N T E S.

Los primeros indicios que se conocen del ACBT son los relacionados con el difuso problema que se tuvo al introducir el estirado en frío de cartuchos de bronce, caso que se tuvo durante la última mitad del siglo XIX. Este problema se observó con más frecuencia durante los periodos de lluvias torrenciales, como sucede en los trópicos, las grietas fueron observadas en los cartuchos en donde la caja fué apretada con la bala. Transcurrió mucho tiempo sin que se supiera que era lo que causaba la grieta; hasta que se estableció que el amoníaco era el componente ambiental más importante en la fractura, el cual resultaba de la descomposición de la materia orgánica.

Durante esta época, el problema fué lo suficientemente importante que adquirió su propio nombre "Season Cracking".

Al terminar el siglo XIX, se había descubierto que los esfuerzos residuales efecto del conformado en frío eran los causantes del ACBT, en donde se observó que la distribución de los esfuerzos tienen una compleja geometría. Siendo para esta época no tan sorprendentes, que las grietas de corrosión bajo tensión tiendan a ramificarse en respuestas a la complicada geometría en la distribución de esfuerzos, para lo cual, esta ramificación fué aceptada como característica en el ACBT. Con éste descubrimiento se contribuyó al desarrollo de las reglas en las que se

establece la existencia que ⁵haya un medio específico corrosivo y un determinado esfuerzo los cuales pueden causar ACBT en una aleación dada.

Ya para finalizar el siglo XIX, se encontró con otro caso peculiar del ACBT; éste caso se observó en el remachado de las calderas de acero. Al construir las primeras máquinas movidas por vapor, ocurrieron muchas explosiones por los remaches en las calderas. Al examinar éstas fallas, se observaron grietas o quebraduras transcristalinas en los agujeros de los remaches. Estas áreas fueron trabajadas en frío durante la operación de remachado y además se encontraron depósitos blanquecinos establecidos en estas áreas, que al analizarlas se observaron que eran hidróxidos cáusticos o de sodio que viene a ser el principal componente. Con éste tipo de fractura transcristalina y con la presencia de zonas cáusticas, surgió el término de "Fragilidad Cáustica", nombre con el cual se le conoce hasta ahora. Con los ejemplos mencionados, se da una indicación de que el problema puede ocurrir en un número ilimitado de sistemas de aleación, dadas por las malas condiciones ambientales.

A partir de estos casos, se intensificó más el estudio del ACBT y se le dió la debida importancia en el diseño, siendo ésto de gran importancia para la Ingeniería.

Ya en el siglo XX, el ACBT, fué observado en las aleaciones de aluminio, el cual fué atribuido a la humedad atmosférica.

Y así, conforme fué pasando el tiempo se estuvieron observando la susceptibilidad de diferentes materiales al ACBT. Durante los años treinta, cuando el acero inoxidable llegó a usarse intensamente en las industrias papeleras, químicas y petroleras el ACBT fué observado, particularmente en cloro o soluciones cáusticas a elevadas temperaturas.

Durante los cincuenta, los programas aeroespeciales encontraron que además de que los aceros martensíticos eran susceptibles al ACBT, las aleaciones de titanio eran también susceptibles en contacto con ácido nítrico o en sales a altas temperaturas.

Estas experiencias confirmaron la suposición de que el ACBT es un fenómeno general que se espera en todos los sistemas de aleaciones.

Con la introducción de la electrofotografía a la metalurgia, se demostraron, entre otras cosas, las diversas diferencias existentes en la topología de la fractura sobre una microescala entre las grietas de corrosión bajo tensión (las cuales son siempre macroscópicas y frágiles en apariencia) y las grietas de fractura frágil en el mismo material.

La apariencia de las grietas de CBT, son siempre como mencioné anteriormente macroscópicamente frágiles, aún en aleaciones en las cuales son altamente dúctiles en pruebas puramente mecánicas de ductilidad a la fractura, siendo ésta otra característica general del ACBT.

También la mecánica de fractura llegó a madurar tanto que se aplicó la teoría del campo de esfuerzos cerca de la grieta de CBT en una trayectoria determinada, particularmente después de que se ha hecho el análisis para el último esfuerzo en vigas de acuerdo a la mecánica de fractura, para lo cual, es práctico para períodos largos de prueba.

Concluiremos diciendo que para el análisis de la mecánica de fractura que se haga, se tiene que usar la metodología y el equipo que se desarrolle adecuado y conveniente para el estudio de caso en particular del ACBT en la evolución de las pruebas, tanto en concepto como en procedimiento.

Tomando en cuenta los estudios realizados a los problemas - existentes y de las investigaciones hechas, además de las ya menciona- das anteriormente, nos podemos dar cuenta de la gran importancia que - tiene el estudio del ACBT, por lo que nos decidimos a hacer una serie- de pruebas de un caso especial. Este estudio que realizaré será lo más completo posible, de acuerdo a la literatura disponible, medios, apara tos y asesoramiento que logremos tener acceso.

1.1.- ASPECTOS HISTORICOS DEL ACERO INOXIDABLE.

El reporte en el cual por primera vez son mencionadas las - aleaciones Fe-Cr data del año de 1820 en las publicaciones de J. Sto-- dard y M. Faraday en Inglaterra. Sin embargo el contenido de Cr no era el suficiente para lograr obtener pasividad en la aleación. En francia en 1821, Berthier encontró que el fierro aleado con una cantidad conside rable de Cr, tenia mayor resistencia al ataque de los ácidos, que el fierro sin alear. Sus aleaciones eran obtenidas por reducción directa - de una mezcla de óxido, el resultado de esto era una aleación que ahora conocemos como Ferrocromo (40-80% Cr), pero ésta aleación no tenia nin- gún valor como material estructural, ya que era muy frágil debido a una alta cantidad de carbono. Berthier preparó algunos aceros usando Ferro- cromo como componente, pero nuevamente la cantidad de cromo era muy pe- queña para poder obtener las propiedades características de pasividad - del acero inoxidable.

Aunque en los siguientes años algunas investigaciones produ- jeron una variedad de aleaciones Fe-Cr, las cuales explotaban las pro- piedades de resistencia y dureza impartidas por el cromo, pero la inhe- rente resistencia a la corrosión de las aleaciones no fué grandemente - observada, debido a que éstas eran acompañadas por un alto contenido de

carbono, el cual impedía una buena resistencia a la corrosión.

En 1904 Guillet de Francia produjo aleaciones de cromo con bajos contenidos de carbono, logrando así los rangos de composición para la obtención de la pasividad.

También estudió la estructura metalúrgica y las propiedades mecánicas de las aleaciones Fe-Cr, así como las aleaciones Fe-Cr-Ni, - las cuales conocemos como acero inoxidable.

Pero el inicio del reconocimiento de la propiedad de pasividad en tales aleaciones, la cual se inicia con un mínimo de 12% de Cr; fué descrita en primer lugar por Monnartz de Alemania, quién empezó sus investigaciones en 1908 y publicó una lista detallada de las propiedades químicas de las aleaciones Fe-Cr en 1911.

Estas investigaciones concluyeron una descripción de los efectos benéficos sobre la resistencia a la corrosión en los medios oxidantes en comparación con los reductores, así como la necesidad de mantener bajos contenidos de carbono y los efectos de pequeñas adiciones de elementos aleantes tales como Ti, V, Mo y W.

La utilidad comercial de los aceros inoxidables endurecibles empleados como materiales de corte fué desarrollada por H. Brearley de Inglaterra en el año de 1913. También observó que las aleaciones Fe-Cr con 12% de Cr no eran atacadas por el ácido nítrico y que expuestas por largos periodos en la atmósfera tampoco eran corroídas.

E. Maurer y B. Strauss trabajando para la Krupp de Alemania en 1912-1914, fueron los primeros en investigar los aceros inoxidables austeníticos Fe-Cr-Ni. Posteriormente en 1924 Strauss da una composición típica de los primeros aceros de éste tipo los cuales contenían - altas cantidades de Cr y C (0.25% C, 20% Cr, 7% Ni).

El desarrollo práctico de éste acero en Sheffield en el mismo año condujo a una disminución de los contenidos de Cr y C estableciéndose así la composición familiar 18/8 (18% Cr, 8% Ni) con 0-10 a 0-15% C; siendo en la actualidad el más popular de todos los aceros --inoxidables que se producen.

Los trabajos de la Krupp mostraron interés en el mejoramiento de la resistencia a la corrosión en medios ácidos como resultado de las adiciones de Cr y Mo, estableciéndose rápidamente el uso de 2-3% de Mo para las más severas condiciones ácidas. Rápidamente fueron hechas otras adiciones para vencer la susceptibilidad a la corrosión intercrystalina, culminando el principio de los años 30 con el uso general de adiciones de Ti para la estabilización de los carburos, seguida con el uso alternativa de niobio.

Investigaciones posteriores estuvieron interesadas en los efectos detallados de composición sobre los rangos de 12-2²% Cr y 7-30% Ni, así como en la influencia de otros elementos para mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión para campos específicos de aplicación.

CAPITULO SEGUNDO

GENERALIDADES.

2.1.- USOS DEL ACERO INOXIDABLE.

Para conocer cual es la importancia del estudio de las aleaciones Fe - Cr - Ni mencionaré a continuación los diversos usos industriales de éstas aleaciones, así como los usos específicos:

INGENIERIA QUIMICA.

Acidos.- Uno de los usos más frecuentes para los aceros 18/8 -- ha sido en las plantas de síntesis para la obtención de ácido nítrico, -- incluyendo torres de adsorción, tanques de almacenamiento, tuberías y tanques para transporte. La fabricación de ácido fosfórico está generalmente asociada con condiciones severas las cuales incluyen ácido a alta temperatura con contenidos apreciables de ácido sulfúrico ó fluorhídrico como impurezas. También es empleado en la destilación de vinagre y otras implicaciones con ácido acético a altas temperaturas, en general en aquellos procesos que incluyan ácidos orgánicos.

FERTILIZANTES.

Los aceros inoxidables austeníticos encuentran su aplicación en la fabricación de nitratos, sulfato de amonio, superfosfatos, así como en evaporadores y secadores.

CELULOSA.

Los aceros 18/8 Mo son casi siempre empleados para la digestión de la pulpa de la madera, especialmente en aquellos procesos en que se usan sulfitos, la elección del tipo de acero dependerá de la concentración, temperatura y experiencia en el trabajo, También son empleados para la nitración celulosa debido a la buena resistencia que tiene en algunas mezclas de ácido nítrico y ácido sulfúrico.

GRASAS Y JABONES.

Debido a la alta resistencia a los ácidos fáticos se emplea como material de construcción de aquellas plantas que tratan con la hidrogenación o algún otro tratamiento a los ácidos oleico, estearico o similares. En la fabricación de jabón es usado en la recuperación de glicerina de los licores jabonosos que contienen cloruro de sodio.

REFINACION DE PETROLEO.

Medios ácidos tales como ácido sulfúrico y anhídrido sulfuroso se encuentran en la refinación de petróleo, por tal motivo el uso de aceros inoxidable austeníticos es muy recomendable.

PRODUCTOS QUIMICOS

En éste campo hay muchas aplicaciones para los aceros inoxidable austeníticos, ya sea en la manufactura y almacenamiento de productos químicos y farmacéuticos, los cuales incluyen: tanques de almacenamiento, tuberías, válvulas, recipientes para mezclar, filtros y maquinaria para la fabricación de tabletas y penicilina.

SINTESIS A ALTAS TEMPERATURAS

Los aceros austeníticos tienen aplicación en la fabricación de autoclaves, recipientes a presión, válvulas y equipo que trabaja a altas temperaturas.

PRODUCCION DE ENERGIA ATOMICA.

Las aplicaciones que se encuentran en éste campo son en intercambiadores de calor, recipientes a presión, tuberías y procesamiento de combustible.

M A R I N A.

Los aceros austeníticos se emplean para la fabricación de ejes para propelas y en general para piezas que tendrán contacto con la brisa marina, en las cuales se necesita una alta resistencia a la corrosión.

APLICACIONES DOMESTICAS.

Los usos principales son en lavadoras, planchas de vapor, recipientes calentados por vapor, batidoras y cuchillería.

Algunas otras industrias que usan el acero inoxidable son: la industria de la leche, la cerveza, en la fabricación de jugos de frutas y algunas otras relacionadas con la industria alimenticia, empleándose principalmente en tanques de almacenamiento. Tubefías y reactores trabajando en condiciones especiales de presión y temperatura.

2.2.- NATURALEZA ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION.

La mayoría de los metales que existen en la naturaleza están combinados. Sus minerales deberán pasar por un proceso pirometalúrgico y una refinación química, procesos en los cuales se encuentra involucrada una adición de energía para llevarlos a un estado metálico. Esto es, el estado metálico representa un estado con alto contenido de energía. Por ésta razón es de esperarse que la tendencia natural de los metales sea el combinarse con otras sustancias y volver a un estado de menor energía, teniendo lugar un correspondiente desprendimiento de la misma. Esta disminución de la energía libre es la fuerza impulsora de las reacciones de corrosión.

El cambio en la energía libre determina la espontaneidad de todas las reacciones, incluyendo la de corrosión.

En cambio de la energía libre para las reacciones de corrosión está matemáticamente ligado con la fem de la misma, pudiéndose calcular una u otra.

Cuando la corrosión es electroquímica, como generalmente sucede, la reacción puede ser dividida en dos partes: la parte anódica y la parte catódica. Cada parte incluye un proceso de oxidación-reducción con su propio potencial reversible. En la reacción anódica puede estar involucrada la oxidación de un metal para la formación de los iones metálicos y -

electrones libres, pero también hay una reacción contraria es decir la - reducción de los iones metálicos a un metal. Cuando ambas reacciones se efectúan en igual cantidad, el sistema oxidación reducción está en equilibrio. Estas condiciones de equilibrio establecen el potencial reversible tanto de la reacción anódica, como de la catódica. La diferencia entre éstos potenciales reversibles será la Fem de la reacción completa, - la cual proporciona la fuerza impulsora de la corrosión. La cantidad de corrosión es controlada por la reacciones anódicas y catódicas. A medida que la corriente fluye, los potenciales anódicos y catódico son desplazados de su equilibrio aproximándose entre si. Este proceso es llamado polarización.

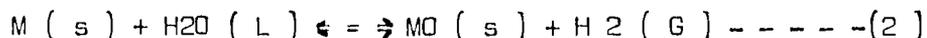
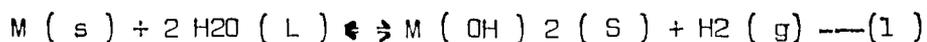
Graficando el potencial contra corriente, se obtienen los diagramas de polarización los cuales ilustran el proceso de corrosión.

Con frecuencia las reacciones de oxidación y reducción tienen lugar más rápidamente en algunas áreas del metal que en otras, formándose así los ánodos y cátodos, locales.

Una área anódica relativamente pequeña y una área catódica mayor pueden permitir una intensificación de la corrosión localizada.

2.3.- MECANISMOS DE LAS REACCIONES DE CORROSION.

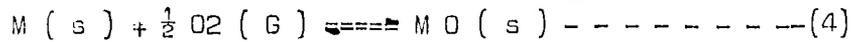
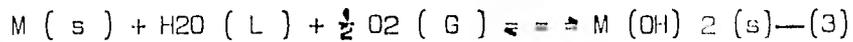
Las reacciones de corrosión pueden ocurrir en medios acuosos - en donde exista la presencia o ausencia de oxígeno. En el último caso, - la corrosión estará acompañada por un desprendimiento de hidrógeno, llevándose a cabo las siguientes reacciones:



donde: M= metal
S= sólido

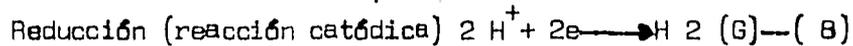
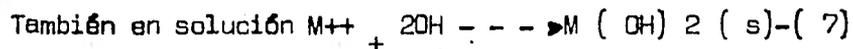
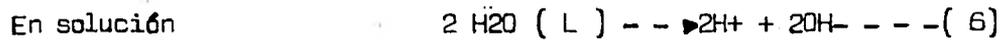
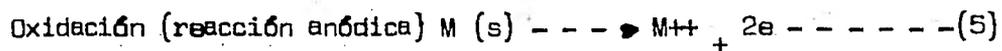
L = líquido.
G = gas.

Cuando existe la presencia de oxígeno las reacciones son:

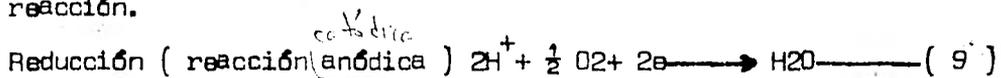


Hay algunos metales que pueden reaccionar con el agua en ausencia de oxígeno, tales como el Fe, Zn, Cr, Al, y Mg.

La reacción será electroquímica si se puede dividir en reacciones de oxidación y reducción, en ambas reacciones existirá un intercambio de electrones, siempre y cuando existan iones conductores en el electrolito. Así la ecuación (1) puede considerarse como la suma de las siguientes cuatro ecuaciones:



Similaramente la reacción (3) puede considerarse como la suma de las ecuaciones (5), (6) y (7), dando como resultado la siguiente reacción.



Las reacciones anódicas y catódicas estarán controladas por el flujo de electrones a través del metal y no serán independientes. Si el flujo de electrones es detenido, la corrosión electroquímica también cesará. En algunos sistemas de corrosión las reacciones (5), (6), y (9) también son posibles.

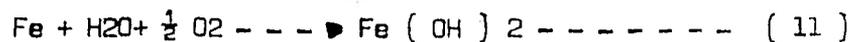
La reacción (8) se lleva a cabo rápidamente en medios ácidos, pero lentamente en medios neutros o alcalinos. Esta reacción puede acelerarse por medio de la disolución de oxígeno en el medio, llevándose a cabo la reacción (9); éste proceso es llamado "depolarización".

La magnitud en la cual se lleve a cabo la reacción catódica (8) y la reacción (9) será proporcional a la difusión de oxígeno hacia la su

perficie metálica, la cual será proporcional a la cantidad de oxígeno - -
 disuelto en el medio. El oxígeno disuelto reacciona con los átomos de hi-
 drógeno que han sido casualmente absorbidos por la superficie metálica, -
 independientemente de la presencia o ausencia de impurezas en el metal. -
 La reacción de oxidación procederá tan pronto como el oxígeno alcance la
 superficie del metal. Tomandose como caso el fierro, sumando las ecuacio-
 nes (5) y (9) y haciendo uso de la reacción.



Se llevará a cabo la siguiente reacción:



El óxido ferroso hidratado ($\text{Fe} \text{O}_n \text{H}_2\text{O}$) o hidróxido Férrico -
 ($\text{Fe} (\text{OH})_2$) junto a la superficie del fierro formará una barrera a tra-
 vés de la cual el oxígeno deberá difundirse hacia la superficie metálica.
 En la parte exterior de la película formada por éste óxido, el acceso de
 oxígeno disuelto convierte el óxido ferroso a óxido férrico hidratado o -
 hidróxido férrico de acuerdo a la siguiente reacción:



El óxido férrico hidratado es el principal compuesto de los óxi-
 dos formados debido a la corrosión. Existe como $\text{Fe}_2 \text{O}_3$ (hematita) y es -
 no magnético, o como $\text{Fe}_2 \text{O}_3$ magnético, esta forma tiene la energía libre -
 de formación más alta (mayor estabilidad). Por lo general se forma una -
 capa de óxido férrico hidratado entre los óxidos hidratados ferroso y fé-
 rrico.

De ésta manera las películas formadas consisten de tres capas de
 óxido de fierro en diferentes estados de oxidación.

2.4.- EFECTO DEL OXIGENO DISUELTO EN MEDIOS ACUOSOS.

2.4.1.- AGUA SATURADA CON AIRE.

A temperaturas ordinarias el oxígeno disuelto en el agua es necesario para una apreciable corrosión en el fierro. La cantidad inicial de corrosión en agua saturada con aire es alrededor de 100 miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd). Esta cantidad disminuye en un periodo de días tan pronto como se forma el óxido de fierro, el cual actúa como una barrera para evitar la difusión del oxígeno hacia el metal. Un estado estacionario de corrosión puede ser de 10 a 20 mdd. Ya que la cantidad de difusión en un estado estacionario es proporcional a la concentración de oxígeno, la cantidad de corrosión también será proporcional a la concentración del oxígeno.

Aunque un incremento en la concentración de oxígeno acelera en un principio la corrosión, se encontró que más allá de una concentración crítica la corrosión disminuye rápidamente hasta un valor bajo. En agua destilada la concentración crítica con la cual se logra disminuir la corrosión es de 12 ml O₂/ H₂O; éste valor aumenta con la temperatura y cuando hay sales disueltas, disminuye con un incremento de la velocidad y del P.H de 10 la concentración crítica de oxígeno en agua saturada con aire alcanza un valor de Em 102/ 1H₂O; siendo menor para soluciones más alcalinas.

La disminución de la corrosión es causada por una pasividad del fierro por el oxígeno, ya que el fierro en agua saturada con aire (5.6 ml O₂/l) tiene un potencial de - 04 a - 05 V y en agua saturada con oxígeno - (28 ml O₂/l) es de 0.1 a 0.4 V.

Aparentemente a altas presiones parciales una cantidad mayor de oxígeno llega hasta la superficie del metal, el cual puede ser reducido por la reacción de corrosión, por lo que el exceso estará disponible para la formación de la película pasiva.

2.5.- COMPORTAMIENTO DE LA CORROSION

2.5.1.- PASIVIDAD.

La pasividad es un estado de inactividad electroquímica la -- cual es obtenida bajo condiciones adecuadas por algunos metales base, -- principalmente el Hierro, níquel, cromo y por algunas de sus aleaciones.

Su naturaleza ha sido tema de continua discrepancia. Los principales temas de discusión son que ésta es debida a una pequeña película, generalmente un óxido, una película adsorbida de oxígeno u otro gas o de iones, o debida a la configuración electrónica de los átomos.

La propiedad de pasividad es de interés industrial debido a los usos químicos y la resistencia a la corrosión que ésta proporciona. El -- acero inoxidable debe su resistencia a la corrosión a su habilidad para -- permanecer pasivo en muchos medios.

La pasividad dependerá de las películas formadas sobre la super- ficie del metal. Por esta razón la apreciación de la naturaleza y preser- vación de tales películas es importante para una clara comprensión del com- portamiento de estos aceros.

Cuando se logró separar las películas de óxido de las superficie del metal empleando soluciones alcohólicas de yodo, se encontró que el -- contenido de óxido crómico en la película formada en los aceros inoxidables austeníticos variaba con el grado de pulido, y que el pulido tendía -- a incrementar el contenido de óxido crómico en la película. Se encontró -- que para muestras con el pulido a espejo el contenido de óxido crómico en la película era de 90%, en tanto que no ocurría lo mismo con el Ni.

Bajo la mayoría de las condiciones de exposición la perseverancia de la película pasiva está sujeta ya sea al crecimiento continuo o al equilibrio dinámico de una ruptura parcial seguida por una reparación de la misma. Su composición final dependerá del grado y naturaleza del crecimiento, el cual a su vez dependerá del medio. Por medio de mediciones

potenciométricas se ha encontrado la secuencia general de la ruptura y - reparación del equilibrio dinámico en varios electrolitos.

Durante la ruptura de la película el potencial se hace más negativo llegando a hacerse más positivo a medida que va ocurriendo la reparación de la misma. La pasividad complica la situación del potencial de electrodo de diferentes maneras; por ejemplo es posible, bajo condiciones apropiadas, producir un ataque activo por polarización anódica. La película de óxido también actúa como una gran área catódica en relación con una ligera ruptura de su equilibrio, con una constante tendencia hacia la corrosión. Cuando las condiciones no son lo suficientemente reductoras para una ruptura general. Este explica la tendencia de éste tipo de ataque el cual — ocurre en soluciones con cloruros ligeramente ácidas.

Se han hecho muchos estudios de pasividad bajo condiciones ácidas usando aceros, empleando para ello la ayuda de un potenciómetro. Este aparato permite medir la corrosión a determinados potenciales por medio del suministro de una corriente polarizante ya sea positiva o negativa, suficiente para mantener el potencial deseado. Una curva típica de polarización anódica para un acero del tipo cromo-níquel- (18/8) en ácido sulfúrico se muestra en la siguiente figura 1.

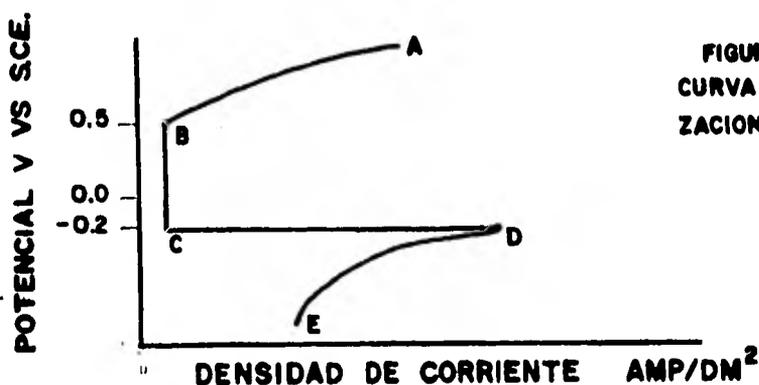


FIGURA I
CURVA TÍPICA DE POLARIZACIÓN

Curva típica de Polarización Anódica para un acero 18/8 en ácido sulfúrico.

