



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS
ALEACIONES DE ALUMINIO COMERCIALES A LA
CORROSION BAJO TENSION**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A N :

**GERARDO DIAZ CORREA
FRANCISCO LOZADA CORONA**

MEXICO, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO COMERCIALES A LA CORROSION BAJO TENSION

I N D I C E

	PAGINA
CAPITULO I	
INTRODUCCION	2
ANTECEDENTES	3
1.1- HISTORIA DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES	6
1.2- CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO	9
1.3- APLICACIONES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO	12
CAPITULO II	
ASPECTOS TEORICOS	15
2.1- GENERALIDADES	15
2.2- IMPORTANCIA DE LA CORROSION	17
2.3- TIPOS DE CORROSION	17
2.4- MECANISMOS Y REACCIONES DE CORROSION	21
CAPITULO III	
CORROSION BAJO TENSION	26
3.1- DEFINICION	26
3.2- CARACTERISTICAS DEL ACBT	33
3.2.1- SUSCEPTIBILIDAD DEL METAL	35
3.2.2- MEDIO CORROSIVO	36
3.2.3- ESFUERZO DE TENSION	39
3.2.4- ASPECTOS MECANICOS DE LA C.B.T.	43

II

	PAGINA
3.2.5- TIEMPO DE FRACTURA	48
3.2.6- CONCENTRACION DEL MEDIO CORROSIVO	49
3.2.7- TEMPERATURA	50
3.2.8- TIPOS DE ALEACION	50
3.2.9- APARIENCIA MACROSCOPICA	51
3.2.10-PLANO DE ESFUERZOS	51
3.3- MORFOLOGIA DE LA GRIETA	55
3.4- MECANISMO DE AGRIETAMIENTO	58
3.4.1- PROPAGACION DE LA GRIETA	58
3.4.2- METODOS DE PREVENCION DE LA CORROSION BAJO TENSION	60
3.5- CORROSION BAJO TENSION EN ALEACIONES DE ALUMINIO	64

CAPITULO IV

PRUEBAS DE CORROSION	72
4.1- CLASIFICACION DE LAS PRUEBAS DE CORROSION	72
4.2- DESCRIPCION DE LAS PRUEBAS A NIVEL LABORATORIO DE CORROSION BAJO TENSION	79
4.3- NORMA PARA LA PREPARACION DE PROBETAS	87
4.4- NORMA PARA LA PREPARACION DE LA SOLUCION	100
4.5- DESCRIPCION DEL METODO DE INMERSION	103
4.6- TIEMPO DE PRUEBA	105
4.7- VELOCIDAD DE ATAQUE	106
4.8- ANALISIS DE PROBETAS DESPUES DE LA CORROSION	107
REPORTE	109

III

PAGINA

CAPITULO V

EXPERIMENTACION	112
5.1- TIPOS DE ALEACIONES ENSAYADAS	112
5.1.1- CARACTERISTICAS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO USADAS EN LA INVESTIGACION	112
5.1.2- CARACTERISTICAS DE LA ALEACION 2062	113
5.1.3- TRATAMIENTOS TERMICOS	113
5.1.4- CARACTERISTICAS DE LA ALEACION 6063	114
5.1.5- TRATAMIENTOS TERMICOS	114
5.2- DIMENSIONES DE LAS MUESTRAS	115
5.3- PREPARACION DE LAS MUESTRAS	115
5.4- PROCEDIMIENTO PARA EL DOBLADO EN FORMA DE "U"	116
5.5- DIRECCION DE ESFUERZOS APLICADOS	116
5.6- LIMPIEZA DE MUESTRAS ANTES DE LA INMERSION	118
5.7- IDENTIFICACION DE MUESTRAS	118
5.8- PESO DE MUESTRAS ANTES DE LA INMERSION	118
5.9- PREPARACION DEL MEDIO CORROSIVO	118
5.10-INMERSION DE LAS MUESTRAS EN EL MEDIO CORROSIVO	119
5.11-EQUIPO EMPLEADO EN EL LABORATORIO	119
5.12-AIREACION Y TEMPERATURA	122
5.13-METODO DE INMERSION	122
5.14-LIMPIEZA DE LAS MUESTRAS DESPUES DE LA CORROSION	122

IV

	PAGINA
5.15- PREPARACION DE LAS MUESTRAS PARA OBSERVA- CION METALOGRAFICA	123
CAPITULO VI	
RESULTADOS	125
DISCUSION DE RESULTADOS	133
CAPITULO VII	
CONCLUSIONES	138
BIBLIOGRAFIA	140

CAPITULO I

- INTRODUCCION -

El siguiente trabajo de investigación está enfocado al estudio de los daños que causa la corrosión bajo tensión en las propiedades, especialmente las mecánicas, de los metales y aleaciones.

Los daños causados por la corrosión bajo tensión pueden repercutir gravemente en las propiedades mecánicas de los metales.

La formación de óxido sobre la superficie metálica reducirá lógicamente el volumen del metal remanente. Si éste se encuentra bajo carga, se elevará la tensión aplicada al metal. Lo mismo sucederá si el metal está sometido a disolución.

Es necesario investigar nuevas técnicas alternativas para disminuir la corrosión bajo tensión y así aumentar la vida útil de los metales.

En México existe poca información acerca de la corrosión bajo tensión, es por eso que la ingeniería se ha encontrado con muchos problemas para el diseño y construcción de equipo, el cual debe de cumplir una serie de requisitos para su perfecta operación.

Con diversos estudios realizados se han desarrollado una gran cantidad de nuevas aleaciones de las que se necesita un completo análisis de sus características microscópicas ya que en muchos casos la teoría es insuficiente para seleccionar la aleación,

- INTRODUCCION -

El siguiente trabajo de investigación está enfocado al estudio de los daños que causa la corrosión bajo tensión en las propiedades, especialmente las mecánicas, de los metales y aleaciones.

Los daños causados por la corrosión bajo tensión pueden repercutir gravemente en las propiedades mecánicas de los metales.

La formación de óxido sobre la superficie metálica reducirá lógicamente el volumen del metal remanente. Si éste se encuentra bajo carga, se elevará la tensión aplicada al metal. Lo mismo sucederá si el metal está sometido a disolución.

Es necesario investigar nuevas técnicas alternativas para disminuir la corrosión bajo tensión y así aumentar la vida útil de los metales.

En México existe poca información acerca de la corrosión bajo tensión, es por eso que la ingeniería se ha encontrado con muchos problemas para el diseño y construcción de equipo, el cual debe de cumplir una serie de requisitos para su perfecta operación.

Con diversos estudios realizados se han desarrollado una gran cantidad de nuevas aleaciones de las que se necesita un completo análisis de sus características microscópicas ya que en muchos casos la teoría es insuficiente para seleccionar la aleación,

desde el punto de vista del ACBT.

Por eso es de mucha importancia, tomar en cuenta el costo, disponibilidad y características de los metales.

Los estudios sobre la corrosión bajo tensión se hacen con el fin de alargar la vida útil de los metales y sus aleaciones.