Se puede observar que hay una región de aproximadamente 0.5 -- volts (de - 0.2 a 0.3 V) sobre la cual el ataque es muy pequeño (B-C).

Esta es la región de una pasividad normal. Como consecuencia -- de hacer el sistema más anódico resulta un rompimiento del equilibrio, -- posiblemente ayudado por una sobre-oxidación de la película hasta la ob-- tención de iones solubles Cr (B-A). Por otra parte, un ligero movimiento catódico hace que tenga lugar un vigoroso rompimiento de equilibrio por -- reducción y el acero entra en una región de ataque rápido (C-D), en la -- cual se requerirá una mayor polarización catódica para suspender el ata-- que (E). Por lo tanto para un servicio satisfactorio es necesario que -- las condiciones del acero sean mantenidas en la zona de seguridad de com-- pleta pasividad (B-C).

Muchos de los usos de los aceros austeníticos Cr/Ni dependen -- del hecho de que para un amplio rango de condiciones el acceso normal del oxígeno en la atmósfera está disponible para asegurar esta condición.

Por otra parte es posible en muchos casos evitar la reducción -- de la película (C-D), sin embargo la adición de inhibidores puede crear condiciones no adecuadas ya que éstas pueden ser capaces de adsorber las influencias reductoras, es decir "envenenan" el acero en la zona de segu-- ridad (B-C). Ejemplo de esto son el ácido nítrico o los iones de cobre -- en ácido sulfúrico.

La aplicación y el comportamiento de los aceros inoxidables -- austeníticos deberá ser considerado bajo el punto de vista de su pasividad.

CAPITULO TERCERO

3.- CORROSION BAJO TENSION.

3-1.- DEFINICION.

La corrosión bajo tensión es un proceso mecánico-electroquímico que al combinarse éstos nos conducen a la fractura del material.

La causa de esta fractura es mediante la acción combinada de un esfuerzo de tensión y el ataque de un determinado medio corrosivo.

Muchos investigadores han definido la C.B.T. de muchas maneras, esto se debe a que todavía no se sabe claramente cual es el mecanismo exacto de ACBT y es por eso que se han publicado muchas teorías pero ninguna de ellas describe con precisión cual es el mecanismo más correcto, ya que solo se define un proceso en particular por la dificultad que existe de generalizar el proceso para todos los casos que se conocen. Además, cada persona define el proceso según el enfoque que se le dé al problema; y por ello, surgen las diferencias de una teoría a otra y porque es complicado establecer el mecanismo que debe ser, porque algunos consideran que el esfuerzo de tensión aplicado es el proceso más importante en el ACBT, según los comentarios de los Ingenieros, pero para los Químicos, el proceso fundamental es el electroquímico. Por la diferencia de criterios existentes, es difícil el unificar el mecanismo. De acuerdo a esto y por investigaciones propias, considero que el ACBT es un proceso en el que actúan en acción conjunta el esfuerzo aplicado y el medio corrosivo; lo que puede suceder es que alguna de estas dos condiciones tenga más influencia en el proceso y lo único que logra es acelerar la fractura, siendo esto, a mi forma de ver, el problema, lo más adecuado en el ACBT.

Haré mención de como otro investigador (H.W. Gillet) describió el proceso.

"Es frecuente que ocurra que un metal que tiene un rango considerable de elasticidad y habilidad para alargarse sin sufrir fractura cuan

do está sometido a esfuerzos de tensión aún por arriba del valor del esfuerzo de cedencia y que además, cuando no está sometido a dichos esfuerzos es resistente a la acción de un medio corrosivo dado, se comporta sin embargo de manera frágil, cuando se le aplican esfuerzos ligeramente menores al límite de cedencia, en presencia del ambiente corrosivo".

Después de muchos estudios e investigaciones que se han hecho para clasificar todas las fallas por fractura ocurridas en diversos medios corrosivos y a diferentes rangos de esfuerzos, se llegó a la conclusión de que hay dos diferentes tipos de mecanismos para que ocurra el ACBT:

- a) En primer término, tenemos a la trayectoria activa de corrosión, o lo que es propiamente conocido como ACBT.
- b) En segundo término está la fragilización por hidrógeno.

En el ACBT, la fractura ocurre por corrosión localizada en la punta de la grieta y que continúa a lo largo de una trayectoria, en la cual es electroquímicamente activa con respecto al metal que hay en su alrededor. Para el caso de fragilización por hidrógeno, la fractura resulta debido a la entrada del hidrógeno dentro del metal, el cual reduce la habilidad de deformación plástica del material.

La fragilización por hidrógeno no es un proceso de corrosión en un sentido clásico, y esto es debido a que la fractura ocurrida por este mecanismo es algunas veces no aceptada en nombrarla con el término ACBT por la forma en que se manifiesta.

Sin embargo, sucede a menudo que no se sabe claramente cual de los dos tipos de mecanismos es el responsable de la fractura, por ello, es conveniente y práctico el uso genérico del término de ACBT. para cuando se tiene una fractura ocurrida por cualquiera de estos dos mecanismos o que sea debida a ambos.

Tanto el ACBT como la fragilización por hidrógeno, son dos ti-

pos de fallas debidas a diferentes variables. Por ejemplo, se dice que la protección catódica es un método muy efectivo para prevenir el ACBT; pero éste, además acelera los efectos de fragilización por hidrógeno.

De aquí se observa la importancia de considerar el ACBT y la fragilización por hidrógeno como fenómeno por separado.

De las investigaciones hechas sobre este tema se ha logrado llegar a la conclusión de que la fragilización por hidrógeno no es llevada a cabo en los aceros inoxidable austeníticos, por esta razón y debido a que nuestro estudio es sobre este tipo de aceros, nos enfocaremos particularmente al ACBT dando sus características más importantes en el proceso.

Durante el ACBT el metal o aleación es virtualmente inatacable por sobre todas las demás partes de la superficie, ya que se trata desde un principio de una corrosión localizada en el cuál una fina grieta se prolonga a través de él y llega finalmente a una fractura de la estructura, sin que se haya acercado el esfuerzo aplicado al esfuerzo permitido normalmente en el uso sin efectos corrosivos. Tomando como el caso el acero inoxidable 304, se le hicieron diferentes pruebas como se muestra en la siguiente tabla No. 1, en el cual el esfuerzo requerido para el ACBT es comparado con diferentes rangos de carga, expuesto dentro de un recipiente conteniendo $MgCl_2$ a $310\text{ }^\circ F$ ($154\text{ }^\circ C$), en el cual podemos observar que este tipo de acero se reduce su área de trabajo hasta una zona aprovechable de $1200\text{ }^\circ F$.

Un dato importante que hay que hacer notar, es que no todos los metales al combinarlos en diferentes medios ambientales son susceptibles al ACBT.

Un buen ejemplo de esto, es la comparación entre el bronce y los aceros inoxidable austeníticos. Tenemos que este tipo de aceros se agrietan en medios que contienen cloro, pero no en medios que contienen amoníaco, mientras que en el bronce es completamente al revés. De acuerdo

a lo antes mencionado, podemos decir que para una aleación dada el número de medios diferentes a los cuales sea susceptible a un agrietamiento son generalmente pocos; los que nos facilita un poco su estudio y de esta manera, podemos profundizar más en los medios en que si se agrieta. Mostraremos en la siguiente tabla No. 2. una lista de diferentes sistemas de aleaciones y los medios corrosivos a las que son susceptibles para el ACBT.

Tabla No. 1.- Comparación de los esfuerzos de fractura por varias técnicas con el ACBT. Material: Acero inoxidable tipo 304.

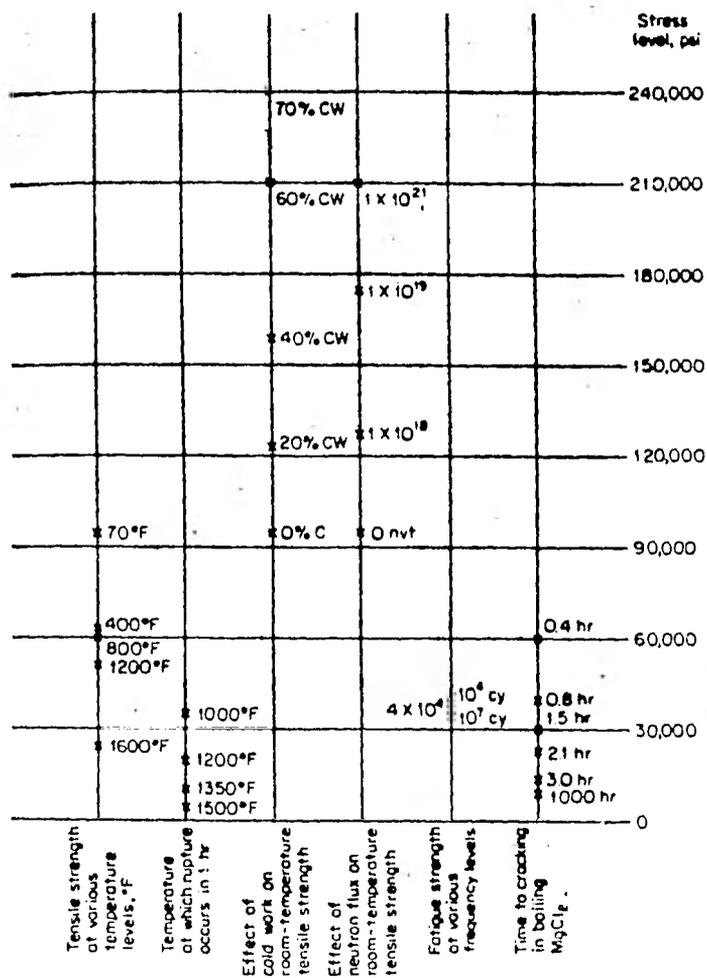


TABLA No. 2.- SISTEMAS ALEACION-MEDIO CORROSIVO EN LOS CUALES OCURRE ACBT.

<u>MATERIAL</u>	<u>MEDIO AMBIENTE.</u>
Aleaciones de Aluminio	Soluciones NaCl-H ₂ O ₂ Sol. NaCl (cloruros) Atmósferas Marinas Atmósferas Industriales húmedas vapor-aire.
Aceros Ordinarios	Sol NaOH Sol NaOH-Na ₂ Si O ₂ Sol. Calcio, amoníaco y nitrato de Sodio. Mezcla de Ácidos (H ₂ SO ₄ - HNO ₃) Sol HCN. Sol ácidos H ₂ S Agua de mar.
Aleaciones de cobre (latones, etc.)	Soluciones y vapores de amoníaco Aminas. agua-vapor.
Aceros Inoxidables	Sol. ácido clorhídrico-MgCl ₂ -BaCl ₂ (cloruros) Sol NaCl-H ₂ O ₂ Agua de Mar. H ₂ S Sol. NaOH-H ₂ S Ácidos poliónicos Hidroxidos concentrados.
Aleaciones de Titanio	Cloruros Alcohol Metil Cloruros sólidos a temperatura 550°F.

TABLA No. 2.- SISTEMAS ALEACION- MEDIO CORROSIVO Y EL TIPO DE AGRIETAMIENTO-
QUE SE ESPERA OBTENER.

<u>ALEACION</u>	<u>MEDIO.</u>	<u>TIPO DE AGRIETAMIENTO.</u>
18 Cr- 8 Ni (acero inoxidable)	Cl-	Transgranular.
Aceros	OH-	Intergranular.
70Cu-30 Zn	NH ₄ ⁺	Transgranular.
	Algunas aminas	Intergranular en soluciones neutras (agrietamiento estacional).
Aleaciones		
Al-4% C	Cl-	en regiones adyacentes a los - límites de grano.
Al- 7% Mg	Cl-	Intergranular.
Acero dulce	No3	Intergranular.
	OH-	intergranular (agrietamiento por álcalis caustica)
Cu-P	NH ₄ ⁺	Intergranular.
Cu-Al	Algunas aminas	
Latones B	Cl-	Transgranular.
	NH ₄ ⁺	Intergranular.
Cu ₃ Au	Fe Cl ₃	Intergranular.

TABLA No. 2.- SISTEMAS PARA LOS ENSAYOS DE CORROSION BAJO TENSION.

MEDIOS- CONCENTRACION Y TEMPERATURAS.

<u>Material</u>	<u>Medios</u>	<u>Concentración</u>	<u>Temperaturas</u> (°C)
Aleaciones de Aluminio	NaCl.	3%	T.A.
Aleaciones de cobre	Atmósfera por en cima de NH ₄ OH (concentrado)	50 ml.	
	Agua 4	50 ml.	T.A.
	SO ₂	0.1%	T.A.
	Aire.		
Aleaciones de Magnesio	NaCl	0.01%	T.A.
	NaCl	3.5%	
	K ₂ CrO ₄	2.0%	T.A.
Acero	NaOH	10%	60
Aceros Inoxidables	CaCl ₂	60 grm.	
	HgCl ₂	0.1g	-100
	Agua	40 ml.	
	HCl	0.1N	
	FeCl ₃ 6H ₂ O	1%	T.A.
	MgCl ₂	40-60%	punto
	HCl	PH. 2-4	Ebullición.
Aleaciones de Níquel	NaOH	10%	Fundido.

T.A=Temperatura ambiente.

Entre las variables más importantes que afectan al ACBT se encuentran: el esfuerzo, estructura metálica, la composición de la solución, la temperatura, dirección de los esfuerzos, composición del metal. Todas ellas serán discutidas con mayor detalle en lo que sigue:

3.2.- CARACTERISTICAS DEL ACBT.

Según su orden de importancia para que ocurra el ACBT, consideramos las siguientes condiciones como las principales:

- 1) Susceptibilidad del metal.
- 2) Medio corrosivo definido.
- 3) Esfuerzo de tensión.

Estas tres condiciones son las más importantes en el ACBT, según nuestro punto de vista en el proceso, las cuales clasificamos como variables primarias, ya que, son imprescindibles y necesarias en el ACBT, y que, en ausencia de alguna de ellas no dará lugar a que se origine este proceso. Las condiciones 2 y 3, se deben dar el mismo tiempo en los intervalos y rangos adecuados para que se dé el ACBT, porque si no simplemente sería un caso de fractura o de corrosión, según sea el caso.

También existen variables secundarias, las cuales solo ayudan al crecimiento de la grieta para que sea más rápido, se acelera el proceso y se fracture más prontamente la aleación; o puede suceder que de alguna forma detenga la velocidad de crecimiento de las grietas; todo depende si hacen acto de presencia en ciertas proporciones en el proceso estas variables. Hay que tener en cuenta que estas variables pueden o no aparecer en el proceso de ACBT.

Algunas de las variables secundarias existentes, son:

- 4) Cantidad o concentración de la solución.
- 5) Temperatura.
- 6) Estructura metálica.

- 7) Tipo de aleación.
- 8) Plano de esfuerzos.
- 9) Esfuerzos de bajo nivel.

Es importante hacer mención que las variables antes anotadas - no son todas las que existen, sino que hay otras más, que van apareciendo según sea el caso que se estudie y que sería muy difícil enumerar todas - ellas, por lo que, sólo mencionaremos las más conocidas. Al combinarse es- tas variables secundarias con las variables primarias, complican aún más- el fenómeno del ACBT durante el proceso, dificultando su estudio al grado que se tienen que separar las variables para conocer de que manera influ- yen cada una de ellas en el ACBT. Al analizar las muestras fracturadas, - muestran ciertos rasgos muy particulares en los cuales podemos determinar- la influencia de cada uno de las variables que intervinieron en la fractu- ra; y de esta misma manera, sabremos que tanto influyen en el proceso y - además sabremos que variables aparecen en el problema. Como resultado a - esta combinación de variables tendremos siempre ACBT.

Para que la idea quede más clara, mencionaremos como actúan pri- mero las variables según fueron clasificadas, las cuales trataremos por - separado; mencionando sus características más importantes y la influencia- que pueda existir de una sobre otras.

No se podrá establecer una regla general de como actúan estas - variables en todos los casos existentes ya que cada una de las relaciones medio-aleación son diferentes en cada caso.

Además, mencionaremos algunos ejemplos particularmente en donde aparezcan con mayor frecuencia el ACBT.

3.2.1.- SUSCEPTIBILIDAD DEL METAL.

La susceptibilidad del metal es debida a factores metalúrgicos, la cual afectada por la interrelación existente en promedio de:

a) La composición química, b) la orientación preferente de los granos, c) la composición y distribución de precipitados, d) interacción de dislocaciones, e) aumento de la fase de transformación (o grado de metaestabilidad).

Estos factores unidos, más la interacción con la composición del medio corrosivo y el esfuerzo afectado por el tiempo de fractura, complican su estudio al aparecer todos ellos al mismo tiempo.

En la siguiente figura No. 2 (adición de níquel a aleaciones de 18 Cr+Fe) y en la figura No. 3, se muestran los efectos de un elemento de aleación en acero inoxidable austeníticos y aceros ordinarios. En ambos casos se tienen en común la existencia de un tiempo mínimo de fractura, el cual es función de la composición, es común tenerlos también en otros tipos de sistemas de aleaciones; como ejemplo tenemos la aleación Cu-Au (aunque no es universal para todas las aleaciones)

Otra característica es que únicamente las aleaciones son susceptibles al ACBT y no los metales puros que vienen siendo la excepción de la regla.

Esta idea se ha generalizado desde un principio del descubrimiento del ACBT hasta casi nuestros días en que se cree que los metales puros no se agrietan y es posiblemente correcta. Pero, ahora nos podemos preguntar ¿Que tan puro es un metal?, ya que se han hecho investigaciones y por ejemplo en el cobre se ha encontrado 0.004% de fósforo ó 0.001% de antimonio, - con lo cual se ha reportado que es susceptible al ACBT en medios que contienen amoníaco.

El ACBT se ha producido también en aceros descarbonizados (conteniendo 0.01% de carbón, pero existiendo de seguro pequeñas cantidades de manganeso, azufre y silicón) en soluciones de nitrato de amoníaco hirviente. Recientemente el ACBT se ha producido en Titanio comercial (conteniendo - entre otros componentes, 600 ppm de oxígeno, 100 ppm de hidrógeno).

Y por estas razones, la idea que se tiene de que un material da do, que es "comercialmente puro" no puede fallar por ACBT es incorrecta.

Pero nuestro mayor problema es precisamente el uso más constante de aleaciones que de metales puros que solo se usan en casos muy particulares. Aunque el uso de metales puros es por lo general un adecuado medio para la prevención del ACBT, pero para ello éstos deben ser utilizados con precaución.

En el caso de las aleaciones de aluminio de alta resistencia -- muestran mayor susceptibilidad al ACBT en dirección transversal al que fué laminado, que en sentido paralelo a la dirección longitudinal. Este efecto es debido a la distribución de precipitados, los cuales resultan del laminado.

La figura No. 4 muestra el aumento de resistencia al ACBT cuando la cantidad de ferrita es aumentada en la fundición de acero inoxidable; islas de ferrita en la austenita impiden el crecimiento de las grietas.

3-2-2- MEDIO CORROSIVO.

En este caso, como en todos los demás, no se puede dar una regla general para todos los casos ya que en cada uno de ellos como lo son -- el esfuerzo aplicado y la aleación utilizada se comportan de manera diferente para el mecanismo del ACBT en todos los tipos de combinación entre -- ellos. El ACBT es bien conocido en varios medios acuosos, pero que también pueden ocurrir en ciertos metales líquidos, sales fundidas y líquidos de acuosos inorgánicos.

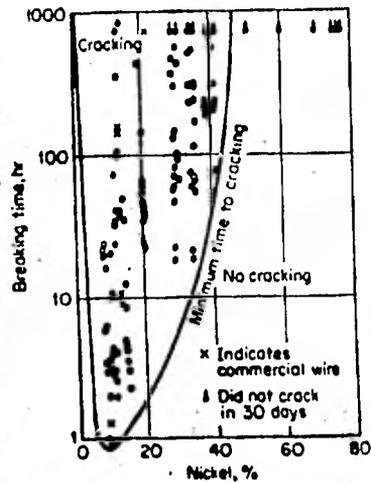


Fig. No2.- ACBT de alambre hierro- cromo-níquel en cloruro de magnesio - hirviente al 42% (Efecto del contenido de níquel)

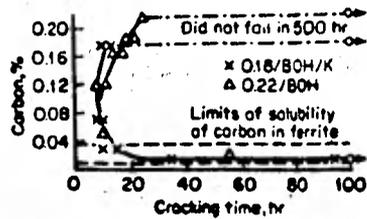


Fig. No. 3.- Efecto del contenido de carbón sobre el tiempo de agrietamiento de un acero ordinario.

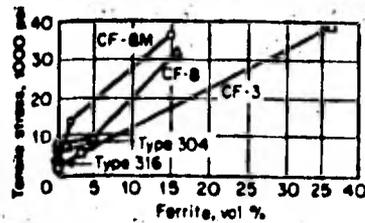


Fig. No. 4.- Efecto de la cantidad de ferrita en función del esfuerzo requerido para conducir el ACBT.

Con la presencia de óxidos a menudo se tiene una pronunciada influencia que tiende a fracturarse. En la figura 5, observamos la combinación de efectos del cloro y oxígeno disuelto, produciendo ACBT en un acero inoxidable tipo 304. Tenemos que, con la presencia de oxígeno disuelto u otro tipo de oxigenación, es crítico en la fractura de los aceros inoxidables austeníticos en solución de cloro; y si el oxígeno es removido, la fractura no ocurrirá.

En la tabla No. 1 se lista un cierto número de sistema medio - aleación en los cuales la fractura ocurre. Constantemente se - - - - -

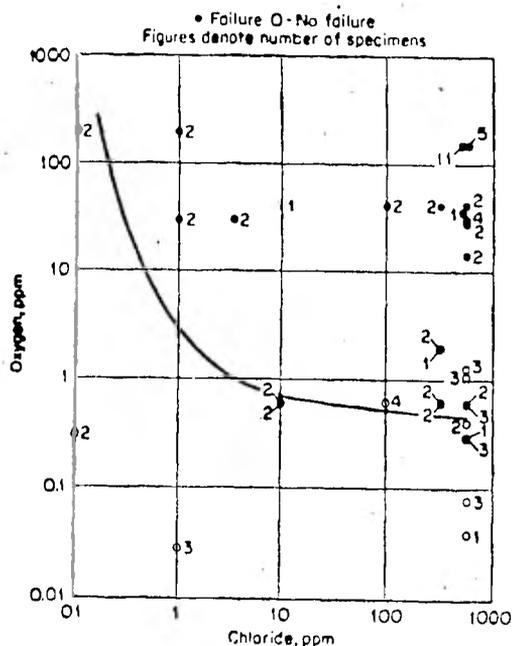


Fig. 5 combinación de los efectos del cloro y el oxígeno disuelto, a la susceptibilidad del ACBT es un acero inoxidable austenítico.

están encontrando nuevos medios corrosivos, los cuales, causan ACBT en varias aleaciones por lo que es siempre necesario y conveniente la evaluación de una aleación, dada, en hacer pruebas de CBT cuando la composición ambiental varia. Esto es usualmente característico de grietas producidas por ambientes en que la aleación muestra un ataque casi despreciable cuando las

condiciones en que se encuentra no está sometida a esfuerzo.

Un caso típico del ACBT se observa en el acero que es frecuentemente atacado en solución de ácido sulfuroso y en soluciones que contienen cianuro, pero estas fallas son indudablemente debidas a la fragilización por hidrógeno que por ACBT. Además, se tiene que con el tiempo, cuando la solución no tiene circulación continua, la concentración puede variar y cambiar las condiciones, lo cual puede acarrear problemas ya sea en beneficio o perjuicio del ACBT. Por ello, al hacer pruebas de laboratorio, hay que tener la concentración de la solución constante para que los valores obtenidos sean representativos al fenómeno a estudiar. La mayoría de las aleaciones susceptibles al ACBT empiezan a agrietarse a unos 100°C.

El estado físico del medio es también importante, ya que, aleaciones expuestas a medios corrosivos homogéneos resisten usualmente más que si estuvieran expuestas a medios intermitentes, como por ejemplo en condiciones intermitentes húmedo/seco.

3.2.3.- ESFUERZO DE TENSION.

El esfuerzo aplicado es otra de las características principales del ACBT, el cual viene íntimamente relacionado con el tiempo de fractura; del cual hablaremos posteriormente.

Se sabe que si aumentamos el esfuerzo aplicado, disminuye el tiempo antes de que ocurra la fractura, como se puede observar en la figura No. 6. Todavía se tiene duda y no se ha llegado a un acuerdo sobre cual es el mínimo esfuerzo requerido para evitar la fractura. Este esfuerzo mínimo depende de la temperatura, de la composición de la aleación y de la composición del medio corrosivo; en algunos casos, se ha observado que el ACBT ocurre a valores cercanos abajo del 10% del punto de fluencia del metal; y en otros casos, la fractura no ocurre por abajo del 70% del punto de fluencia. Para cada combinación medio-corrosivo-aleación, hay la posi

bilidad de que exista un mínimo esfuerzo efectivo para el ACBT o un esfuerzo de entrada que ocasione la fractura. Con éste valor de entrada debe tenerse considerable cuidado en donde las condiciones ambientales pueden cambiar durante el proceso. Esto hay que tenerlo muy en cuenta. Tanto en la práctica como en el laboratorio, es difícil que las condiciones ambientales permanezcan constantes, si no se le tiene el cuidado debido, y aún así, se tienen variaciones.

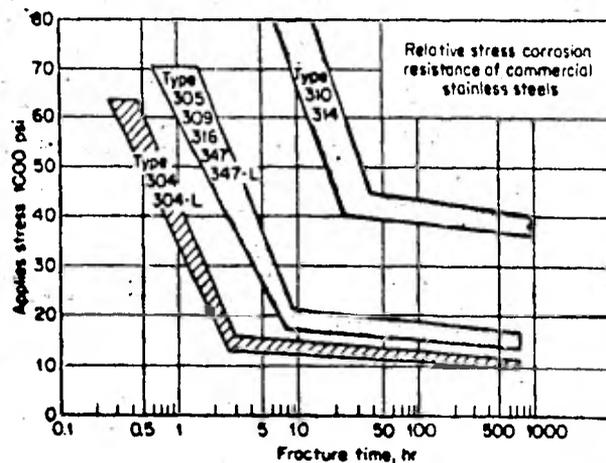


Fig. 6: Resistencia al ACBT de los aceros inoxidable comerciales en función del esfuerzo aplicado y el tiempo de fractura en una solución de $MgCl_2$ hirviendo.

El criterio que se adopta para aplicar esfuerzo en el laboratorio para los casos en donde se quiere que ocurra ACBT, deben ser de magnitud suficiente y adecuada. El esfuerzo de tensión usualmente debe exceder un cierto nivel dependiendo de la relación particular medio-metal para producir ACBT.

Estos esfuerzos pueden ser debidos a diferentes causas:

- a) Carga.
- b) Trabajos en frio.

- c) Desequilibrio en el ensamble (Ejem: Mal remachado).
- d) Tratamientos térmicos.
- e) La acción de depósitos en forma de cuñas de productos de corrosión.
- f) Soldadura.
- g) Acción de esfuerzos residuales en diferentes formas, (Picaduras, cortes terminados en punta, etc.)

Se han observado un sin número de casos de ACBT, en los cuales no se ha aplicado un esfuerzo externamente, como es el caso de los esfuerzos creados por la soldadura, lo cual da origen a esfuerzos residuales cercanos al punto de fluencia.

Estos esfuerzos residuales permanecen en la estructura a menos que el material sea recocido enseguida de la aplicación de la soldadura como es en este caso (pero a veces los esfuerzos residuales también son añadidos por los procesos de fabricación) y la mayoría de los casos esté recocido no es posible. En caso de que sea posible el recocido, hay que tener cuidado con el enfriamiento desde la temperatura de recocido, pues puede inducir a esfuerzos internos a causa de un enfriamiento no uniforme, por lo cual es recomendable un enfriamiento lento.

También se ha observado a los productos de corrosión como otra fuente para producir esfuerzos.

Estos productos de corrosión pueden aumentar entre dos superficies y debido a que éstos ocupan más volumen que el metal del cual fueron formados, producen suficiente esfuerzo para causar ACBT, en la figura No. 7 mostramos una tuerca de aleación de aluminio que falló a causa del ACBT. La humedad actuó debajo de la rosca, entre el tornillo y la tuerca, la cual causó abundantes productos de corrosión, los que aumentaron en el espacio entre la tuerca y el tornillo y provocaron esfuerzos -

de tensión suficientes sobre la tuerca como para causar ACBT.

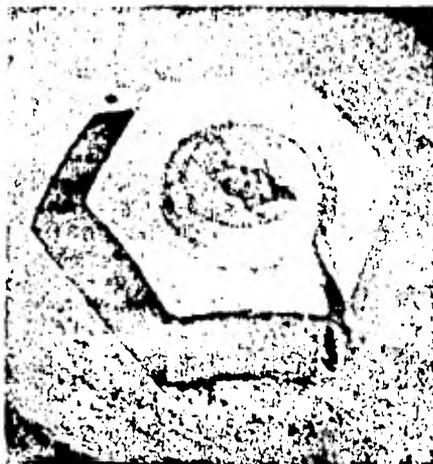


Fig. No. 7.- Agrietamiento por corrosión bajo tensión en una tuerca de aleación de aluminio.

Se ha llegado a la conclusión de que los esfuerzos deben ser de tensión para que exista un agrietamiento, debido a que no se han reportado fallas donde solo existan esfuerzos de compresión. Por lo tanto, se ha encontrado que "poniendo" sobre la superficie de un metal esfuerzos de compresión (por alguna técnica conocida) se puede preveer o retrasar el ACBT.

El término ACBT, implica la formación de grietas y usualmente hay pequeñas pérdidas del metal causadas por la corrosión general asociada a las grietas. Si ocurre una corrosión general muy severa, el ACBT, no ocurrirá. Por ejemplo, la falla de un perno de acero atacado por corrosión hasta que éste no pueda sostener la carga aplicada, no se clasifica como ACBT.

Adicionalmente, se estima que bajo determinadas condiciones los productos de corrosión que se van depositando dentro de las grietas pueden actuar como superficies catódicas.

3.2.4.- TIEMPO DE FRACTURA.

El parámetro "tiempo" es importante en los fenómenos de ACBT - ya que el mayor daño físico ocurre en la última etapa del proceso: durante la CBT., la grieta penetra en el material, el área de la sección efectiva "sana" se reduce y la fractura ocurre finalmente por un efecto puramente - mecánico.

La figura No. 8 muestra la velocidad de agrietamiento en función de la profundidad de la grieta. Se observa que al principio, el crecimiento de la grieta es lento y más o menos constante. A medida que la grieta crece, el área efectiva disminuye y el esfuerzo real aumenta, lo que acelera el movimiento de la grieta hasta llegar finalmente a la fractura - mecánica.

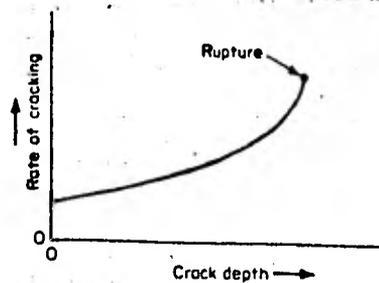


Figura No. 8.- Velocidad de agrietamiento en función de la profundidad de la grieta.

La figura No. 9.- muestra la relación entre el tiempo de exposición y la elongación de la probeta durante la corrosión bajo tensión. Solo en el último momento se abre la grieta y llega a la fractura.

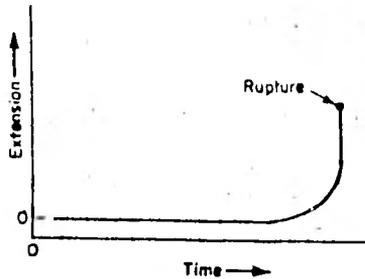


Figura No. 9.- Elongación de la probeta en función del tiempo de exposición.

Las dos figuras anteriores demuestran que no tendrá sentido llevar a cabo pruebas de corrosión bajo tensión de corto tiempo, ya que sólo hay evidencia física y mecánica del agrietamiento en la última fase del proceso de fractura.

3.2.5.- CONCENTRACION DE LA SOLUCION.

En relación la cantidad de un medio corrosivo dado necesaria para que ocurra ACBT., por lo general, no es requisito que se encuentre en grandes cantidades o altas concentraciones, Hay casos en que algunos metales pueden soportar una alta concentración de alguna solución y mientras esté en ese nivel no sucede ningún problema, pero si baja de ese nivel puede suceder que el metal sea entonces susceptible. En otras palabras, la susceptibilidad de un metal al ACBT, muchas veces depende de que la concentración esté variando y no de una alta concentración en la solución.

3.2.6.- TEMPERATURA.

Como sucede en la mayoría de las reacciones químicas, el ACBT, es acelerado por un aumento de la temperatura. En algunos sistemas, tales como en las aleaciones de magnesio, la fractura ocurre por lo general a temperatura ambiente, en comparación de otros sistemas que requieren tem-

peraturas más elevadas, la mayoría de las aleaciones que son susceptibles a la fractura, pueden comenzar a fracturarse abajo de 100°C.

Por ejemplo, en aceros austeníticos en soluciones de cloruro de magnesio ($MgCl_2$); aleaciones de Titanio en ácido clorhídrico (HCl); en aceros de bajo carbono en nitratos, se observa que el aumento de temperatura implica aumento de la sensibilidad a la CBT, al igual que en aceros ordinarios. Sin embargo, en ambiente de ácido sulfhídrico (H_2S) se ha encontrado que el tiempo de fractura de aceros de baja aleación aumenta con la elevación de la temperatura.

3.2.7.- TIPO DE ALEACION.

Se debe tener cuidado al seleccionar la aleación, se deben considerar todas las condiciones en las que va a actuar ese metal, para tener la seguridad de que no va a fallar, existen una gran variedad de tablas en las que se nombran las aleaciones y los medios corrosivos en los que pueden trabajar sin ningún problema, las cuales son de gran ayuda a la hora de seleccionar al metal a emplear. Una aleación es usualmente casi inerte al medio en el cual causa ACBT, hasta que aparezca un agente que active el proceso. Es muy importante el no utilizar diferentes tipos de aleaciones en una misma estructura o equipo porque crea problemas galvánicos.

3.2.8.- ESTRUCTURA METALICA.

El agrietamiento por CBT es siempre macroscópicamente frágil en su apariencia, aún en aleaciones que sean muy resistentes a pruebas de fractura puramente mecánica. (Cortes en los bordes pueden ocurrir en unión con el agrietamiento por C.B.T., pero este corte en los bordes no es parte del proceso de C.B.T. Para ciertos casos, el ACBT es análogo al corte completo en la fractura bifurcada de origen puramente mecánico).

3.2.9.- PLANO DE ESFUERZOS.

Macroscópicamente, la forma de la fractura del A.C.B.T. es usualmente diferente en cada caso aún usando el mismo tipo de aleación

porque se generan diferentes planos de deformación y es según se encuentre el esfuerzo aplicado en ella. Es condición necesaria para el A.C.B.T. que exista un estado de esfuerzo bien localizado en un punto, para crear una zona sensible que pueda dar lugar a la fractura.

En otras palabras, la susceptibilidad aumenta si los esfuerzos son perpendiculares a la dirección del laminado. Esto es más pronunciado en aleaciones de aluminio, como se mencionó anteriormente.

Las aleaciones de gran resistencia, generalmente son resistentes al A.C.B.T., si éstas están sometidas a esfuerzos en la dirección del laminado pero son susceptibles si están sometidas a esfuerzos en la dirección transversal más corta. Para entender mejor esta idea la siguiente figura No. 10 muestra un cuadro generalizado de la microestructura que se espera encontrar de una placa de aleación de aluminio.

Como se mostró en el ejemplo de la figura No. 7 la tuerca de aluminio mostrada había sido maquinada de una barra laminada y fue sometida a esfuerzos por el aumento de los productos de corrosión en la dirección transversal.

Los granos de una aleación de aluminio son mucho más alargados en la dirección del laminado (dirección longitudinal).

Investigaciones recientes indican que si una aleación es susceptible al A.C.B.T., el límite de grano normal a la tensión aplicada está sujeto al mismo ataque en un corrosivo cualquiera que sea su orientación con respecto a la dirección de laminado.

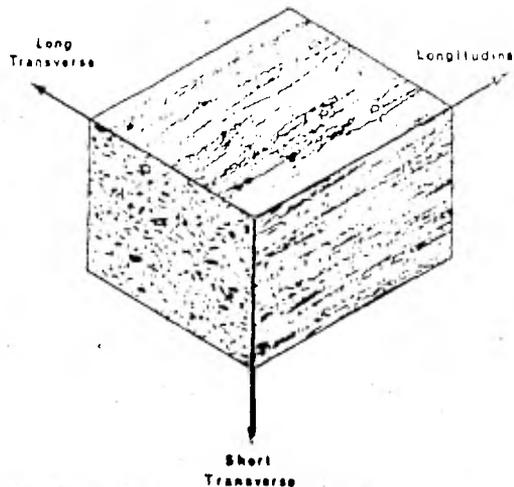


Figura No. 10.- Estructura de grano ilustrando los planos direccionales.

Las regiones de los límites de grano normales al esfuerzo aplicado en la dirección longitudinal son muy pequeñas y no coinciden con la región del límite de grano adyacente que es atacado. Por lo consiguiente, mientras existe un ataque sobre los límites de grano individuales, las regiones atacadas no pueden constituir un camino continuo por el cual avance el proceso corrosivo y el material; por lo tanto es relativamente inmune al A.C. B.T., si los esfuerzos se aplican en esta dirección.

Por otro lado, las regiones de los límites, normales a un esfuerzo aplicado en la dirección transversal corta son mucho más alargados.

Así, una grieta formada sobre el límite de un grano alargado, frecuentemente puede unirse a otra grieta formada en el límite de grano más próximo. Y de este modo se forma una red continua de grietas que hace que una aleación sometida a esfuerzos en la dirección transversal corta falle con esfuerzos mucho más bajos de los que son requeridos para causar una falla en la dirección longitudinal con respecto a la dirección del laminado.

La siguiente figura No. 11 muestra como las grietas pueden unirse para producir una grieta continua con el material sometido a esfuerzos en la dirección transversal.

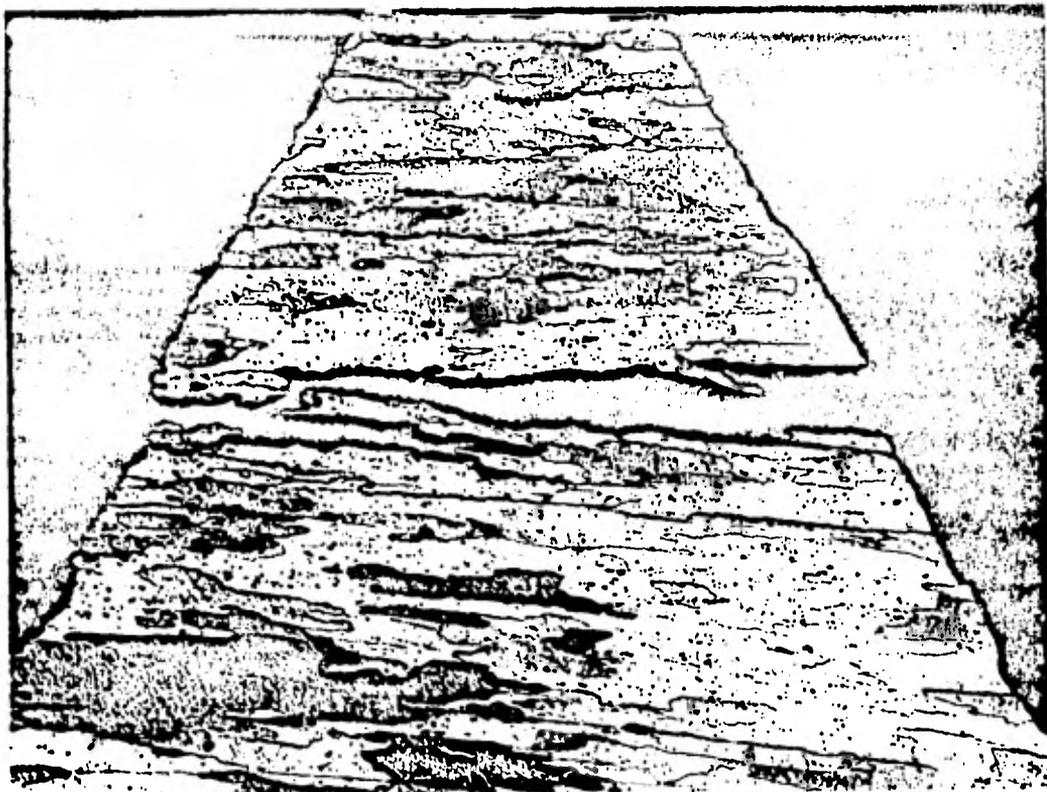


Figura No. 11.- Agrietamiento Inter cristalino. Esfuerzos aplicados en la dirección transversal.

Si el esfuerzo es aplicado en la dirección transversal larga la conformación estructural es más favorable al enlace de límites de grano corroídos que si fuera aplicado en la dirección longitudinal, pero menos favorable que si fuera aplicado en la dirección transversal corta. Por consi

guiente, una aleación soportará más grandes esfuerzos sin fallar por A.C.B.T. cuando se encuentre el esfuerzo en dirección transversal larga, mejor que en la dirección transversal corta, pero con esfuerzos más bajos - que cuando están en la dirección longitudinal.

3.2.10.- ESFUERZOS DE BAJO NIVEL.

En ciertos casos, se observa (en apariencia) que el esfuerzo - aplicado en el principio no es suficiente para que ocurra el A.C.B.T., al menos en ciertos sistemas.

Pero con la acción de las demás variables pueden ser suficiente este esfuerzo para crear la fractura aún siendo éste de bajo nivel. Todo - indica que al crearse una zona bien definida de esfuerzos, éste crece conforme crece la grieta.

Existen aún más variables dentro del A.C.B.T. pero sería muy - difícil hacer mención de todas ellas, ya que muchos solo aparecen en casos muy particulares; por ello al hacer un análisis de algún proceso en especial es conveniente el investigar todas las variables que intervengan en - ese proceso para tener un estudio completo. Si se omite alguna de ellas, - podría suceder que tuviera alguna influencia en especial en el A.C.B.T. y no darnos cuenta de ello.

Con todas estas variables, uno puede clasificar todos los diferentes tipos de fractura existentes, de acuerdo a las características que presenten; ya que en cada una de ellas se observa un sello particular que la distingue de las demás

De esta manera, cuando exista un problema se puede atacar más fácilmente teniendo todos los datos para posteriormente resolverlos acertada y rápidamente.

La presencia de las variables secundarias en el proceso, hacen más interesante el estudio del A.C.B.T. e invitar a seguir investigando - - más profundamente en cada caso de fractura.

3.3.- MORFOLOGIA DE LAS GRIETAS.

Las grietas por C.B.T. tienen la apariencia a simple vista de una fractura frágil (en primera instancia), como podría esperarse de un proceso de corrosión localizado.

Sin embargo, aún cuando el A.C.B.T. no es estrictamente un proceso mecánico, es conveniente el reconocer al proceso y a las características generales de las grietas.

En el proceso de A.C.B.T. se pueden observar dos tipos de mecanismos de falla por fractura:

- a) INTERCRISTALINA.
- b) TRANSCRISTALINA.

Estos tipos de mecanismos en etapas próximas a su desarrollo — son microscópicos. En la mayoría de los casos no se hacen evidentes sobre la superficie expuesta mediante un examen visual normal, y sólo pueden ser detectadas por técnicas especiales.

Las grietas intercrystalinas siguen los límites de grano en el metal. Este tipo de agrietamiento es encontrado comúnmente en aleaciones de aluminio, aceros de bajo carbono y latones. Las grietas adyacentes a la grieta primera causante de la falla, comúnmente están presentes en el metal pero no pueden ser detectadas con facilidad, solamente cuando se hace una — cuidadosa observación metalográfica del metal adyacente a la grieta principal se revelan éstas.

Se ha sugerido como condición necesaria para la propagación intercrystalina la presencia de un precipitado en los límites de grano y el empobrecimiento en elementos aleantes en una región cercana a la matriz ó ambas cosas.

En la siguiente figura No. 12 se muestra una grieta intercrystalina encontrada en el latón.

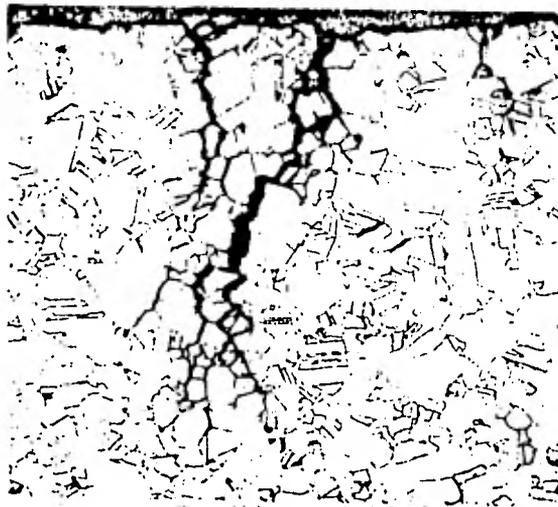


Figura No. 12.- Agrietamiento intercrystalino encontrado en el latón.

En el mecanismo transcristalino las grietas pasan a través de los granos en lugar de seguir sus límites. Datos metalográficos sugieren - que este tipo de fractura sigue planos cristalográficos definidos. El paralelismo de las grietas en un grano y el hecho de que las grietas cambien de dirección a medida que cruzan un límite de grano, sugieren la idea anterior.

La fractura transgranular se ha explicado en algunas ocasiones - como el producto de la no compatibilidad entre granos, resultado de los - esfuerzos que existen entre límites de grano, producidos por la evolución de hidrógeno a alta velocidad.

El agrietamiento de un acero inoxidable (serie 300) en soluciones calientes de cloruro predominantemente es transcristalino.

La siguiente figura No. 13.- Muestra un agrietamiento transcristalino en un acero inoxidable 18% cromo, 8% níquel (tipo 304).

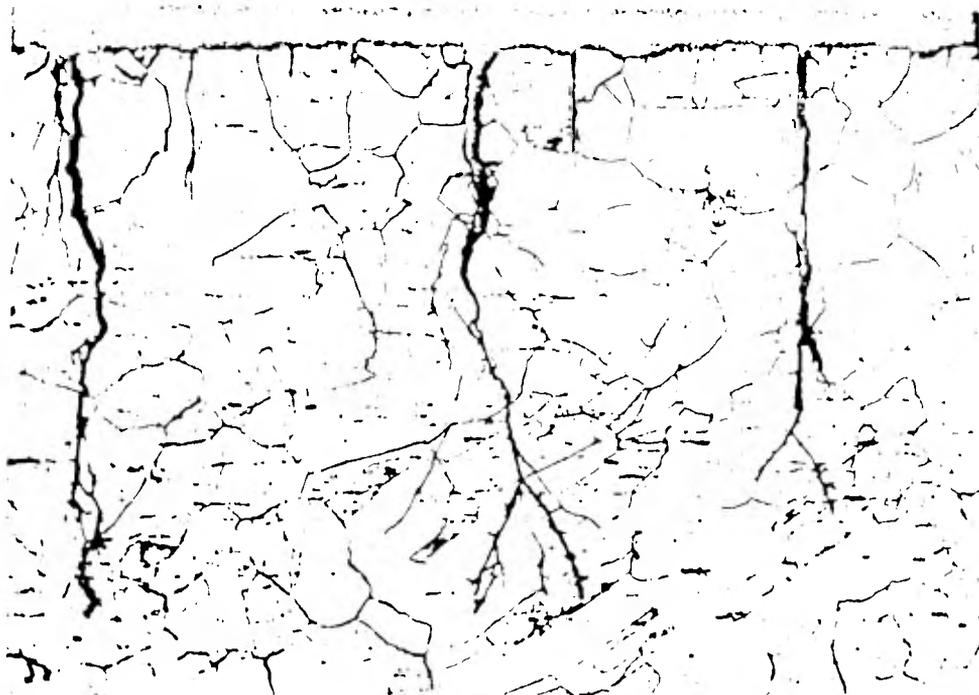


Figura No. 13.- Agrietamiento transcristalino encontrado en un acero inoxidable tipo 304.

El agrietamiento en un metal puede ser predominantemente transcristalino o intercristalino.

Sin embargo, una grieta primeramente transcristalina puede seguir un límite de grano por una corta distancia y viceversa. El agrietamiento en una aleación particular puede ser intercristalino en un medio y transcristalino en otro. De hecho un cambio en la temperatura o PH del medio corrosivo puede cambiar el modo de agrietamiento de una aleación en un medio particular.

En un material de grano muy fino puede ser difícil predecir si el agrietamiento es inter o transcristalino o una combinación de los dos.

3.4.- MECANISMO DEL AGRIETAMIENTO POR CORROSION BAJO TENSION.

Varios mecanismos han sido propuestos, algunos de los cuales involucran una compleja teoría en relación al efecto y presencia de las dislocaciones.

Básicamente, sin embargo, el mecanismo parece ser mecánico-electroquímico. Como se mencionó anteriormente, el A.C.B.T. puede ser acelerado por la aplicación de una corriente anódica y detenido por una corriente catódica (protección catódica). Por lo tanto, podemos asumir que el A.C.B.T. es, en parte por lo menos, electroquímico en naturaleza.

3.4.1.- ASPECTOS ELECTROQUÍMICOS.

En la parte electroquímica del mecanismo se asume que hay al menos una película delgada de electrolito sobre la superficie del metal -- (en muchos casos la superficie esta completamente sumergida en el electrolito) y que las áreas catódicas y anódicas existen sobre la superficie descubierta por la película líquida. Casi sin excepción películas delgadas de óxido se forman casi instantáneamente sobre la superficie de todos los metales expuestos a la humedad. Esta superficie cubierta de óxido es mucho menos activa químicamente que una superficie descubierta o sin película y ésta será el cátodo en un electrolito.

Los ánodos pueden encontrarse en discontinuidades en la película de óxido que está cubriendo la superficie del metal. Pueden ser localizados por ejemplo en aquellas zonas en las que hay mal acomodamiento en el arreglo de átomos (defecto) del metal o como resultado de composición inhomogénea de dicho metal en una área sobre la superficie.

En una de las teorías del mecanismo de A.C.B.T. (mecanismo de ruptura de la película) se postula que los esfuerzos aplicados en aleaciones susceptibles romperán esta película de óxido sobre la superficie del metal. Las superficies libres de esta película son normales al esfuerzo aplicado y muy estrechas comparadas a las superficies cubiertas que las separan. Una superficie libre de película puede ser 0.15 volts o más anódica respecto a una superficie cubierta. Así pues los iones de metal serán disueltas en estos ánodos; la corriente fluirá e los cátodos y el hidróge-

no será descargado ahí. Debido a que los ánodos son muy pequeños comparados con el área catódica, la densidad de corriente será elevada en los ánodos y se formarán ranuras. Entonces se concentran los esfuerzos en los extremos de estas ranuras, evitando así que la película de óxido pueda volverse a formar ahí. A causa de que los esfuerzos efectivos pronto desaparecen sobre los lados de la ranura, una película se formará ahí y de este modo se producen áreas catódicas muy cercanas a los ánodos para acelerar la acción química.

En el caso de A.C.B.T. intercrystalino. el deterioro puede iniciarse en los límites de grano, los cuales pueden ser más activos químicamente que la superficie del grano a causa de una discontinuidad en el acomodamiento de los átomos. Una vez que la microgrieta se forma la concentración de esfuerzos en la punta de la misma causarán que la película se rompa y se dificulta el que se reforme de nuevo como fue discutido antes.

Así, puede haber regiones en un límite de grano, en una aleación que estén agotados en uno o más elementos aleantes y como resultado sean anódicos o catódicos con respecto a la aleación como un todo.

En este caso podemos tener corrosión intercrystalina en ausencia de esfuerzos. Los esfuerzos simplemente acelerarán el ataque pues generan canales para que el medio corrosivo alcance al metal. Tal ataque es algunas veces llamado "Esfuerzos Acelerados" en la corrosión intercrystalina.

Ha sido sugerido también que los esfuerzos pueden producir áreas de composición inhomogénea del metal en las superficies de éstos los cuales podrían formar ánodos. El que tal mecanismo pueda producir la suficiente diferencia de potencial en una solución electroquímica entre tales ánodos y cátodos, como la que es producida por la ruptura de la película, es una cuestión aún inexplicable.

Así, el A.C.B.T. puede ser iniciado y propagado al menos en parte por un mecanismo electroquímico.

3.4.2.- ASPECTOS MECANICOS.

A medida que la grieta formada por corrosión bajo tensión y propagada por acción predominantemente electroquímica penetra dentro del material, la concentración de esfuerzos aumentará en la punta de la grieta hasta que haya suficiente energía disponible para iniciar el agrietamiento mecánico. Se requiere esta energía para formar nuevas superficies y de formar el material en la punta de la grieta. (La energía para formar nuevas superficies es muy pequeña comparada con la que se necesita para deformar el material en la punta de la grieta.)

El material deformado (endurecido por trabajo) llega a ser más difícil de fracturarse mecánicamente y la grieta propagada mecánicamente se detiene, (la energía disponible es consumida como resultado de la concentración de esfuerzos). El proceso electroquímico de nuevo toma su lugar, aumentando la concentración de esfuerzos en la punta de la grieta y el proceso entonces se repite.

La siguiente figura No. 14 demuestra que la propagación de la grieta fué en parte mecánica.

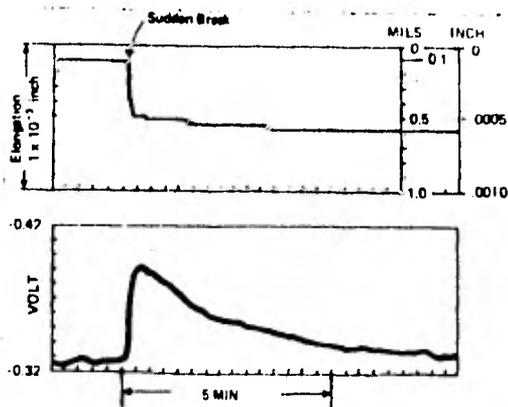


Figura No. 14.- Demostración de la propagación mecánica.

La curva superior es una gráfica de la elongación de una probeta de acero de bajo carbón ranurada, expuesta en una solución hirviente al 20% de $\text{NH}_4 \text{NO}_3$ (Nitrato de Amonio). El rompimiento de la curva indica que una pequeña fractura mecánica había ocurrido. Si el agrietamiento fuera pu mente electroquímico, la curva debería descender lenta y uniformemente sin un rompimiento repentino.

En la curva inferior se registro simultaneamente con la elongación, la curva del potencial de la probeta en la solución. El cambio de po tencial, aproximadamente 0.08 volt. que ocurre con la repentina elongación de la probeta, confirma la idea de que ahí tiene lugar una fractura mecánica. Esta fractura expuso al metal descubierto (sin película de óxido) - al medio corrosivo haciéndolo mucho más reactivo que el metal cubierto con la película, el cual fué desgastado. Esto explica el repentino cambio de - potencial.

Ahora, hablaremos acerca del material que se selecciono para llevar a cabo las pruebas en el laboratorio, nos referimos a los Aceros Inoxidables.

3.5.- CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

Una clasificación muy común dentro de estos aceros es la siguiente: Aceros Austeníticos, Ferritos y Martensíticos de los cuales en la siguiente tabla No. 3 mostramos su composición química.

Como ya se ha mencionado, uno de los más serios problemas de ACBT. es el agrietamiento de los aceros inoxidable austeníticos (series 200 y 300).

La serie 200 contiene de 16 a 18% de cromo con una cantidad apreciable de manganeso y cerca del 5% de níquel como aleantes elementales.

Steel	Composition, %						Other	
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo		V
High strength H11	0.40	0.30	0.90		5.00		0.5	
200 series ⁽¹⁾								
201	0.15	5.5-7.5	1	3.5-5.5	16-18			Max N 0.25
202	0.15	7.5-10	1	4-6	17-19			Max N 0.25
300 series ⁽¹⁾								
301	0.15	2	1	6-8	16-18			
304	0.08	2	1	8-12	18-20			
310	0.25	2	1	19-22	24-26			
316	0.08	2	1	10-14	16-18	2-3		
321	0.08	2	1	9-12	17-19			Min Ti 5 x C
347	0.08	2	1	9-13	17-19			Min Cb + Ta 10 x C
400 series								
410 ⁽¹⁾	0.15	1	1		11.5-13.5			
420	0.15	1	1		12-14			
422	0.20	0.65	0.50	0.75	12	1	0.3	W 1
431	0.20	1	1	1.25-2.50	15-17			
436 ⁽²⁾	0.16	0.41	0.39	2.10	12.67	0.18		W 3.04
Precipitation hardening								
AM 350	0.10	0.75	0.35	4.25	16.50	2.75		N 0.10
AM 355	0.13	0.85	0.35	4.25	15.50	2.75		N 0.12
Maraging 18% Ni	0.03	0.15 Mn + Si max 0.20	0.15	17-19		4.6-5.1		Co 7-9, Ti 0.3-0.5, Al 0.05-0.15

Tabla No. 3.- Composición Química de los Aceros Inoxidables.

La serie 300 contiene también 17% o más de cromo y 7% o más de níquel. Este tipo de acero es comúnmente usado en intercambiadores de calor en la industria química y petroquímica. Estos son susceptibles al -- ACBT en agua conteniendo cloruros a temperaturas superiores de 160° a 170° F (de 71° C a 77°C). Las discontinuidades donde los cloruros pueden concentrarse, especialmente si están localizadas en una región donde haya esfuerzos residuales, constituyen el lugar preferente para el desarrollo de grietas producidas por corrosión bajo tensión. Este tipo de fallas no serán tan catastróficas, como aquellas que se provoquen en un gasoducto o la explosión de una caldera, Sin embargo, provocarán un reemplazo de equipo - muy costoso, períodos de paralización de trabajo y pueden causar pérdida -

de producto.

Existe una pequeña diferencia en la resistencia al ACBT de las series 200 y 300 en presencia de cloruros. Existe acuerdo general en cuanto a la existencia de ACBT dentro de la serie 300, ya que si se desarrollara un agrietamiento en, por ejemplo un tipo 304 (18% cromo, 8% níquel) - expuesto a un medio dado, otro tipo de acero 316, 321, 347, etc. probablemente no será más resistente. Sin embargo un acero más aleado, por ejemplo el tipo 310, (25% cromo, 20% níquel), también fallará en este medio, pero — después de un período más largo de exposición.

Para determinar si un acero inoxidable austenítico es o no susceptible al ACBT, se está usando la prueba con cloruro de magnesio hirviendo. Este corrosivo generalmente es una solución de cloruro de magnesio al 42% en peso, pero a causa de una posible variación del $MgCl_2$ (puesto que se — presenta como $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$), para una mejor práctica se recomienda ajustar la concentración hasta que la solución hierva a 310° F (150°C). Las probetas sometidas a esfuerzo de tensión (como las dobladas en forma de "U" o por otros procedimientos) son colocadas en la solución hirviendo hasta que la falla ocurre. En la mayoría de los casos la falla ocurre en unos pocos minutos o a lo máximo en unas pocas horas.

Se han usado varios esquemas para prevenir el ACBT de estos aceros en contacto con cloruros. Uno de los métodos, es el buen diseño de — equipo así como el de eliminar discontinuidades en donde los cloruros pueden concentrarse. En los sistemas cerrados en donde el agua es recirculada, se — han hecho esfuerzos para conservar el contenido de cloruros y de oxígeno en el agua a menos de 1 ppm. (ppm = partes por millón).

El ACBT. también se presenta en otros medios en los aceros inoxidables austeníticos de la serie 300 como lo es en las soluciones calientes de sosa caústica concentrada.

Se han encontrado también fallas en la estructura de estos -- aceros en las refinerías de petróleo durante los períodos de paralización de trabajo, las que han sido atribuidas a ácidos polftionicos ($H_2SNO_6, n=$ de 2 a 5). El ácido polftionico se forma sobre las superficies de las unidades de la refinería, en las cuales se acumula una capa de sulfuro. Estos ácidos se forman a temperaturas atmosféricas normales, a condición de que el aire, oxígeno y humedad estén también presentes.

Se ha reportado que el agrietamiento es transcristalino (como lo es en el caso de cloruros) si el acero esta en la condición de recocido, pero será intercristalino si el acero ha sido sensibilizado; por ejemplo, calentado 1 hora de 1200 a 1300°F (650 a 700°C) o bien por períodos más -- largos a temperaturas más bajas.

Una técnica recomendada para prevenir este tipo de falla en ácido polftionico (una vez que la unidad este fuera de servicio) consiste en lavar la unidad con una solución alcalina (equivalente a no menos de 500 ppm de NH_3) y entonces llenar la unidad con nitrógeno para prevenir que -- el oxígeno del aire entre en contacto con el ácido sulfhídrico y se forme el ácido.

Dentro de la clasificación de los aceros inoxidable ferríticos -- y martensíticos, se encuentra los de la serie 400 (ver composición en tabla No. 3). Algunos de éstos se pueden endurecer por tratamientos térmicos Ninguno de la serie 300 pueden ser endurecidos por estos procedimientos.

En estudios recientes se han reportado fallas de dos de estos aceros (tipo 410 y 431) en los medios de un reactor nuclear.

En otro estudio se encontró que la resistencia de un número de estos aceros (410, 420, 422 y 436) a la falla, depende de la temperatura -- a la cual fueron templados durante el tratamiento térmico. Los aceros templados en el rango de 700 a 1100°F (370 a 600°C) fueron más susceptibles

a fallar que aquellos templados a una temperatura más alta o más baja. Probetas templadas a 900°F (485°C) fueron más susceptibles a fallar.

Ahora, nos podemos preguntar si las fallas cuando ellas ocurren en estos tipos de acero, resultan de un ACBT o por fragilización por hidrógeno o por una combinación de los dos.

Algunos de estos aceros son susceptibles al ACBT en una solución hirviente de $Mg Cl_2$ al 42%, corrosivo que produce agrietamiento en la serie 300.

Mientras que los aceros de la serie 300 no se consideran susceptibles a fragilización por hidrógeno, algunos aceros de la serie 400 particularmente aquellos endurecidos por tratamiento térmico, así lo son.

Esto se puede demostrar por la exposición de probetas sujetas a esfuerzo en soluciones de cloruro conteniendo pequeñas cantidades ya sea de sulfuros o de un compuesto de selenio. El agrietamiento en estas soluciones indica susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno. Se han hecho tentativas para determinar si las fallas son debidas a fragilización por hidrógeno o por CBT con la aplicación de corrientes impresas anódicas o catódicas en probetas sometidas a esfuerzos en soluciones de cloruro (con ningún compuesto de sulfuro o selenio presentes).

Sin embargo, resultaron en más de un caso, no concluyentes. Se tiene conocimiento de que las corrientes anódicas impresas tienden a acelerar el ACBT y las corrientes catódicas (protección catódica) a inhibir el ACBT. Lo contrario es esperado para fragilización por hidrógeno. O sea, la protección catódica aceleraría la fragilización por hidrógeno y no deberá ser usado con los aceros de la serie 400 ó con algunos aceros de gran resistencia.

En general, la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables se debe a la formación, en las superficies de los mismos, de una -

película pasiva. Se forma esta película siempre que el medio que rodea al acero es capaz de ceder oxígeno.

El hierro, níquel y cromo son los tres elementos base de estos aceros, siendo el cromo el elemento que mayor influencia tiene respecto a la resistencia a la corrosión, ya que todas las aleaciones de este metal adquieren la propiedad de "pasividad estable". No todos los investigadores están de acuerdo en cuanto a la composición de la película pasiva, pero en general se acepta que se trata de óxidos formados por el oxígeno y el metal base.

Haremos un breve resumen de la influencia en la resistencia a la corrosión de algunos de los distintos elementos que intervienen en los aceros inoxidable.

CARBONO.— La influencia del carbono en la resistencia a la corrosión depende del estado en que se encuentre dentro del acero. Si está uniformemente repartido en la estructura del acero su influencia será mucho menos nociva que si se encuentra en forma de carburos. Se considera que los carburos y el resto de la matriz pueden formar pares galvánicos al ser de distinta composición. Además, los carburos hacen que la película pasiva sea discontinua.

MANGANESO.— En cantidades inferiores al 1% tiene muy poca influencia en la resistencia a la corrosión, pero en cantidades de 8 a 10% hace que en los aceros se consigan estructuras austeníticas que favorecen sensiblemente la resistencia a la corrosión.

SILICIO.— Adiciones de silicio de 0.5 a 1% mejoran la resistencia a la corrosión en ciertos ácidos, pero su mayor influencia radica en la resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas.

CROMO.— Como ya lo hemos mencionado, es el elemento que mayor importancia tiene respecto a la resistencia a la corrosión.

NIQUEL.- Es el elemento más importante que interviene en estos aceros, después del cromo, En general (salvo excepciones muy raras) aumenta la resistencia a la corrosión al reforzar el efecto pasivante del cromo:

MOLIBDENO.- Tiene una influencia similar pero menos intensa que la del cromo. Reduce la corrosión por picaduras en soluciones cloradas.

<u>SAL</u>	<u>CONCENTRACION, % PESO</u>	<u>TEMPERATURA, °C</u>
Cloruro amónico	30	Ebullición.
Cloruro cálcido	37	Ebullición.
Cloruro de cobalto	Saturado	100
Cloruro de litio	30	Ebullición.
Cloruro de magnesio	40 (pH4)	104
Cloruro de magnesio	60 (pH 4,4)	116
Cloruro de magnesio	42	154
Cloruro mercúrico	10	Ebullición.
Cloruro sódico	Saturado	100
Cloruro de cinc	54	Ebullición.

Tabla No. 4.- Algunas soluciones cloradas que pueden producir agrietamiento por corrosión bajo tensión en los aceros inoxidables.

Para eliminar las tensiones residuales, uno de los medios más eficaces es el de someter a los aceros a un "tratamiento de eliminación de tensiones".

Para los aceros austeníticos será suficiente conseguir una temperatura superior a los 880°C, siempre que vayan estar expuestos en los medios clorados más comunes.

3.6.- CARACTERISTICAS DE LOS ACEROS USADOS EN EL LABORATORIO.

Mencionamos algunas características de los dos tipos de aceros usados en laboratorio (tipo 304 y 316).

3.6.1.- CARACTERISTICAS DEL ACERO INOXIDABLE TIPO 304.

Cuando se le mantiene a temperaturas comprendidas entre 450 y 900°C se provoca una precipitación de carburos que lo hacen sensibles a la corrosión intergranular. Estos carburos precipitados podemos disolverlos -

de nuevo con un temple austenítico (hipertemple).

Este problema aparece en las soldaduras, precipitándose los carburos en las zonas cercanas al cordón donde la temperatura está comprendida entre 450 y 900°C. Por ello, su empleo queda limitado a aquellas piezas que posteriormente puedan recibir un temple austenítico (hipertemple)

La soldadura es posible con todos los procedimientos pueden realizarse bajo llama oxiacetilénica y por resistencia; para espesores pequeños pueden emplearse la soldadura al arco sin metal de aporte y baja atmósfera de argón puro. Para espesores grandes, el mismo procedimiento con hilo de aportación o soldadura con electrodos revestidos. Las soldaduras deberán ser decapadas y pasivas para evitar focos de corrosión. Mantienen buenas resilancias a temperaturas bajo cero. La estructura de este acero es austenítica a todas las temperaturas. Es amagnético.

3.6.1.1.- TRANSFORMACIONES EN CALIENTE.

De 1,175 a 850°C con enfriamiento al aire. La temperatura dependerá del grado de deformación. Para grandes reducciones puede elevarse la temperatura inicial hasta 1250°C. Por su baja conductividad térmica es necesario darle mayor permanencia que en el caso de los aceros comunes.

3.6.1.2.- TRATAMIENTOS TERMICOS.

Con un temple austenítico (hipertemple) entre 1,030 y 1,100°C disolveremos los carburos precipitados. El enfriamiento se hará en agua. - Cuando las piezas a tratar sean de acero moldeado es conveniente aumentar en unos 50°C, la temperatura de temple austenítico. Con este tratamiento la estructura estará básicamente formada por austenita, aunque pueden aparecer pequeñas cantidades de ferrita. Esto dependerá de la composición química, de la temperatura del tratamiento y del enfriamiento.

3.6.2.-CARACTERISTICAS DEL ACERO INOXIDABLE TIPO 316.

Comparándolo con el acero 304 y debido al contenido de molibde-

no, su resistencia a la corrosión es superior, sobre todo frente al ácido sulfúrico, a los cloruros y a los ácidos orgánicos.

También es más resistente en presencia de agua de mar y en medios atmosféricos, pero es menos resistente el ácido nítrico en ebullición. Es menos sensible a la corrosión por picaduras ante los vapores del ácido-acético y soluciones de cloruros, yoduros y bromuros.

Cuando se le mantiene a temperaturas elevadas, entre 450 y 900° C, se provoca una precipitación de carburos que lo hacen sensible a la corrosión intergranular. Estos carburos precipitados podemos disolverlos de nuevo con un temple austenítico (hipertemple) teniendo las mismas características que se mencionaron para el tipo 304.

3.6.2.1.- TRANSFORMACIONES EN CALIENTE.

De 1,150 a 900°C con enfriamiento en aire. La temperatura inicial dependerá del grado de deformación. Para grandes reducciones puede elevarse la temperatura inicial hasta 1225°C, pero las permanencias deberán ser cortadas para que la formación de ferrita sea la menor posible ya que ésta dificulta la transformación en caliente.

Por su baja conductividad térmica es necesario darle mayores permanencias que en el caso de los aceros comunes.

3.6.2.2.- TRATAMIENTOS TERMICOS.

Con un temple austenítico entre 1,050 y 1,120°C disolveremos los carburos precipitados. El enfriamiento se hará en agua.

Con este tratamiento la estructura estará formada básicamente por austenita aunque pueden aparecer pequeñas cantidades de ferrita. Esto dependerá de la composición química, de la temperatura del tratamiento y de su enfriamiento.

3.7.- METODOS DE PREVENCION DEL ACBT.

Este tema no quedaría completo si no mencionáramos los métodos

que existen para la prevención de este tipo de falla. El término ACBT sugiere inmediatamente que debemos evitar la aplicación de esfuerzos o de un medio corrosivo. Pero cuando el material se encuentra en servicio es generalmente imposible evitar cualquiera de estas condiciones.

Como se mencionó anteriormente, las fallas no ocurren comúnmente solo por los esfuerzos aplicados, sino cuando éstos son superpuestos como esfuerzos residuales presentes en el material producto de los procesos de fabricación. También se señaló que los esfuerzos efectivos deberán ser de tensión o tener un componente de tensión.

Los esfuerzos residuales pueden ser removidos por un recocido de la estructura, como se hace ahora en la manufactura de los cartuchos de bronce.

Algunas veces lo voluminoso de la estructura, su futuro empleo o la economía pueden hacer que el recocido sea impráctico. Se ha sugerido frecuentemente que las superficies expuestas del material sean puestas en compresión por un proceso conveniente, ya sea por rolado, por chorro de perdigones o algún otro similar. Esto deberá ser efectivo a menos que el medio corrosivo penetre a través de las capas que se hallan en compresión en la superficie hacia las capas subyacentes que han sido puestas en tensión para balancear la capa compresiva superficial.

Si los esfuerzos de tensión no pueden ser evitados, el siguiente paso es ver que se puede hacer con el medio corrosivo, ya que, muchas veces, es posible prevenir el ACBT por la modificación del medio. Hemos ya mencionado varios ejemplos.

Uno de ellos es el mantener los niveles de oxígeno, cloruros y de agua en partes por millón dentro de un sistema cerrado de un intercambiador de calor de acero inoxidable operando a altas temperaturas. Otra es lavando las unidades de una refinería con una solución alcalina cuando

ellas estan "fuera de servicio" y entonces interferirlas con nitrógeno para evitar la formación de ácidos politónicos.

Uno más, es el uso de aleaciones de níquel 400 (monel) conservan^{do} las completamente sumergidas y de este modo evitar su exposición al aire, humedad y vapores ácidos en el servicio de ácido fluorhídricos.

El ACBT de estas aleaciones ocurre bajo ciertas condiciones, - las cuales pueden ser descritas por dar casi, pero no del todo una inhibición completa. Sin embargo se han hecho grandes esfuerzos en la investigación de inhibidores para prevenir el ACBT. Los inhibidores pueden actuar - ya sea para cambiar el medio (como por ejemplo, cambiando el pH) o bien - pueden producir una barrera, formando una capa protectora tal como una película protectora de óxido, entre el metal y el corrosivo. Muchos inhibidores actuan en ambos sentidos.

También se ha trabajado bastante para lograr inhibir el agrietamiento de los aceros inoxidables austeníticos (tipo 300) en cloruros a temperaturas elevadas. Los datos indicarian a que temperaturas de 500°F - (260°C) y un pH (2.8) el agrietamiento es difícil de inhibir con cromatos o fosfatos. Con un pH de 6.5, una relación de 5 cromatos a 1 de cloruros no es particularmente efectivo, mientras que una relación de 10 a 1 si lo fué, en pruebas de laboratorio. Con un pH de 10.5 (temperatura de 570°F ó 300°C) una relación de 3 a 1 inhibió el agrietamiento. Otros investigadores reportarón que a 390°F (200°C) una relación de 100 ppm de fosfato a 100 ppm de cloruro era efectiva para 2000 horas.

Otros reportan que ciertos inhibidores orgánicos eran efectivos en prevenir el agrietamiento de un acero 18% Cr y 10% Ni en una solución hirviente de Mg Cl₂.

Si los inhibidores no pueden ser usados, otro método posible de control es cubrir (con pintura) el metal para prever que el corrosivo entre

en contacto con el metal. En muchos casos una buena pintura de trabajo -- previene el ACBT. Por ejemplo, se ha reportado que pintura con silicón aplicada en la superficie exterior de una tubería de acero inoxidable llevando líquidos calientes antes de que fuera cubierta con aislante, previno el agrietamiento por cloruros disolviéndolos fuera del aislante.

La pintura se ha sugerido como un recubrimiento protector para aceros de gran resistencia. El electrochapado de estas partes con cadmio, zinc u otros materiales también se ha considerado. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el hidrógeno es enchapado junto con el metal, y esto, a menos que sea subsecuentemente removido por un calentamiento en horno, puede conducir a fallas por fragilización por hidrógeno.

En atmósferas marinas (costas) a industriales, un recubrimiento de aluminio aplicado a alta temperatura se encontró que es el mejor recubrimiento para un acero de alta resistencia con 5% de Cr.

En otra investigación 3 tipos de recubrimientos fueron aplicados a una serie de aceros de gran resistencia. Estos fueron: (1) un recubrimiento de poliuretano que actuó como una barrera entre el corrosivo y el acero; (2) un recubrimiento inorgánico de zinc que protegió al acero por una protección catódica; (3) un inhibidor epóxico similar al que se señaló al principio, que actuó como una barrera para el corrosivo y que contiene un cromato que actúa como un inhibidor. Se encontró que aunque los resultados no fueron consistentes de un acero a otro, el recubrimiento inorgánico de zinc resultó ser el más pobre en todos los casos y actualmente acelera la falla en los aceros maraging.

Ya se mencionó que al menos en el laboratorio, el agrietamiento puede ser prevenido o una vez iniciado, detenido por la aplicación de una protección catódica. Y por otro lado, la protección catódica acelerará la fragilización por hidrógeno en aceros en los cuales esto ocurre. Esto pro-

bablemente fué la razón para el principio de la falla de los aceros maraging cubiertos con el recubrimiento inorgánico de zinc mencionado anteriormente. El zinc en este caso fué el ánodo en un sistema de protección catódica.

Cuando se encuentran presentes esfuerzos residuales y un medio corrosivo en un sistema dado, entonces se debe considerar la posibilidad de un cambio en el diseño. La primera consideración en el nuevo diseño sería evitar si es posible las regiones de grandes esfuerzos residuales. La segunda consideración sería evitar a toda costa las condiciones que harían posible la concentración del corrosivo en una área sometida a esfuerzos. Esto es particularmente importante si la estructura es construida de un acero inoxidable austenítico. Las ranuras en los tubos de un intercambiador de calor son regiones en las cuales los cloruros pueden concentrarse.

También, cuando se permiten en el diseño condiciones intermitentes de humedad y secado de las estructuras de acero inoxidable pueden conducir a la falla.

Finalmente, si los esfuerzos residuales no pueden evitarse, si el medio no puede ser cambiado, o si las superficies de la estructura no pueden ser protegidas por recubrimientos, se debe entonces considerar un material no susceptible al agrietamiento en ese medio. Algunas veces esto se puede hacer por el uso de una aleación con un contenido mayor de un constituyente.

Algunas veces, más de una de las técnicas mencionadas, es usada para resolver el problema de corrosión bajo tensión.

Por ejemplo, la solución al problema mencionado de la figura No. 7 de la tuerca de aluminio, fue recubrir el tornillo con un primer (recubrimiento primario) de cromato de zinc, antes de reemplazar la tuerca, lo cual bloquearía la penetración de la humedad; el cromato sirve como inhibidor, -

recubrir la parte que no falló con un barniz limpio para conservarlo sin contacto con la humedad y, para una nueva instalación usar una aleación resistente.

CAPITULO CUARTO

PRUEBAS DE CORROSION

Como ya se ha mencionado la corrosión consiste, esencialmente, en las reacciones que pueden producirse entre un metal y el medio ambiente que lo rodea, afectando y viéndose afectada por ambas fases; por consiguiente, el comportamiento ante la corrosión es una propiedad conjunta del metal y del medio ambiente al cual está expuesto. Así pues, cuando en una prueba de corrosión se trate de establecer condiciones satisfactorias de exposición, al no existir un ensayo válido para todos los fines que se deseen, es necesario considerar y controlar debidamente todos y cada uno de los factores relacionados con ambas fases.

4.1. CLASIFICACION DE LAS PRUEBAS DE CORROSION

Es posible clasificar las pruebas de corrosión en cuatro categorías.

- 1.- Pruebas a Escala de Semi-Planta o Planta-Piloto.
- 2.- Pruebas de Planta o de Servicio.
- 3.- Pruebas de Campo.
- 4.- Pruebas de Laboratorio.

Dentro de estas cuatro categorías, se puede decir que la mejor y la más adecuada son las pruebas de Semi-Planta o Planta-Piloto en las cuales se pueden reproducir más fácil y exactamente las condiciones de la planta, pero en escala reducida. Se hace la prueba durante un tiempo suficiente para obtener buenos resultados. Conviene mencionar aquí la importancia de considerar aspectos de corrosión desde el inicio de la planeación de la planta, para evitar problemas mayores cuando ocurren problemas de corrosión en un estudio más avanzado del diseño.

Una colaboración estrecha entre el ingeniero de "corrosión" y de más miembros del equipo de planeación es de suma importancia.

Las pruebas en Planta o en Servicio, sólo pueden efectuarse cuando hay una planta disponible y que esté trabajando. En esas pruebas se evalúa mucho más exactamente el comportamiento de los materiales en un caso concreto y en función de los cambios de los parámetros del medio corrosivo.

La secuencia ideal y lógica para las pruebas de una nueva planta es la siguiente:

a) Pruebas de laboratorio que demuestren cuales materiales son totalmente insatisfactorios y cuales merecen mayor consideración.

b) Pruebas de planta piloto sobre probetas y sobre elementos como válvulas, bombas, intercambiadores de calor, etc..., de los materiales seleccionados en el inciso anterior.

Desafortunadamente, en muchas ocasiones no se trabaja en esa secuencia y las consecuencias son a menudo desastrosas.

Las pruebas efectuadas en el campo se hacen bajo condiciones de servicios naturales.

En las pruebas de laboratorio se usan probetas pequeñas y cantidades reducidas de medio corrosivo. Se simulan las condiciones de servicio tanto como sea posible, por ejemplo, utilizando directamente los productos y líquidos de la planta o del ambiente corrosivo. Los ensayos de laboratorio sólo sirven para una primera selección de materiales.

A veces se construyen equipos a base de estos datos y los resultados son catastróficos.

En este tipo de pruebas es donde enfocamos nuestro estudio y - de lo cual hablaremos más extensamente.

Los ensayos de corrosión pueden proyectarse para obtener resultados cualitativos o cuantitativos o ambas cosas a la vez, y se pueden - clasificar como sigue:

- 1.- Ensayos de rutina para comprobar el logro de un determinado standar de calidad del metal o del medio corrosivo; en ambos casos, la reproducibilidad de los resultados tiene generalmente más importancia que la simulación exacta de las condiciones en que se produce la corrosión.
- 2.- Ensayos de comparación de diferentes metales, para seleccionar el más apropiado para un determinado fin, o para valorar un metal nuevo en relación con otro cuyo comportamiento en servicio sea ya conocido.
- 3.- Estimación de la vida de un metal en condiciones de servicio dadas. Para este fin se requiere, generalmente, la calibración del ensayo en relación con el comportamiento durante la utilización, o la inclusión de ciertas muestras de control cuyo comportamiento ya se conoce.
- 4.- Determinación de los diferentes tipos de medio ambiente y - condiciones en los cuales pueda usarse satisfactoriamente - un determinado metal.
- 5.- Pruebas para la obtención de aleaciones nuevas, con una resistencia a la corrosión adecuada o máxima. Para este fin se requiere especialmente la adaptación del laboratorio a las mismas.

6.- Ensayos para el estudio del mecanismo de la corrosión en general, o de un metal o aleación determinado, en particular.

Se ha establecido una interesante analogía entre los ensayos de corrosión y los ensayos mecánicos, señalando asimismo que las tensiones que frecuentemente se imponen a un metal en el uso práctico no son exactamente similares, cuantitativa e incluso cualitativamente, a las de los ensayos de tensión a las que el metal se haya sometido en el laboratorio. Si las diferencias existentes fueran grandes y aproximadamente definibles, pueden emplearse otros tipos de ensayos, tales como los de torsión y fatiga, pero frecuentemente éstos se utilizan menos que los de tensión. Por otra parte; los ensayos de tensión, en determinadas condiciones, no predicen el comportamiento del metal bajo condiciones más amplias. Por ejemplo; la fragilidad del acero a temperaturas bajas, no se revela por medio de pruebas a temperaturas normales.

Una aplicación importante de un ensayo de tracción es indicar si una determinada muestra tiene la calidad media necesaria para dicho ensayo, pudiendo tomarse cualquier desviación del resultado medio como advertencia de que el metal no es normal y puede, por consiguiente, conducirse anormalmente en el servicio. De hecho, el ensayo de tensión se ha ido desarrollando gradualmente y se ha seleccionado de una manera un tanto arbitraria para uso general a causa de la conveniencia razonable, reproducibilidad y valor acumulativo.

Hoy en día, no obstante, se reconoce que ninguna prueba puede definir exactamente todas las propiedades mecánicas de un metal, pero también se afirma que una prueba bien llevada puede proporcionar información suficiente respecto a muchas aplicaciones, aunque para ciertos casos se

requieren pruebas especiales en el éxito que pueda obtenerse en la práctica, representa un papel muy importante la experiencia adquirida respecto al comportamiento en el uso de estructuras proyectadas a base de esta información limitada, y esta experiencia se resume en el coeficiente de seguridad que utilizan los proyectistas, variando el valor del coeficiente con el tipo de estructura y sus condiciones de servicio.

Similarmente, ninguna prueba de corrosión puede predecir la conducta de un metal en cada una de las condiciones de corrosión posibles a las que pueda estar sometido en el uso industrial. Si cualquier aleación durante el servicio, debe estar sometida a un determinado tipo de atmósfera, el desarrollo inicial de la aleación, en el laboratorio, debe a su vez someterse a una serie de pruebas que representen los diferentes tipos de atmósfera (marina, industrial, tropical, rural, etc.)

Al hablar de los factores que pueden influir en la velocidad de corrosión obtenida por medio de soluciones acuosas, es útil y necesario determinar y separar, hasta donde sea posible, los factores que están principalmente asociados con el metal y los que están relacionados con el medio ambiente. Mencionamos a continuación los factores que se relacionan principalmente con el metal:

- 1.- El potencial de electrodo del metal en condiciones particulares consideradas.
- 2.- El estado de agregación del metal, incluyendo el carácter y tamaño del cristal, la presencia de poros y grietas y la naturaleza de la película superficial (incluyendo las que se forman durante la corrosión).
- 3.- La ausencia de tensiones internas o externas.

- 4.- El sobrevoltaje (en los casos en que puede desprenderse gas hidrógeno).
- 5.- La naturaleza y concentración de los elementos en solución sólida en el metal, teniendo también en cuenta las zonas vacías de dichos elementos.
- 6.- La presencia de fases diferentes en el metal, y su distribución (bien sea como soluciones sólidas o como segregados o inclusiones no metálicas).

Los siguientes factores se relacionan con el medio ambiente:

- 1.- La naturaleza específica de los iones presentes en solución, incluyendo los iones de hidrógeno y metal.
- 2.- La concentración de esos iones y del oxígeno en la solución. La presión de oxígeno por encima de la solución es muy importante en este último aspecto.
- 3.- Más importante todavía que los factores mencionados en el punto (2) pueden ser los gradientes de concentración de los iones y el oxígeno ya que pueden originar celdas de concentración.
- 4.- La conductividad de la solución que depende de los puntos (1) y (2).
- 5.- La naturaleza y distribución de los productos de corrosión, ya que éstos pueden actuar como protectores, o pueden incluso acentuar la corrosión.
- 6.- La presencia de sustancias coloidales y cuerpos extraños en la solución.

Los factores siguientes se pueden aplicar a las dos fases:

- 1.- La temperatura; incluyendo los gradientes de temperatura y también la temperatura absoluta.
- 2.- La geometría del sistema, tal como el tamaño, forma y posición de la muestra y el volumen de la solución.
- 3.- El movimiento relativo del metal y el medio ambiente pueden ser un factor importante, ya que incluso cuando se intenta conseguir condiciones en que no se produzca movimiento, este pueda darse, inevitablemente, debido a los efectos de gravitación y otros.

Quando el metal a probar ha de ir recubierto de una capa protectora, es conveniente que la prueba de corrosión se haga con muestras de tal protección. Esto introduce, por consiguiente, nuevos factores a considerar, tales como la naturaleza y forma de recubrimiento y el carácter y eficiencia de su adherencia al metal.

Y así, podríamos continuar enumerando una serie de otros factores que intervienen en las pruebas de corrosión, pero nuestro objetivo es el de mencionar de una manera específica, el procedimiento para llevar a cabo las pruebas en el laboratorio de "corrosión bajo tensión" y por esta razón dejarémos de hablar de las pruebas de corrosión de una manera general y nos enfocaremos a nuestro estudio.

4.2. DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS A NIVEL LABORATORIO DE CORROSIÓN BAJO TENSION.

Para conocer la susceptibilidad de un material dado al ACDT es necesario exponer una muestra de dicho material (PROBETA) a condiciones, tanto sin tensión como con tensión simultánea, de tal forma que pueda fácilmente averiguarse el efecto que dicha tensión puede tener. Muchas ve

ces es completamente erróneo suponer que el fallo de una muestra sometida a condiciones de CBT, es suficiente para demostrar la existencia de su susceptibilidad a dicha corrosión, ya que la muestra puede haberse debilitado por la corrosión, sin necesidad de ninguna aceleración por tensiones, que la haga fallar por la carga aplicada.

Esto ocurre cuando estas cargas son muy altas, por ejemplo, cuando se acercan a la tensión de prueba, teniendo en cuenta que no siempre es posible llegar a una determinación exacta de tensión de prueba con el metal disponible y el tipo de muestra empleado. Para este fin, y si se ha de llegar a conclusiones de garantía, es esencial la comparación con una muestra corroída en circunstancias similares, pero sin aplicar la tensión simultánea. Además se deben tomar precauciones para asegurarse que la tensión aplicada es estática, a fin de evitar complicaciones debidas a los efectos de la fatiga.

Aunque el término corrosión bajo tensión se limite al efecto del esfuerzo estático, el método de esfuerzos puede variar, y de este modo el esfuerzo aplicado puede ser traccional, comprensivo o torsional aunque los esfuerzos de tracción son la causa más común de roturas en servicio, y por lo tanto los más empleados en los ensayos de laboratorio. Los esfuerzos que se dan en el servicio se pueden aplicar de modo que el metal quede sometido a los siguientes extremos: A deformación constante, carga constante, o a una condición intermedia o variable, pero las pruebas de laboratorio comprenden uno de los dos casos primeros, más bien que las condiciones intermedias más complejas. Las tensiones internas resultantes de la fabricación son del tipo de deformación constante, y como de ordinario son aplicadas continuamente, a veces son más importantes que las tensiones de trabajo, aunque estas últimas se aproximan al tipo de carga

constante y están mejor representadas por éste. Ahora bien, en general, las pruebas de carga constante son más exactas que las pruebas de deformación constante. Cuando la corrosión tiene lugar en condiciones de carga constante, se reduce al área transversal del metal y aumenta proporcionalmente la tensión por unidad de superficie. Cuando se trata de condiciones de deformación, tales como las que se dan al doblar una tira de metal para darle una cierta forma y mantenerla en ella, una corrosión de naturaleza general no afectaría a la tensión por unidad de superficie, si bien la corrosión localizada puede producir una redistribución de la tensión, con considerable disminución de la misma en las partes menos corroídas.

Como se menciona en el capítulo anterior, la dirección de las tensiones en relación con la estructura del metal, puede tener un marcado efecto sobre la resistencia a la CBT.

En este caso, se llevan a cabo las pruebas a deformación constante, por ser un método de fácil reproducibilidad (a nuestro modo de ver) ya que se cuentan con normas para el doblado en "U" de las probetas así como de un aparato fabricado por nosotros (bastante económico) para efectuar el doblado, de lo cual hablaremos más adelante; y además es una prueba económica y fácil de llevar a cabo y que no requiere de equipo sofisticado para llevar a cabo las mediciones.

Mostraremos sólo una serie de probetas que se utilizan en los ensayos de carga constante, pero no hablaremos más de ellas puesto que éstas no se utilizarán en nuestro estudio; en la figura No. 15.

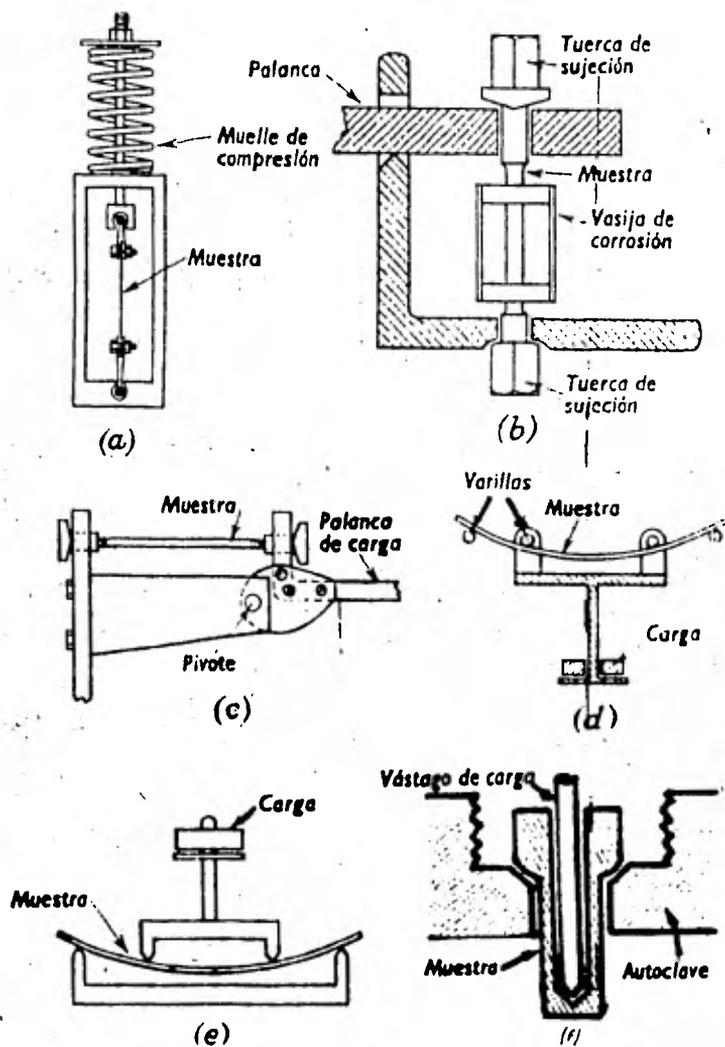


Figura No. 15.- Probetas que se utilizan en las pruebas de corrosión bajo tensión del tipo de carga constante.

Para las pruebas del tipo de deformación constante, el aparato requerido para mantener deformación constante de la probeta, puede ser - mucho menos complicado que el requerido para mantener carga constante, - pudiéndose probar un número mayor de probetas.

En la siguiente figura No. 16 mostraremos una serie de probetas

que pueden ser utilizadas en este tipo de prueba.

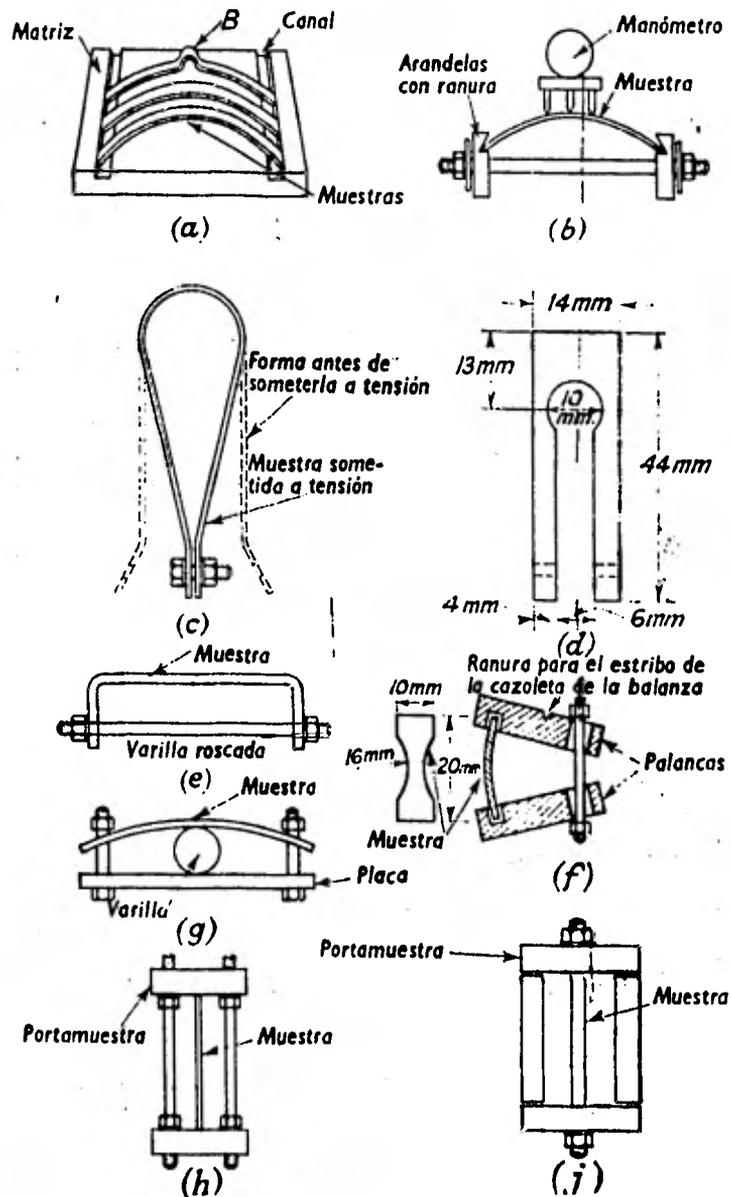


Figura No. 16.- Probetas que se utilizan en las pruebas de corrosión bajo tensión del tipo de deformación constante.

Y de esta variedad de probetas mostradas, se seleccionó la de la forma en "U" (Fig. No. 16 C), que como se mencionó anteriormente es

h = espesor de la probeta en pulg.

y = deformación (flecha) de la probeta
en el centro, en pulg.

NOTA: Estas fórmulas se utilizan sólo cuando el material se encuentra en el rango elástico.

Una desventaja de las probetas dobladas en "U" es que el esfuerzo máximo sólo ocurre en una zona reducida, mientras que en la mayoría de la superficie no habrá efecto de corrosión bajo tensión.

Usualmente, los esfuerzos aplicados en ensayos de CBT son altos y se sitúan entre los 50 y 100% del límite elástico \sqrt{E} . A veces se usan probetas previamente agrietadas (por fatiga) para evitar el tiempo de incubación o de iniciación de la grieta.

4.2.1. DESCRIPCION DE LA NORMA PARA LA PREPARACION DE LA PROBETA DE PRUEBA.

Para llevar a cabo esta prueba se hace uso de las normas de la ASTM (Sociedad Americana de Pruebas de Materiales) y específicamente la norma ASTM. Designación: 6-30-72 que es la recomendada para producción y usos de probetas dobladas en "U" para pruebas de corrosión bajo tensión; la cual se describe a continuación:

I.- Alcance

I.1.- Esta práctica describe los procedimientos para la producción y usos de probetas dobladas en "U" para la evaluación de la fracción

ra por CBT en metales. La probeta doblada en "U" es generalmente una tira rectangular, la cual es doblada 180° alrededor de un radio predeterminado y manteniendola en esta condición de deformación constante durante la prueba de corrosión bajo tensión. Algunas veces se usa un doblado mayor o menor que 180°. La siguiente figura No. 17 muestra algunas configuraciones de las probetas dobladas en "U" que exhiben distintos comportamientos al aplicar los esfuerzos.

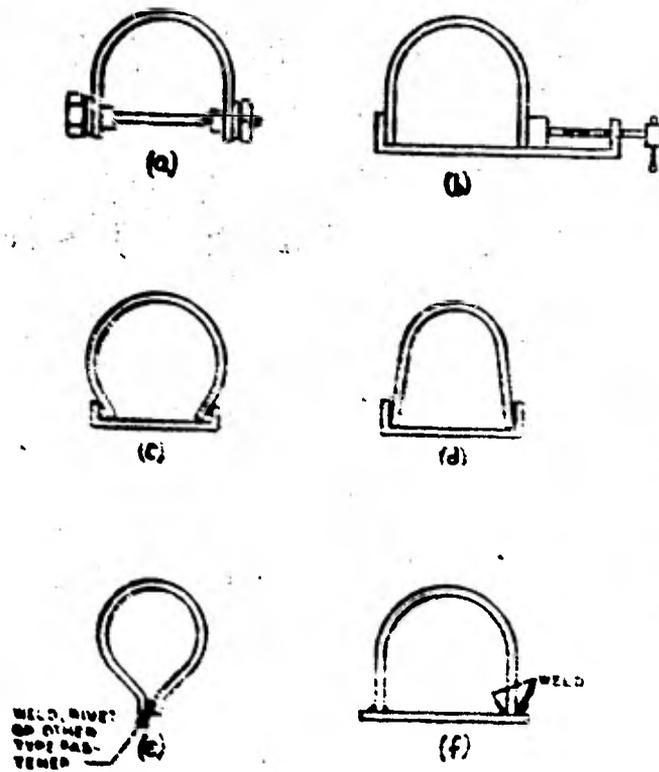


Figura No. 17.- Configuraciones típicas de las probetas dobladas en forma de "U".

I.2. Este tipo de probetas estan comunmente sujetas a la deformación elástica y plástica. Aunque en algunos casos es posible únicamente producir deformación elástica.

I.3.-Esta norma se refiere únicamente a la prueba de probetas - y no a los aspectos del medio corrosivo.

I.4. Para este tipo de probetas se pueden usar aleaciones suficientemente dúctiles para formar el doblado en "U" sin agrietamiento mecánico.

Las probetas son más fácil de hacerse de flejes o lámina pero también pueden ser maquinadas cuando es placa, barra, pieza de fundición o uniones soldadas; también pueden ser usadas probetas de alambre.

I.5. Ya que esté tipo de doblado en "U" contiene gran cantidad de deformación plástica y elástica, ésto provee una de las más severas - pruebas disponibles. Las condiciones de los esfuerzos no son usualmente - conocidas, por lo tanto, las probetas son inapropiadas para el estudio de los efectos de los diferentes esfuerzos aplicados o para estudiar variables, los cuales tienen un menor efecto sobre la fráctura. La ventaja de este tipo de probetas es que son simples y económicas de hacer y usarse.

Estas son más provechosas para detectar grandes diferencias entre diferentes metales a la resistencia del ACBT en el mismo ambiente, un metal en diferentes condiciones metalúrgicas en un mismo ambiente o un metal en diferentes ambientes . En lo sucesivo la norma se describe llevando una secuencia lógica para el desarrollo de la prueba.

II.- PROJETAS DE PRUEBA

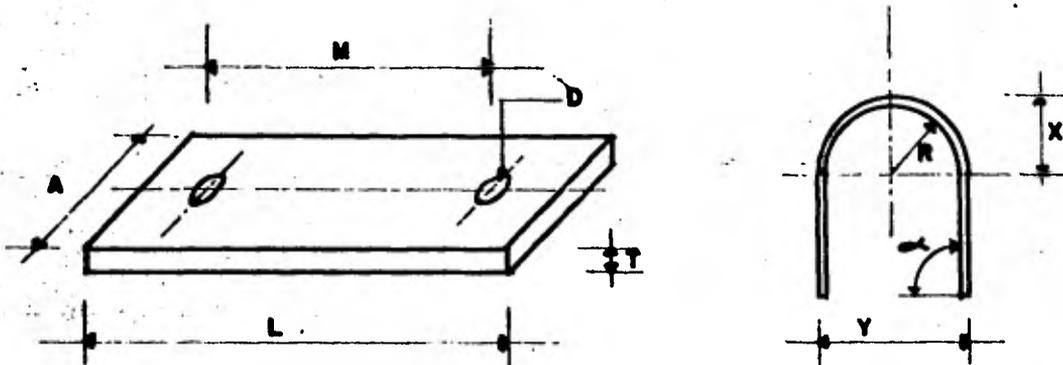
II.1. Se considera como el primer paso en la prueba de corrosión la obtención del material para la prueba. Cuando las probetas son -

cortadas de lámina, fleje, barra o placa, se hace lo posible por hacer el corte transversal o longitudinalmente a la dirección del laminado.

En muchos casos la resistencia al ACST en estas dos direcciones es completamente diferente, por lo que es muy importante definir la orientación de la probeta de prueba.

II.2. Dimensiones de la probeta: En este caso se expone la siguiente figura No. 13 que muestra una forma de probeta de prueba con diferentes dimensiones típicas que han sido usadas con buen resultado por una amplia gama de materiales.

II.2.1. De una u otra manera la probeta tendrá orificios, esto depende de la forma de mantener el esfuerzo aplicado.



EJEMPLO	L(pulg)	M(pulg)	A(pulg)	T(pulg)	D(pulg)	X(pulg)	Y(pulg)	R(pulg)	α°
1	3	2	3/4	3/32	3/8	....	0.636	0.183	90
2	3 7/8	3 7/16	3/8	1/8	17/64	1 1/16	1 1/4	5/8	90
3	4 1/2	3 5/8	3/4	1/16	5/16	1 1/4	1 1/4	6/8	90
4	5	4	1/2	1/8	1/4	1 3/4	1 1/4	1/2	90
5	6	5 1/2	1/2	0.030	1/8	....	3/4	3/8	90
6	12	10	1	1/2	1/2	....	3 1/2	1 1/4	90
7	20	18	1	1/4	1/2	....	6 1/2	3	90

Figura No. 13. Dimensiones para las probetas dobladas en forma de "U"

II.2.2. La longitud (L) y ancho (A) de la probeta se determina por la cantidad y forma del material disponible, el método de aplicación de esfuerzo y la dimensión del medio que contenga la prueba.

II.2.3. El espesor (e), usualmente depende de la forma del material, su resistencia y ductilidad y los medios disponibles para llevar a cabo el doblado.

II.2.4. Para propósitos de comparación, es conveniente mantener las dimensiones de la probeta, especialmente la relación de espesor a radio de doblado, constante. Esto produce aproximadamente la misma deformación en los materiales a probar.

II.3. Preparación de la superficie:

Es conveniente preparar la superficie por las siguientes razones:

- a) Para llegar a obtener el mismo tipo de superficie que se utilice en la práctica.
- b) Para llegar a detectar una corrosión ligera cuando la superficie no permita hacerlo.
- c) Para evitar, en lo posible la contaminación.
- d) Para obtener una superficie más uniforme en todas las muestras con objeto de obtener resultados más representativos.

En general, se usa una superficie limpia para la prueba. Es usual el lijar sobre papel esmeril hasta un número 120 o equivalente, sin que se caliente el material, para evitar transformaciones en la estructura. Después de este número de lija se recomienda seguir lijando con lijas más delgadas como si a la probeta se le fuera hacer análisis metalográfico (lija 120 hasta 600); seguido por un pulido sobre paño con alúmina. Hay que usar lijas limpias para evitar una contaminación de la superficie, lo

que causaría efectos galvánicos.

II.3.1. A veces son necesarios tratamientos térmicos antes de la preparación.

II.3.2. La preparación es generalmente un proceso mecánico, pero en algunos casos es más conveniente y aceptable un terminado químico.

II.3.3. El máquinado o esmerilado deberá ser hecho en etapas para que así el corte final deje la superficie con un terminado de 30 in.

Los bordes de la probeta deberán recibir el mismo terminado que las caras.

La preparación química de la superficie evita, o puede eliminar la contaminación o trabajo de la capa de superficie por una preparación mecánica, pero lleva consigo las siguientes posibles desventajas.

a) Pueden quedar algunos residuos de los agentes químicos empleados.

b) El ataque sufrido por el metal durante la preparación puede ser de tal carácter que influya a su vez en la corrosión subsiguiente.

c) El carácter dado a la superficie por medio de la preparación química puede crear dificultades en la detección del comienzo del ataque en la prueba siguiente.

II.3.4. La etapa final de preparación es desengrasar, dependiendo sobre todo del método de aplicación de esfuerzos, esto puede hacerse antes o después de la aplicación de dichos esfuerzos.

II.4. Identificación de Probetas.- Es mucho mejor llevarlo a cabo por estampado o marcando cerca de una de las esquinas de las probetas lo más retirado del área sometida a esfuerzos. Etiquetas no metálicas pueden ser puestas, fijándolas por medio de un amarro en el tornillo de fijación para mantener la probeta en tensión.

III.- CONSIDERACIONES DE LOS ESFUERZOS

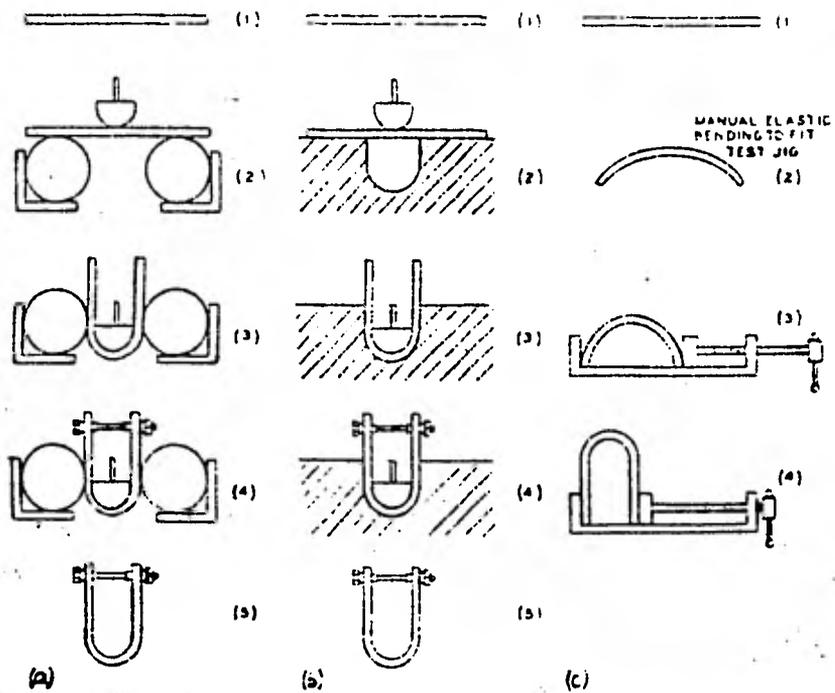


Figura No. 19.- Métodos de aplicación de esfuerzos en una simple etapa.

IV.3.- La aplicación de esfuerzos en dos etapas involucra primero haber una forma aproximada de U que permite la deformación elástica para relajar completamente antes de la aplicación de la segunda etapa, que es la colocación del tornillo de sujeción para mantener la probeta en tensión. En seguida se muestra una secuencia típica de operación de este tipo de método. Figura No. 20.

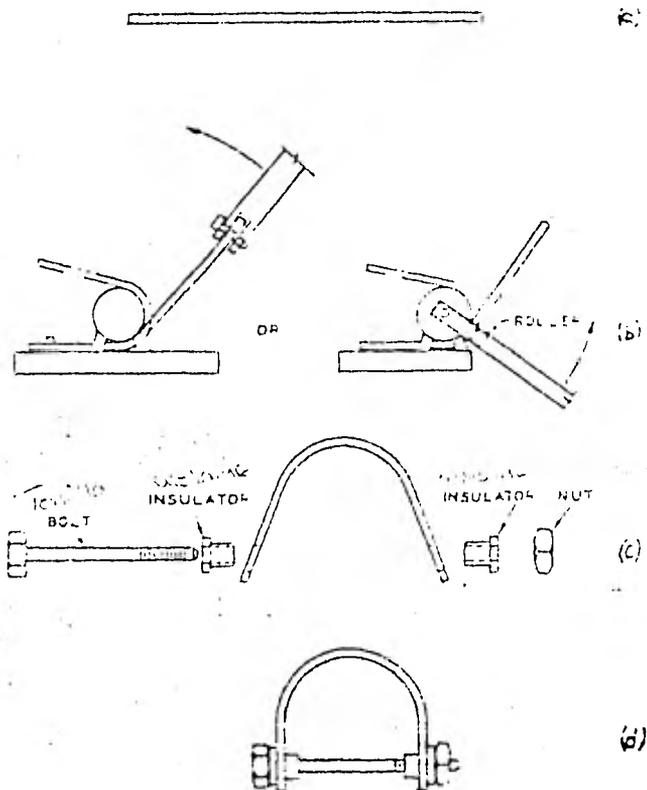


Figura No. 20.- Método de aplicación de esfuerzos en dos etapas.

IV.4.- El perno o patrón de fijación usada para mantener el esfuerzo aplicado deberá ser del mismo material que el de la probeta, o en su defecto deberá ser aislado de la probeta para evitar efectos galvánicos.

IV.5.- Precaución.- El doblado aplicado en material de gran resistencia puede ser susceptible a grandes rangos de propagación de grietas y cuando una probeta presenta más de una grieta puede astillarse en una o dos piezas. Debido a la gran condición de esfuerzos en la probeta doblada, estas piezas pueden salir de la probeta a grandes velocidades y provocar algún accidente.

V.- EXPOSICION DE LA PROBETA.

V.1.- Antes de la exposición, medida y pesado de la probeta, ésta debe ser desengrasada en una solución conocida, que sea químicamente inerte al metal de prueba.

Una vez producido el doblado y habiendo colocado el tornillo tenedor, se procede al desengrase de la probeta justo antes de las medidas de peso y dimensiones. Será determinado después de la corrosión la pérdida de

peso de la probeta.

Un método fácil de remover grasas y aceites (excepto aceites — con silicones) es usar un solvente de vapor desengrasador. Pero si tal equipo no esta disponible, las probetas deberán ser limpiadas con un rápido secado, con solventes de bajo residuo, tales, como acetona, alcohol o metil - etil cetona (MEC). No deberán usarse solventes que sean muy flamables (gasolina), tóxicos (tetracloruro de carbono), o aquellos que dejen una película de residuo (kerosina).

Para limpiar muestras de acero inoxidable, puede utilizarse una solución de ácido nítrico, pero si el ácido es demasiado fuerte, puede dar lugar a una pasivación del metal bastante considerable; se recomienda por lo tanto una solución de ácido nítrico al 10% a 60° C durante 30 min. Después pasarlas a través de una serie de lavados y enjuagues y de ahí directamente a la prueba.

De aquí en adelante la probeta no debe ser manipulada directamente con las manos, si no que ahora tiene que ser manipulada con tenazas o cubrir las manos con guantes limpios y se manipula solo por los bordes — para prevenir impresiones de dedos u otra contaminación, la cual puede causar corrosión acelerada.

Después de desengrasar, la probeta deberá ser medida y pesada — tan cuidadosamente como sea posible, porque los datos subsecuentes pueden no ser más exactos que el dato original, para obtener datos en "mdd" o — — "mpy".

Para remover la contaminación causada por el manipuleo, la probeta debe ser desengrasada otra vez justo antes de la exposición.

Si por alguna razón, la probeta no puede ser expuesta en un — — tiempo razonable, deberá ser almacenada en un disecador o cubriéndolas con un aceite protector y en un lugar seco y libre de polvo.

V-2.- La probeta bajo esfuerzo deberá examinarse para corroborar si no hay agrietamientos mecánicos anteriores a la prueba. Una revisión - técnica similar deberá usarse en las subsecuentes pruebas.

V.3.- Tan pronto como sea posible después de aplicar esfuerzos, desengrasar, medidas e inspección, la probeta deberá ser puesta en la solución de prueba.

VI.- TECNICAS DE EXPOSICION:

Las siguientes consideraciones son importantes para los métodos de exposición del material al medio corrosivo:

- a) El medio corrosivo tiene que "llegar" fácilmente a la muestra.
- b) Los soportes no pueden fallar durante la prueba.
- c) Hay que aislar eléctricamente la probeta de otros materiales para evitar efectos galvánicos no deseados.
- d) Hay que colocar bien las muestras, según el objetivo de la prueba; inmersión parcial o completa, contacto con fases de vapor, etc.

A menudo se hacen pruebas en medios corrosivos hirviendo. El medio corrosivo se pone en un recipiente tipo "Erlen Meyer" con un condensador de vapor por encima para evitar cambios de concentración del medio corrosivo.

Los recipientes están colocados sobre una placa calentadora con un control de temperatura. Es mejor no colocar más de una probeta por recipiente, pero a veces se duplica el ensayo con el mismo material en un solo recipiente.

En este caso el medio corrosivo utilizado es a base de cloruros, que como se mencionó en el capítulo anterior es el medio que ataca particularmente al acero inoxidable.

Específicamente el medio en esta prueba es CLORURO DE MAGNESIO

del cual se describe a continuación la norma para llevar a cabo la preparación.

4.2.2.- DESCRIPCION DE LA NORMA PARA LA PREPARACION DE LA SOLUCION.

Para la preparación de la solución se hace uso de la norma de la ASTM, designación G36-73, la cual es la norma recomendada para llevar a cabo pruebas de CBT de Aceros Inoxidables austeníticos en una solución de cloruro de Magnesio al 42% hirviendo.

I.- ALCANCE.

I.1.- Esta práctica describe un procedimiento para efectuar pruebas de ACBT en una solución hirviendo de cloruro de magnesio. Aunque esta prueba puede llevarse a cabo usando diversas concentraciones de la solución, este procedimiento se refiere a una solución de prueba que tenga una temperatura de ebullición constante de $155 \pm 1^\circ\text{C}$ ($311 \pm 1.8^\circ\text{F}$). Los puntos de ebullición de este tipo de solución a una atmósfera de presión se muestran en la figura No. 22.

I.2.- La solución de prueba es aplicada para fundiciones, forjado y aceros inoxidable soldados. Es un método para detectar los efectos de la composición, tratamientos térmicos, acabado superficial, microestructura y la susceptibilidad de aquellos materiales bajo esfuerzo al ACBT en cloruros.

I.3.- Esta práctica concierne primeramente a la solución de prueba, la cual puede ser usada con una variedad de probetas bajo esfuerzo, superficies terminadas y métodos de aplicación de esfuerzo.

II.- RESUMEN DEL METODO.

II.1.- Se añaden una predeterminada cantidad de reactivo de cloruro de magnesio y agua destilada a un recipiente. El recipiente y su contenido se colocan junto con un termómetro y un condensador sobre el aparato calentador. Cuando la solución hierve, es necesario realizar ajustes para -

mantener tanto la concentración deseada como el punto de ebullición. Esto se logra a través de la adición de pequeñas cantidades de agua o de sal.

II.2.- Después que la solución se ha estabilizado a la temperatura deseada, se coloca la probeta bajo esfuerzo. En función del propósito de la prueba, la probeta deberá ser examinada periódicamente.

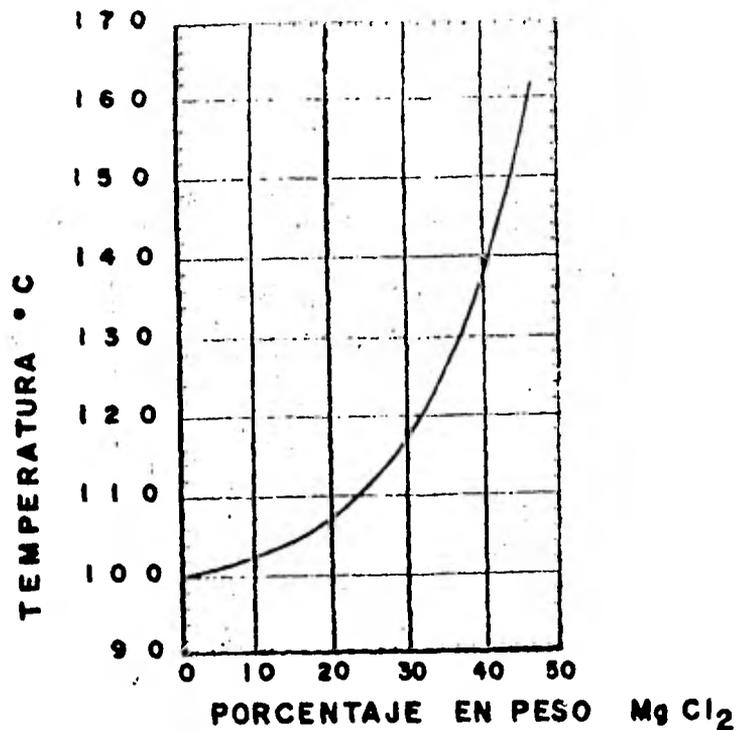


Figura No. 22.- Puntos de ebullición de una solución de Cloruro de Magnesio a una atmósfera de presión en función de la concentración.

III.- APARATOS.

III.1.- Se requiere de algún aparato hecho con material inerte, transparente con provisión para un termómetro y condensador de agua. De preferencia debe ser diseñado para contener la probeta mientras se mantiene una temperatura y concentración constante del cloruro de magnesio, con el fin de minimizar o prevenir pérdidas del condensado y del vapor de agua du-

rante períodos de prueba prolongados. Las pequeñas pérdidas de agua de la solución de $Mg Cl_2$ conducirán a incrementos importantes en el punto de ebullición de la solución con una reducción en el tiempo de falla de una probeta por ACBT.

IV.-REACTIVOS.

IV.1.- Pureza de los reactivos.- Deben usarse reactivos químicamente puro en todas las pruebas, a menos que se indique otra cosa.

IV.2.- Pureza de agua.- Debe emplearse agua destilada o agua de pureza semejante para preparar la solución de prueba.

IV.3.- Cloruro de Magnesio ($Mg Cl_2 \cdot 6H_2O$). En la prueba se usa una solución de cloruro de magnesio que hierva a $155 \pm 1^\circ C$.

Si una trampa de vapor es usada, se requiere una solución de 25% en peso de cloruro de magnesio si la prueba excede de 7 días sin un cambio de la solución.

IV.3.1.- Para preparar cerca de 400 ml de la solución de prueba para usarse en un recipiente tipo Erlen Meyer de 1 litro y otro recipiente, se pesan 600 gramos de reactivo (cloruro de Magnesio) y se añade al recipiente que contenga 15 ml de agua destilada provisto con un termómetro.

IV.3.2.- Cuando la solución esté hirviendo y no haya más goteo de condensado, añada lentamente pequeñas cantidades de agua destilada (de 4 a 5 ml) en la punta del condensador para reducir la temperatura a $155^\circ C$.

V.- PRECAUCIONES.

V.1.- Cuando el cloruro de magnesio se encuentra frío puede ser manipulado con un mínimo de equipo de protección. Se deben tomar en cambio las máximas precauciones cuando la solución se encuentra hirviendo, evitando el contacto con la piel. Es conveniente usar guantes de hule y lentes de seguridad. Pueden producirse severas quemaduras cuando el cloruro de magnesio hirviendo toca la piel. La severidad de las quemaduras puede reducirse aplicando de inmediato los primeros auxilios y tan pronto como sea

posible acudir con un médico.

4.3. METODO DE INMERSION

En la prueba se usará el método de "Total Inmersión" de las probetas dentro del medio corrosivo líquido, el cual requiere de condiciones relativamente simples, pero hay que tener en cuenta un número de factores para alcanzar una adecuada reproducibilidad de los resultados.

A este respecto señalamos una serie de factores físicos que indicamos a continuación y que pueden afectar a la velocidad de corrosión en soluciones salinas estacionarias:

- a) Estado de la superficie de la muestra.
- b) Tamaño, forma y método de suspensión de la misma.
- c) Profundidad de inmersión.
- d) Tamaños y formas del recipiente y particularmente su sección.
- e) Volumen del líquido corrosivo.
- f) Estabilidad del aparato, es decir, si se pueden alcanzar verdaderas condiciones de quietud.
- g) Temperatura y particularmente sus variaciones.
- h) Presión del gas y particularmente la presión parcial del oxígeno.

La principal dificultad experimental en este tipo de pruebas es triba en que debe haber contacto de la probeta con el dispositivo que le sirve de apoyo dentro del medio corrosivo, y que dicho contacto puede acelerar localmente la corrosión. Una forma eficaz de evitar esta posibilidad es colocar la muestra verticalmente suspendiéndola por ejemplo; de una varilla de vidrio o de un hilo de nylon.

También, los resultados de la prueba pueden ser afectados significativamente por variaciones en los factores del medio, como ya se ha --

mencionado anteriormente, pero aquí hablaremos un poco más acerca de dos variables que son: Aireación y Temperatura que se encuentran presentes en nuestra prueba.

Aireación.— La presencia del oxígeno disuelto en un líquido puede tener mucha influencia sobre la velocidad de corrosión. En forma general se puede decir que algunos metales y aleaciones son más fácilmente atacados en la presencia de oxígeno, mientras que otras resisten más.

Un caso es el del aluminio y los aceros inoxidable que a veces presentan una mejor resistencia a la corrosión en la presencia de oxígeno.

Un efecto de corrosión por aireación ocurre en tanques si el nivel del líquido es constante y si la atmósfera es aire. Es bastante difícil impedir el acceso de aire en procesos industriales. La presencia de oxígeno puede provocar corrosión por grietas, debajo de depósitos, etc.

Temperatura.— El efecto de la temperatura sobre fenómenos de corrosión es muy marcado e importante, de modo que es primordial identificar exactamente la temperatura de la superficie de la probeta, la cual representa la verdadera temperatura de corrosión. En algunos casos, la corrosión disminuye cuando aumenta la temperatura (eliminando oxígeno), pero en la mayoría de los casos, la corrosión aumenta rápidamente en la temperatura.

A veces se efectúan pruebas de corrosión acelerada a temperaturas superiores a aquellas de operación para reducir el tiempo de prueba. Esto es peligroso, ya que el efecto de la temperatura puede ser muy importante, lo que conduciría entonces a la selección de un material innecesariamente caro.

Otro error muy común es la suposición de que la temperatura del medio corrosivo es la temperatura de corrosión, pero en realidad, sobre todo en superficies calentadoras, la diferencia puede ser grande.

4.4. DURACION DE LA PRUEBA

Es muy importante la selección adecuada del tiempo de ensayo y el número de períodos de exposición. Siempre se aconseja efectuar por lo menos dos ensayos, para determinar variaciones en el poder de corrosión y detectar errores eventuales en el cálculo de la rapidez de corrosión. A menudo se efectúan pruebas en el laboratorio con una renovación del medio corrosivo cada 48 horas, para juzgar variaciones de corrosión y agresividad con el tiempo.

Una regla general pero muy burda para checar el resultado de la prueba con el tiempo de exposición es:

$$2000/\text{mpy} = \text{horas de duración de la prueba.}$$

(mpy= milipulgadas por año)

4.5. EXPRESIONES STANDAR DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

Como generalmente lo que interesa al Ingeniero de Corrosión es la vida útil del equipo (con excepción de casos de contaminación), una buena expresión para la velocidad de corrosión tiene que satisfacer las condiciones siguientes:

- 1.- Expresar la corrosión en unidades usuales.
- 2.- Ser fácilmente calculable con mínima oportunidad de errores.
- 3.- Ser fácilmente convertido en vida útil (años).
- 4.- Indicar una penetración.
- 5.- Tener números enteros sin decimales.

La mejor expresión y la más usual es "mpy", la cual se calcula con la fórmula siguiente:

$$\text{mpy} = \frac{534 W}{D A T}$$

donde:

W= pérdida de peso (miligramos)

D= densidad del material (gramos/centímetro cúbico)

A= área de la probeta (pulgada cuadrada)

T= tiempo (horas)

El factor de conversión de otras unidades a "mpy" es:

<u>multiplicar</u>	<u>por</u>
<u>pulgadas</u> año	1000
<u>pulgadas</u> mes	12, 100
<u>miligramos</u> dm ² x día	<u>1.44</u> densidad

4.6. INSPECCION DESPUES DE LA CORROSION

Ahora, llegamos al paso más importante dentro de la prueba, me refiero a la "inspección" de la probeta durante y después de la corrosión.

Los procedimientos de revisión dependerán de la conveniencia y el propósito de la prueba. En la mayoría de las pruebas de laboratorio, es conveniente remover la probeta del medio corrosivo (usando guantes o tenazas) y examinarla a simple vista o por medio del microscopio. Después de la inspección, en este caso para detectar grietas, la probeta puede entonces ser regresada a la prueba.

Los productos de la corrosión pueden oscurecer la grieta, en este caso se usan las técnicas para la limpieza de probetas después de la

exposición, las cuales se explican a continuación.

Antes de limpiar la probeta, conviene exáminar la capa del producto de corrosión, ya que a menudo el aspecto de la superficie puede proporcionar información sobre las causas o el mecanismo de la corrosión que ocurrió.

Como se mide directamente una pérdida de peso de la probeta, es importante eliminar totalmente la capa que se compone de los productos de corrosión (metal ya oxidado y entonces corroído).

Los productos de corrosión pueden ser clasificadas en "libres" o "fácil" de eliminar y en adherentes o difíciles de eliminar; otra clasificación sería formando una capa protectora o no protectora.

Los métodos de limpieza se clasifican en tres categorías:

- a) Métodos Mecánicos.— Es muy usual limpiar las probetas bajo un chorro de agua y rascando su superficie con un pedazo de hule o con una brocha suave; otros métodos pueden ser por ejemplo, limpieza por chorro de arena, con - abrasivos, etc.
- b) Métodos Químicos.— Algunas soluciones pueden disolver el producto de - corrosión sin atacar el metal base; por ejemplo para el caso de los aceros inoxidables se usan los tratamientos siguientes:
 - 1.- Solución caliente de Na OH (20% en peso) conteniendo 200 gra mos/litro de polvo de zinc.
 - 2.- Acido Nítrico (10% en peso) a 60°C o también se recomienda a una concentración del 30% y a temperatura ambiente.
 - 3.- Solución caliente de acetato de amonio.
- c) Métodos Eléctrolíticos.— La probeta se hace cátodo por medio de una corriente aplicada en una solución específica.

De todos modos, siempre hay que efectuar pruebas de referencia aplicando el mismo tratamiento de limpieza sobre un metal no corroído para determinar una eventual pérdida de peso por el puro tratamiento de limpieza y reportar exactamente el tipo de tratamiento de limpieza efectuado.

REPORT E

El reporte incluirá la siguiente información:

- 1.- Composición química de las muestras probadas.
- 2.- El tamaño exacto, forma y área de las muestras.
- 3.- Las formas y condiciones metalúrgicas de las muestras, ejemplo: forma=colada, laminada o forjada-metal= trabajado en frío, recocido o tratado térmicamente, etc.
- 4.- El tratamiento usado para preparar las muestras de prueba.
- 5.- El número de muestras de cada material ensayado, así como si cada muestra fué probada con un mismo recipiente.
- 6.- La composición química de la solución, además información de como y cuanto tiempo se mantuvo la composición constante o con que frecuencia se cambio la solución.
- 7.- La temperatura de la solución y su máxima variación durante la prueba.
- 8.- El grado de aireación de la solución.
- 9.- El volúmen de la solución.
- 10.-La naturaleza de los aparatos usados para la prueba así como la instalación.
- 11.-Duración de la prueba y si es continua o intermitente.
- 12.- El método usado para limpiar las piezas después de haber sido atacadas.

- 13.- Datos acerca de las propiedades mecánicas de las probetas antes de su aplicación.
- 14.- La corrosión de cada muestra calculada en MDY.
- 15.- Las condiciones mecánicas durante la prueba, por ejemplo la magnitud, dirección y naturaleza de las tensiones impuestas sobre la probeta.
- 16.- El tiempo en el cual las grietas son visibles en un determinado estado de aplicación.
- 17.- Resultados obtenidos.

CAPITULO QUINTO

EXPERIMENTACION.

5.1. TIPOS DE ACEROS ENSAYADOS.

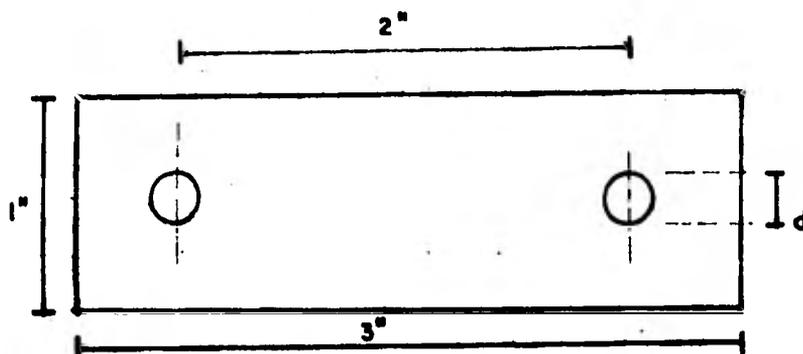
Los tipos de aceros ensayados fueron:

Aceros Inoxidables Austeníticos correspondientes con AISI - 304 y 316 -
(en condiciones de recocido), cuya composición química es:

	<u>COMPONENTE</u>	<u>PORCENTAJE.</u>
Tipo 304	Carbono	0.08 máx.
	Cromo	16.20 ---
	Níquel	8.11 ---
	Manganeso	2 máx.
	Silicio	1 máx.
	Fósforo	0.045 máx.
	Azufre	0.03 máx.
Tipo 316	Carbono	0.08 máx.
	Cromo	16.18 ---
	Níquel	10.24 ---
	Manganeso	2 máx.
	Silicio	1 máx.
	Fósforo	0.045 máx.
	Azufre	0.03 máx.
	Moolibdeno	2.3 ---

5.2.- DIMENSIONES DE LAS PROBETAS.

Se eligieron las siguientes dimensiones:



d = SEGUN ϕ DEL TORNILLO TENSADOR
(ESPESOR = 3/16")

5.3.- PREPARACION DE PROBETAS.

El material originalmente se encontraba en forma de placa y de ésta se cortaron las probetas a las dimensiones antes citadas, teniendo mucho cuidado con el fin de no provocar algún cambio estructural debido al trabajo mecánico; posteriormente fueron desbastadas con lija número 120 con el objeto de quitar rugosidad y alguna suciedad que estuviera presente, ésto se llevó a cabo tanto en las dos superficies como en los bordes; a continuación se lijaron con diferentes números de lijas de carburo de silicio (180,220,340,400,500,600) y se pulieron por medio de una pulidora provista de un paño, empleando alúmina como abrasivo, llevándose a cabo sólo por la superficie exterior al doblado (con el objeto de poder observar mejor cuando se iniciasen las grietas).

5.4.- PROCEDIMIENTOS PARA EL DOBLADO EN FORMA DE " U ".

Una vez que las probetas estaban pulidas, se les practicaron los barrenos correspondientes para el tornillo tensador. A su vez éstos servirán para sujetar la probeta en el aparato que se usó para aplicar la deformación.

El método que se empleó fué el de dos etapas, el cual consistió como fué mencionado anteriormente en aplicar al material primero de deformación elástica y como siguiente paso, por medio del tornillo tensador llevar al material de la zona elástica a la zona plástica hasta darle la forma de " U ". La forma de las probetas pueden verse en la fotografía número 1.

Todas las probetas deformadas fueron examinadas por medio del macroscópio para detectar alguna posible fractura del material debida al proceso de deformación; no encontrándose falla alguna. En las fotografías números 3 y 4 se muestra de una forma general las probetas que eran examinadas en el macroscópio.

5.5.- DIRECCION DE LOS ESFUERZOS APLICADOS.

La dirección en que el material fué laminado se determinó por las siguientes consideraciones:

- a).- Por la forma que presentaba el material al ser adquirido.
- b).- Después que las probetas fueron cortadas se realizaron análisis metalográficas en la superficie y en los bordes, observándose una orientación de los granos hacia una misma trayectoria y con esto se concluyó que la dirección del laminado es como se muestra en la figura número 24

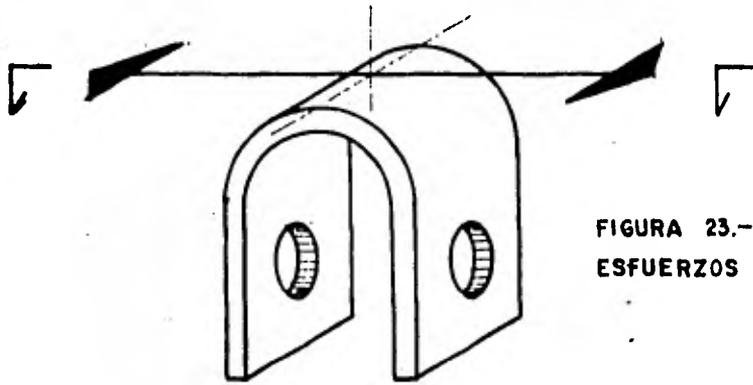


FIGURA 23.- DIRECCION DE LOS ESFUERZOS APLICADOS

Y por la forma en que fué doblada la probeta, se determinó que la aplicación de los esfuerzos fué en la misma dirección de laminado (longitudinalmente). Esto es mostrado en la siguiente figura No. 23.

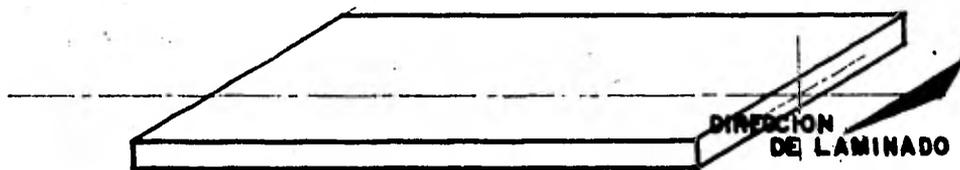


FIGURA NO. 24.- DIRECCION DE LAMINADO DE LAS PROBETAS DE PRUEBA

5.6.- LIMPIEZA DE PROBETAS ANTES DE LA EXPOSICION.

Después que las probetas fueron sometidas a esfuerzo éstas eran desengrasadas por un método simple y económico.

Fueron lavadas con detergente y después introducidas en una solución que contenía 50% Eter y 50% Alcohol, quedando listas para ser pesadas. Una vez que las probetas eran desengrasadas, éstas se manipulan únicamente por medio de pinzas o guantes con el objeto de evitar tocarlas con las manos.

No se usó la limpieza con ácido nítrico tradicional para prevenir una posible pasivación del material, con lo cual podríamos tener problemas con los resultados.

5.7.- IDENTIFICACION DE LAS PROBETAS.

La identificación se realizó a través de los tornillos tensadores en donde se especificaba con un número el tipo de material que se estaba probando. Se estuvo probando pieza por pieza, por lo cual fue fácil llevar un control de todas las probetas, cada pieza probada era posteriormente introducida en una bolsa de polietileno con su número respectivo y era registrado en una libreta.

5.8.- PESO DE LAS PROBETAS ANTES DE LA EXPOSICION.

Cuando las probetas estaban ya desengrasadas, éstas eran manipuladas con pinzas y llevadas a la balanza analítica para ser pesadas con precisión.

5.9.-EXPOSICION DE LAS PROBETAS AL MEDIO CORROSIVO.

Una vez que las probetas eran pesadas, se colocaban directamente en el medio corrosivo, utilizando para ello una varilla de vidrio doblada en un extremo para la sujeción de ésta dentro del medio. Se utilizó éste tipo de soporte para evitar alguna interferencia tanto con la probeta como con la solución.

5.10.- PREPARACION DEL MEDIO CORROSIVO.

Se empleó una solución a base de cloruro de magnesio y agua destilada, tal como se especificó en la norma, pero aquí sólo se prepararon 200 mililitros con 320 gramos de cloruro de magnesio y 10 mililitros de agua destilada con lo cual se obtuvo una concentración casi del 40% (según gráfica concentración-temperatura) y una temperatura de $141 \pm 1^\circ\text{C}$. Con esta solución fueron probadas 4 probetas - (2 de 304 y 2 de 316) por un tiempo elegido de 12 horas para cada una.

Después se preparó la solución que alcanzara la concentración especificada en la norma, o sea, al 42% a una temperatura de $154 \pm 1^\circ\text{C}$ -

para probar 2 probetas más (1 de 304 y 1 de 316), durante el mismo - tiempo para cada una.

Para la preparación a ésta concentración se tuvo que añadir - 150 gramos de cloruro de magnesio y 15 mililitros de agua destilada.

5.11.- EQUIPO EMPLEADO EN EL LABORATORIO.

- 1.- Parrilla con control de temperatura.
- 1.- matraz tipo Erlenmeyer de 250 ml. y otro de 100 ml.
- 1.- Refrigerante tipo Rosario (enfriado por agua) de 50 cm. de largo.
- 2.- Termómetros con escala 0- 200° C.
- 3.- Pinzas de sujeción para el enfriador.
- 2.- Metros de manguera tipo Latex (entrada y salida de agua al enfria-
dor).

La instalación en el laboratorio del equipo anterior se mues- tra en la fotografía número 2.

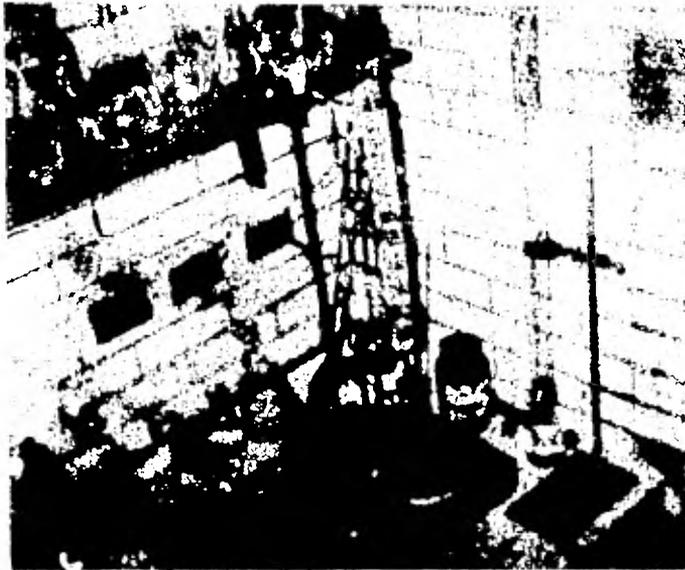
Además, se utilizó el siguiente equipo:

Varios vasos de precipitado para el lavado de las probetas antes y des- pués de las pruebas.

- 1.- Pinzas para manipular las probetas.
- 1.- Balanza analítica (para pesar probetas).
- 1.- Balanza granataria (para pesar sustancias).
- 1.- Pistola de aire (para secar probetas).
- 1.- Pulidora electrolítica.
- 1.- Macroscópio con equipo fotográfico acoplado.
- 1.- Macroscópio metalográfico con equipo fotográfico acoplado.
- 1.- Escobillón para lavar probetas antes y después de la prueba.
- 1.- Microscópio electrónico de barrido de 20 kv, cortesía del IIM- - - -
UNAM, con equipo fotográfico asociado.



Fotografía Número 1. Dimensiones y acabado de las probetas de concreto.



Fotografía número 2. Instalación del equipo empleado en el laboratorio.

5.12.- AIREACION Y TEMPERATURA.

No existió alguna aireación proporcionada por algún aparato.

La temperatura de las pruebas fué:

Primero con una concentración de la solución del 40% --- $141 \pm 1^\circ\text{C}$.

Segundo con una concentración de la solución del 42% --- $154 \pm 1^\circ\text{C}$.

5.13.- METODO DE EXPOSICION.

El método de exposición fué de inmersión total efectuando - revisiones periódicas.

Las observaciones se hacían sacando la probeta del medio corrosivo y lavándolas con agua, frotándolas con un escobillón para quitar productos de corrosión y sal, y eran llevadas al macroscopio para detectar la posible aparición de grietas y la evolución del fenómeno.

5.14.- LIMPIEZA DE LAS PROBETAS DESPUES DE LA CORROSION.

Una vez que se cumplían las 12 horas de exposición que se sugirió para estas pruebas, las probetas eran sacadas del medio y lavadas con chorro de agua y un escobillón.

Posteriormente eran introducidas en una solución de ácido nítrico al 10% a una temperatura de 60°C durante 30 minutos para una mejor limpieza de los productos de corrosión y secadas por medio de aire para ser pesadas con exactitud.

5.15.-PREPARACION DE PROBETAS PARA OBSERVACION METALOGRAFICA.

Una vez que las probetas eran pesadas, éstas eran pulidas y atacadas por medio de la pulidora electrolítica.

Se usó como electrolito una solución de ácido oxálico al 10% con los siguientes factores que intervienen en el pulido y ataque:

Voltaje = 6 volts.

Tiempo de pulido = 15 segundos.

Tiempo de ataque = 20 segundos.

Se recomienda que las probetas sean preparadas (antes del pulido) mecánicamente hasta un desbastado con lija número 600, después lavarlas perfectamente y se limpia con algún solvente (acetona) para evitar grasas, con lo cual no daría un pulido uniforme. Después de haber sido pulida y atacada la probeta, se lava perfectamente y se seca con alcohol y aire para ser observadas en el microscópio.

CAPITULO SEXTO

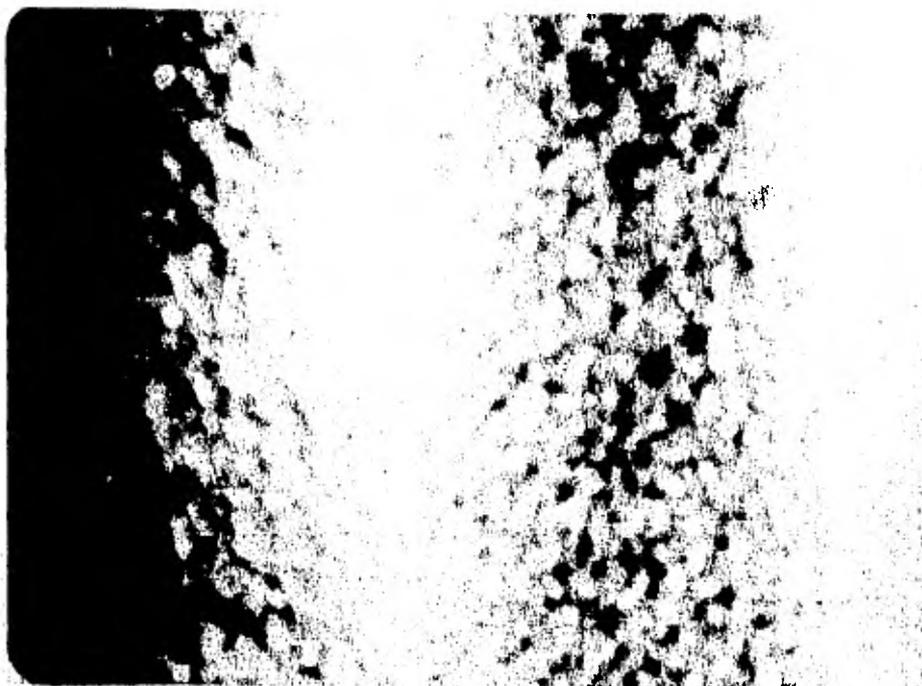
RESULTADOS.

El tiempo efectivo de exposición al medio fué de doce horas, se seleccionó éste tiempo debido a que el ataque corrosivo era muy rápido y en algunas probetas llegaba casi a fracturarlas dentro de éste intervalo de tiempo.

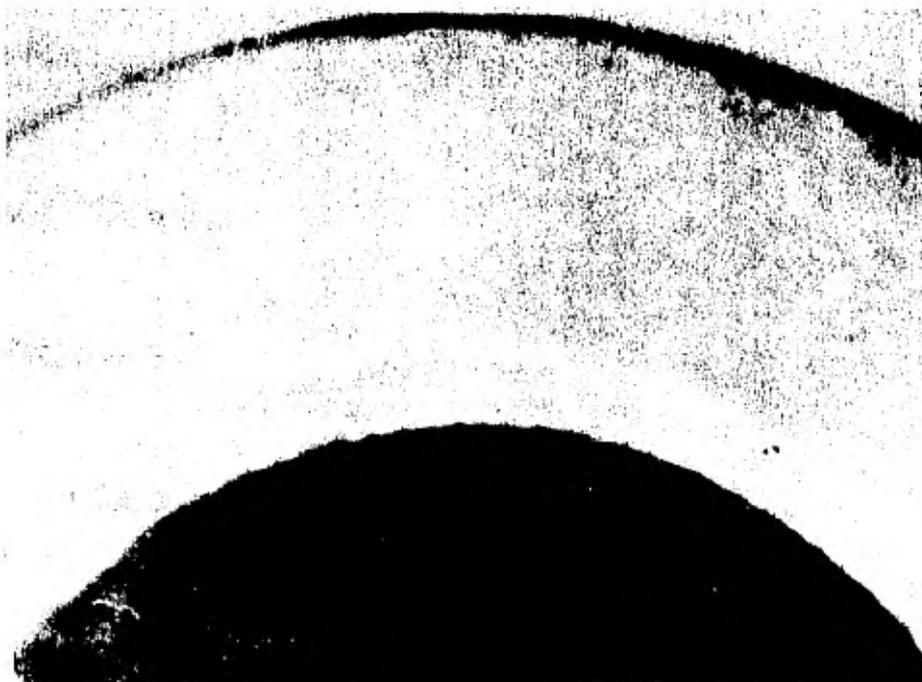
En las siguientes fotografías números 3 y 4 se muestra de una manera general (acero tipo 304 y 316). Las superficies sin ataque corrosivo o sea antes de la exposición. Y en las fotografías números 5, 6, 7, 8, 9 y 10 el agrietamiento de las probetas después de haber estado en el medio corrosivo; las fotografías fueron tomadas en el macroscópio que se encuentra en el laboratorio de pruebas mecánicas de esta facultad. Todas las probetas mostraban pequeñas grietas, principalmente en los bordes a la primera hora de exposición, siendo más visibles en el acero tipo 304.

Las probetas fueron pesadas antes y después de la prueba con el fin de conocer datos acerca de la velocidad de corrosión y profundidad de ataque de cada una de ellas, así como el tiempo teórico de duración de la prueba, obteniendo los resultados que se mostrarán más adelante.

Posteriormente se muestran las fotografías números 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 obtenidas mediante observación metalográfica de las probetas corroídas con el objeto de observar el tipo de agrietamiento presentado, y finalmente se muestran fotografías números 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 y 29 obtenidas mediante el microscópio electrónico de barrido donde se observa también el tipo de agrietamiento y además el tipo de fractura que se presentó así como la presencia de los productos de la corrosión.

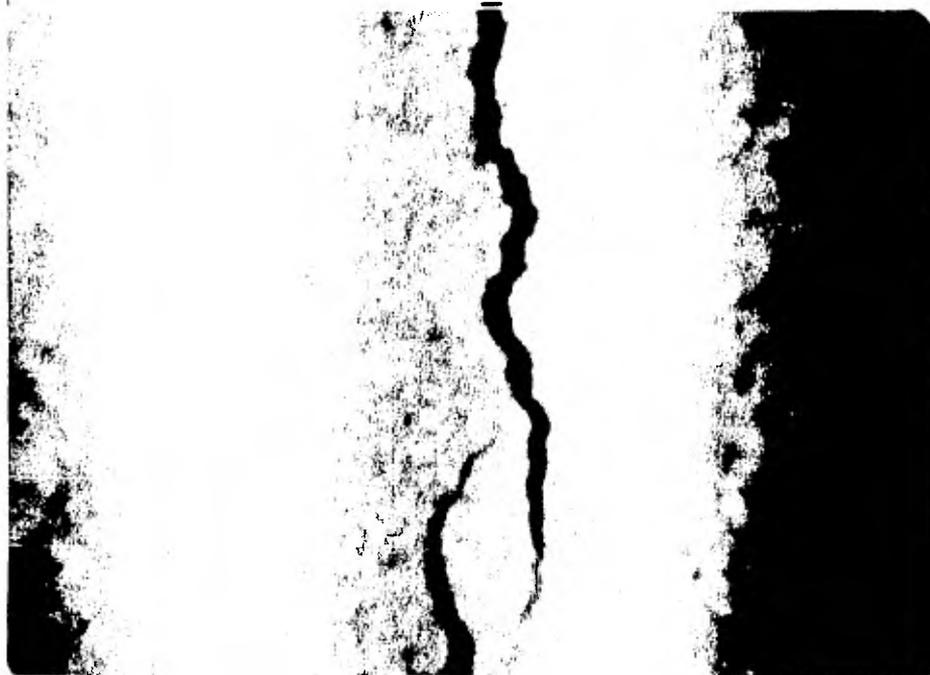


Fotografía No. 3 Vista macroscópica de las superficies de las probetas antes de la exposición al medio corrosivo. (aumento = 10x)



Fotografía No. 4 Vista macroscópica lateral de las probetas antes de la exposición al medio corrosivo. (aumentos = 10 X).

ACERO INOXIDABLE TIPO 316.

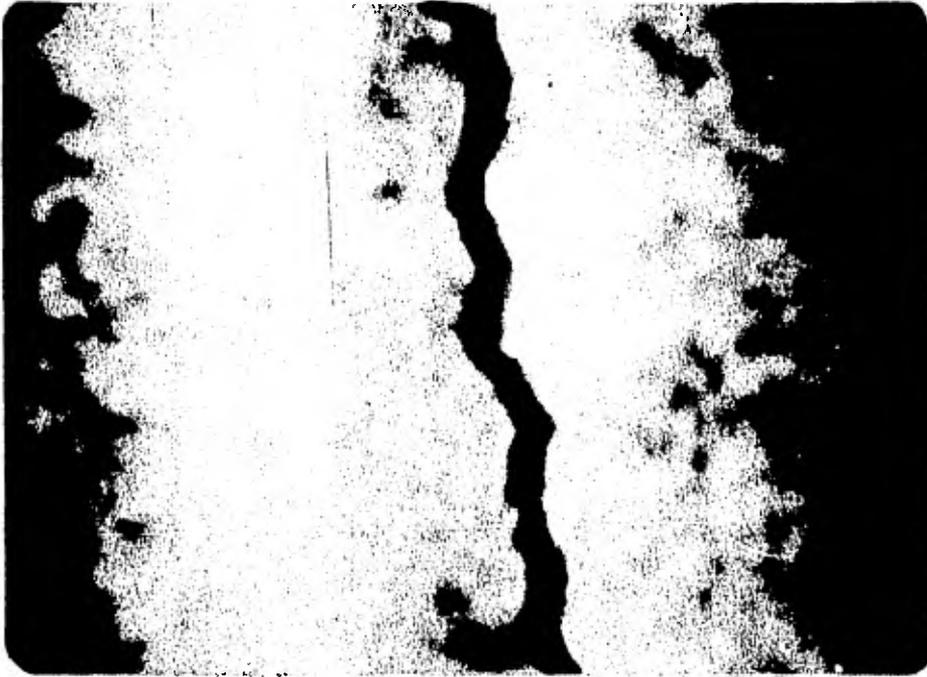


Fotografías No. 5 Vista general macroscópica que presentó la superficie después de la exposición al medio. (aumentos = 6.3X)

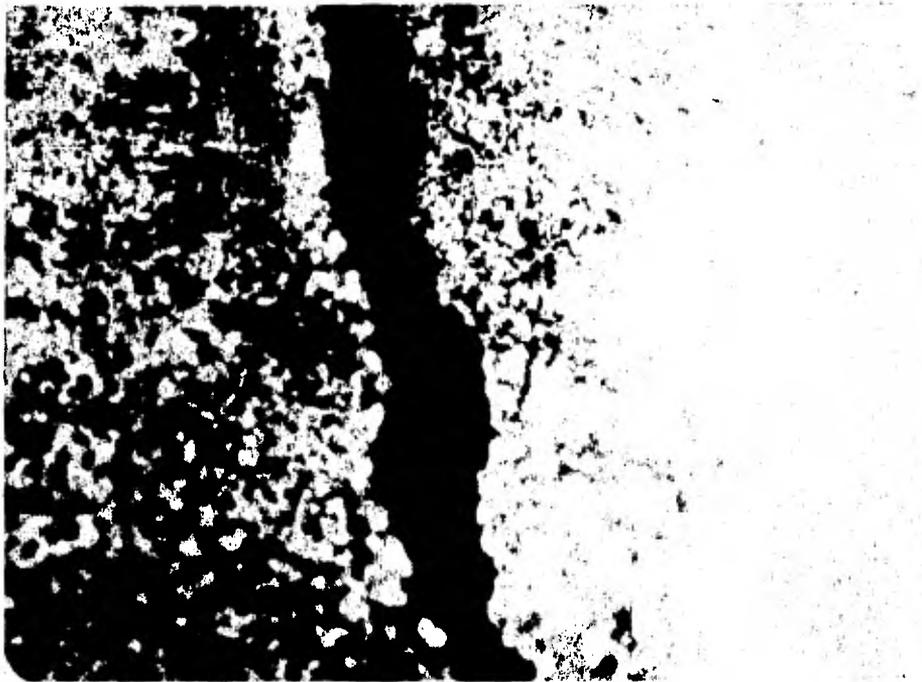


Fotografía No. 6 Vista macroscópica lateral de la probeta después de la exposición al medio. (aumentos = 16X).

ACERO INOXIDABLE TIPO 304.



Fotografía No. 7. Vista macroscópica de la superficie después de la -
exposición (aumentos = 6.3 X)



Fotografía No. 8. Igual a la anterior pero con mayor aumento (aumento =
16X).



Fotografía No. 9 Vista macroscópica lateral de la probeta después de la exposición al medio (aumento = 6.3 X).



Fotografía No. 10 Vista macroscópica del agrietamiento por la parte interior del doblado de la probeta, donde se muestra que atraviesa el material (aumento = 16 X).

Calculos de:

a).- Velocidad de corrosión en "mdd" (miligramos/dm² x dfa)

b).- Profundidad de ataque (penetración) en " mpy " - -
milipulgadas / año) y en "cpa" (centímetros/ año).

c).- Tiempo teórico de duración de la prueba (horas).

Las probetas tienen una área de 0.1935 dm².

Tiempo de exposición = 12 horas = 0.5 dfa.

Densidad del material = 8.027 gramos/ cm³.

PROBETA No. 1

Acero inoxidable austenítico tipo 316.

Peso antes de la exposición = 80.3986 gramos.

Peso después de la exposición = 80.3761 gramos.

Pérdida de peso = 80.3986 - 80.3761 = 22.5 miligramos.

mdd= 22.5/ 0.1935 X 0.5

$$\underline{\text{mdd} = 235.5}$$

mpy = mdd X 1.44/ Dens = 235.5 X 1.44 / 8.027

$$\underline{\text{mpy} = 41}$$

cpa= mdd X 0.00365/ Dens = 235.5 X 0.00365/8.027

$$\underline{\text{cpa} = 0.105}$$

Tiempo teórico = 2000/mpy = 2000/41

$$\underline{T = 48.7}$$

PROBETA No. 2

Acero inoxidable austenítico tipo 304.

Peso antes de la exposición = 67.2580 gramos.

Peso después de la exposición = 67.2325 gramos.

Pérdida de peso = 67.2580 - 67.2325 = 26.6 miligramos.

$mdd = 26.6 / 0.1935 \times 0.5$

$mdd = 274.86$

$mpy = 274.86 \times 1.44 / 8.027$

$mpy = 49$

$cpa = 274.86 \times 0.00365 / 8.027$

$cpa = 0.124$

Tiempo teórico = 2000/49

$t = 40.8$

PROBETA No. 3

Acero inoxidable austenítico tipo 316.

Peso antes de la exposición = 80.8861 gramos.

Peso después de la exposición = 80.8735 gramos.

Pérdida de peso = 80.8861 - 80.8735 = 14.6 miligramos.

$mdd = 14.6 / 0.1935 \times 0.5$

$mdd = 150.86$

$mpy = 150.86 \times 1.44 / 8.027$

$mpy = 27$

$cpa = 150.86 \times 0.00365 / 8.027$

$mpy = 150.86 \times 1.44 / 8.027$

$mpy = 27$

$cpa = 150.86 \times 0.00365 / 8.027$

$cpa = 0.068$

Tiempo teórico = 2000/27

$t = 74$

PROBETA No. 4

Acero inoxidable austenítico tipo 304

Peso antes de la exposición = 68.9272 gramos.

Peso después de la exposición = 68.9110 gramos.

Pérdida de peso = 68.9272 - 68.9110 = 16.2 miligramos.

$mdd = 16.2 / 0.1935 \times 0.5$

$mdd = 167.40$

$mpy = 167.40 \times 1.44 / 8.027$

$mpy = 30$

$cpa = 167.40 \times 0.00365 / 8.027$

$cpa = 0.076$

Tiempo teórico = 2000 / 30

$t = 66.6$

Las siguientes dos probetas fueron expuestas a una concentración del 42% en peso, con una temperatura de 154± 1°C. (Ésto puede verse en la gráfica temperatura - concentración que se mostró anteriormente).

PROBETA No. 5

Acero inoxidable austenítico tipo 304.

Peso antes de la exposición = 69.5336 gramos.

Peso después de la exposición = 69.4763 gramos.

Pérdida de peso = 69.5336 - 69.4763 = 57.3 miligramos.

$mdd = 57.3 / 0.1935 \times 0.5$

$mdd = 592.1$

$mpy = 592.1 \times 1.44 / 8.027$

$mpy = 106$

$cpa = 592.1 \times 0.00365 / 8.027$

$cpa = 0.269$

Tiempo teórico = 2000 / 106

$t = 18.8$

PROBETA No. 6

Acero inoxidable austenítico tipo 316.

Peso antes de la exposición = 73.5190 gramos.

Peso después de la exposición = 73.4645 gramos.

Pérdida de peso = 73.5190 - 73.4645 = 54.45 miligramos.

$mdd = 54.45 / 0.1935 \times 0.5$

$mdd = 563.16$

$mpy = 563.16 \times 1.44 / 8.027$

$mpy = 101$

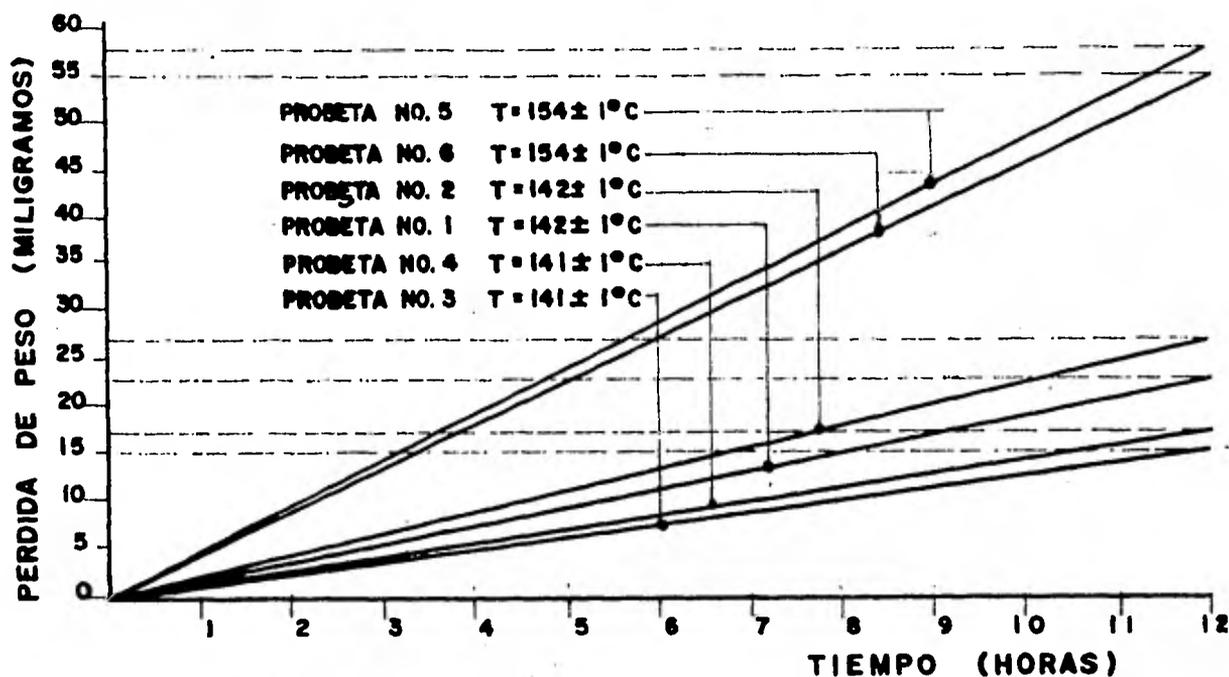
$cpa = 563.16 \times 0.00365 / 8.027$

$cpa = 0.256$

Tiempo teórico = 2000 / 101

$t = 19.8$

GRAFICA DE RESULTADOS.



Gráfica de tiempo de exposición contra pérdida de peso.

De esta gráfica se observa que para un mismo tiempo de exposición, al variar la concentración de la solución variaba también la temperatura de ebullición de la solución, obteniéndose una diferente pérdida de peso para cada tipo de acero cuando variaba la temperatura de ebullición.

EXAMEN METALOGRAFICO.

Tipo de Agrietamiento presentado en los aceros inoxidables 304 y 316.



Fotografía No. 11.- Estructura Austenítica presentada en los tipos de acero 304 y 316 (sin ataque corrosivo)

aumentos = 160 X



Fotografía No. 12.- Grieta principal predominantemente transgranular - (T) y algunas intergranulares (I) en el acero tipo 316. (aumentos= 160X)



Fotografía No. 13.- Grietas intergranulares adyacentes a la grieta principal presentadas en el acero tipo 316.

(aumentos = 160 X)



Fotografía No. 14.- Probeta vista lateralmente respecto a la profundidad de agrietamiento. Se puede observar que la grieta casi atraviesa el material, acero 316 (aumentos= 80 X).



Fotografía No. 15.- Grieta principal predominantemente transgranular (T) y otras adyacentes intergranulares (I) presentadas en el acero tipo 304 (aumentos = 80 X).



Fotografía No. 16.- Agrietamiento intergranular (I) y Transgranular - - (T) adyacente a la grieta principal, en el acero tipo 304. (aumentos = 160 X)



Fotografía No. 17.- Vista lateral del acero tipo 304, profundidad de - -
agrietamiento (atraviesa completamente el material).

(aumentos = 160 X).

Las siguientes fotografías fueron tomadas en el Microscopio Electrónico de Barrido (JEOL) del Instituto de Investigaciones de Materiales.

Acero Inoxidable tipo 316.



Fotografía No. 18
tipo de grietas presentadas en
éste material
aumentos = 50 X



Fotografía No. 19 Vista interior
de una grieta, mostrándose los -
productos de la corrosión.
aumentos = 2000 X



Fotografía No. 20 Vista interior
de una grieta, mostrándose la for
ma de desprendimiento del material.
aumentos = 2000 X

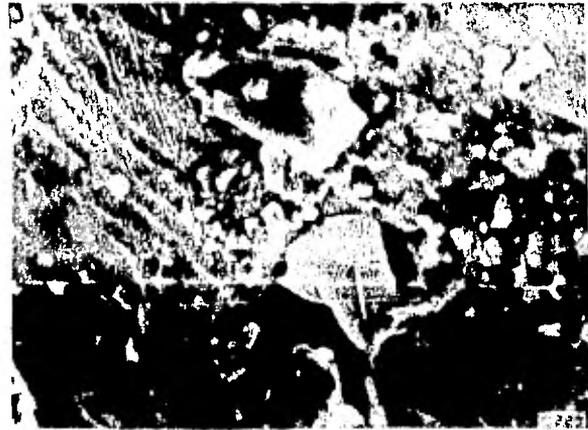


Fotografía No. 21 Vista interior
de una grieta, mostrándose inicic
de la grieta, desprendimiento del
material y productos de corrosión
aumentos = 1500

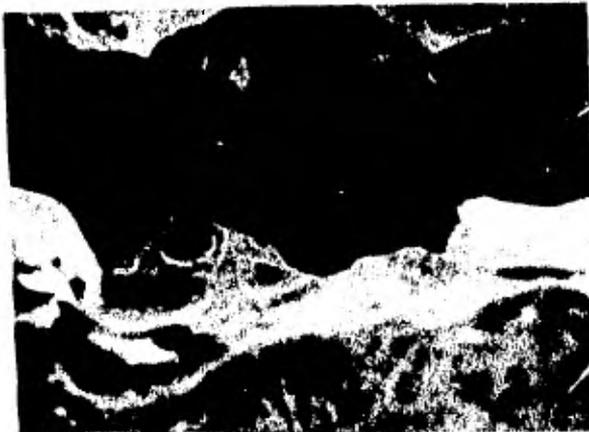
ACERO INOXIDABLE TIPO 304



Fotografía No. 22 tipo de grietas presentadas en este material.
aumentos = 50 X



Fotografía No. 23. Vista interior de una grieta, mostrándose las líneas de desgarre en diferentes orientaciones y productos de la corrosión.
aumentos = 750 X.

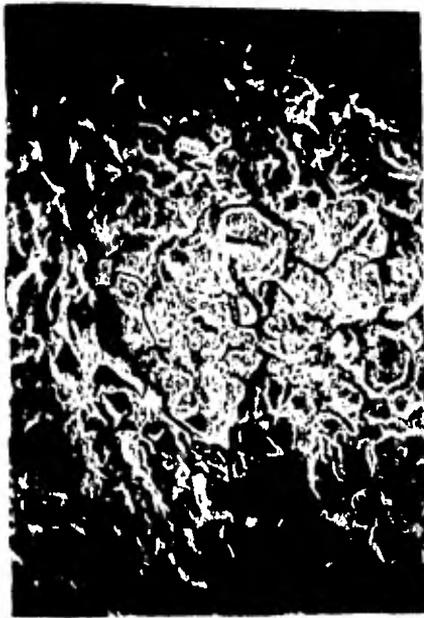


Fotografía No. 24.-Vista interior de una grieta, mostrándose el tipo de desprendimiento del material.
aumentos = 1000 X

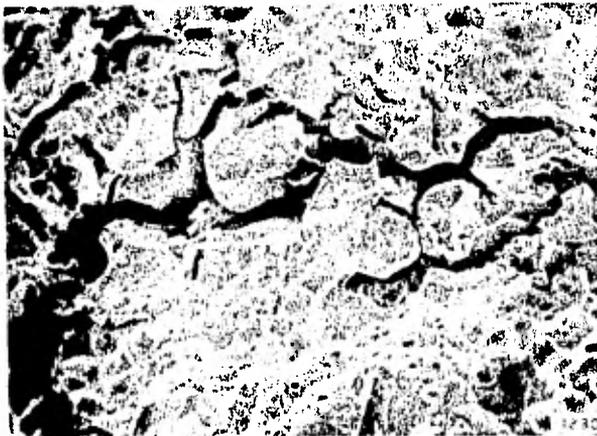


Fotografía No. 25.-Vista de la estructura granular, observándose porosidad y fractura intergranular.

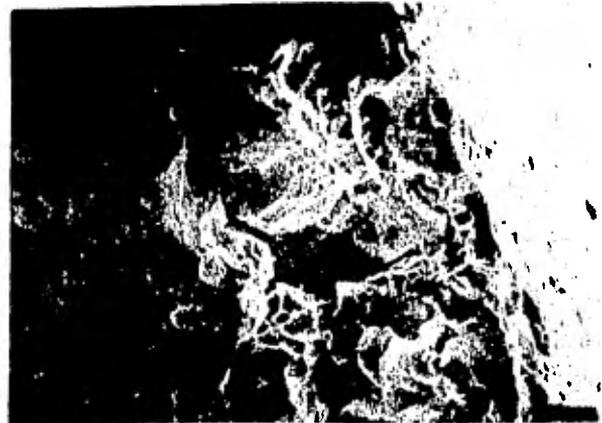
aumentos = 1500 X



Fotografía No. 26 Vista en la zona fracturada, predomina - agrietamiento intergranular.

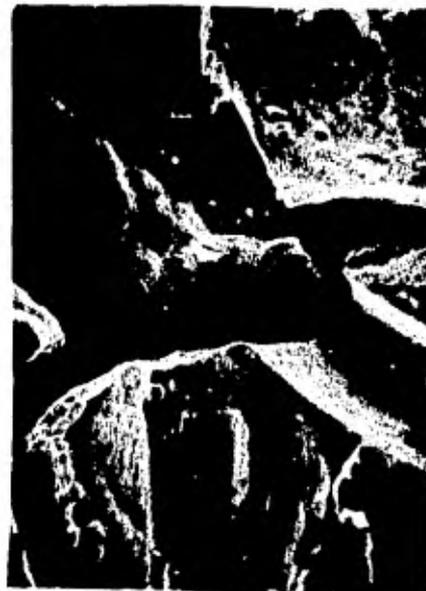


Fotografía No. 28.- Vista de un agrietamiento intergranular, algunos productos de la corrosión y poros
aumentos = 150 X



Fotografía No. 27.-Vista en la Zona fracturada el inicio y propagación de una grieta intergranular; presenta alguna porosidad.

aumentos = 200 X



Fotografía No. 29 Idem a la anterior pero a mayor aumentos - mostrándose el tipo de desprendimiento entre granos.
aumentos = 750 X.

DISCUSION DE RESULTADOS

De los cálculos presentados y de la gráfica de resultados se puede notar que a medida que aumenta la concentración de la solución --- aumenta la temperatura de ebullición de ésta, teniendo como resultado una diferencia apreciable en la velocidad de corrosión, penetración y el tiempo teórico de duración de la prueba.

Como puede observarse en los resultados entre las probetas 1, 2 y 3.4. existió una diferencia mínima en la temperatura de ebullición ($\pm 1^{\circ} \text{C}$) con lo cual se obtuvo también diferencia en la velocidad de corrosión, penetración y tiempo de prueba; así como también para las probetas 5 y 6 que se probaron a una concentración mucho mayor que las anteriores 4.

Al comparar los resultados entre éstos dos tipos de acero (316 y 304) se observa que la velocidad de corrosión y penetración son mayores en el tipo 304 y el tiempo de duración de la prueba es menor en el tipo 304 con lo que se deduce que éste tipo de acero (304) es más susceptible al ACBT comparado con el tipo 316, y esto es debido a la presencia del MOLIBDENO que aumenta la resistencia química en presencia de iones cloro.

De las fotografías de la observación metalográfica - presentadas, se puede decir que el tipo de agrietamiento predominante fué transgranular observándose grietas adyacentes intergranulares y de las Fotografías obtenidas mediante el microscópio electrónico de barrido, se observa que el tipo de fractura fué del tipo dúctil y el agrietamiento predominante es intergranular, esto es debido a que la parte que se examinó fué una parte adyacente a la grieta --- principal donde el agrietamiento fué intercrystalino.

CAPITULO SEPTIMO

C O N C L U S I O N E S

1a.- Teniendo en cuenta que los aceros inoxidables de la serie 300, ofrecen una muy buena resistencia a la corrosión,-- sin embargo, en el presente trabajo se pone de manifiesto que éste tipo de acero (en especial el 304 y 316) son susceptibles -- a la corrosión cuando éstos se encuentran sometidos a esfuerzos - y en medios que contengan cloruros.

2a.- Al observar las fotografías y los cálculos hechos sobre éstos dos tipos de acero inoxidable, se puede decir que el acero tipo 304 es más susceptible a éste tipo de corrosión como - lo revela el hecho de una mayor velocidad de corrosión, una mayor penetración y un menor tiempo de prueba. Se puede mencionar que - en el acero tipo 316 parece tener un efecto benéfico la adición - de Molibdeno, que hace que el metal sea un poco más resistente - a la corrosión bajo tensión.

3a.- De todos los resultados obtenidos mediante microscopía Optica y Electrónica se concluye de acuerdo a lo expuesto - en la parte teórica, o sea, el tipo de agrietamiento predominante es transgranular con grietas adyacentes intergranulares, así como el tipo de agrietamiento que se presentó fué en apariencia del tipo frágil pero con la ayuda del microscópio electrónico se observó, por el tipo de desprendimiento del material, que la fractura es del tipo dúctil.

4a.- Por los resultados encontrados, se puede decir --

que para preveer o disminuir la corrosión de éstos tipos de aceros hay que evitar hasta donde sea posible que éstos se encuentren so-metidos a esfuerzos cuando esten en servicio con medios que contengan cloruros, o en su caso, tratar de evitar el uso de éstos ace-ros en los medios que contengan cloruros a una alta temperatura -- y concentración.

5a.- La utilidad de éstos tipos de pruebas, sirven como primera instancia para que junto con otros datos y estudios comple-mentarios hacen una elección del material y/o para prevenir posi--bles fracturas.

Por esta razón, es siempre recomendable tratar de prede-cir el comportamiento de cualquier acero en un medio específico, - mediante el uso de una prueba de total inmersión; tratando de re--producir al máximo las condiciones de trabajo, para que así se pue-da elegir el tipo de acero que ofrezca las mayores ventajas sobre la corrosión.

6a.- Este tipo de prueba puede ser de gran utilidad co-mo medio didactico para mostrar a las personas interesadas el féno-meno de CBT, debido a que es una prueba de corto tiempo y de fa-cil reproducibilidad.

7a.- Se sugiere para algún trabajo posterior sobre éste tema, el empleo de otros cloruros en concentraciones y temperaturas diferentes a las utilizadas en ésta prueba, así como la aplicación de esfuerzos por un método diferente, pudiendo seguir la teoría - presentada en éste texto.

B I B L I O G R A F I A

- | | |
|------------------|--|
| Mars G. Fontana | Corrosion Engineering
2a Edition
Internacional Student Edition
Mc Graw - Hill |
| Herbert H. Uhlig | Corrosión y control de Corrosión
Ediciones URMO, S.A. |
| NACE | Nace Basic Corrosion Course
Publicado por NACE
4ta. Edición 1973 |
| J. C. Scully | Funtamentos de la corrosión
URMO St de Ediciones |
| ASTM | ASTM Standars
Designación G 30- 72
Designación G 36- 73 |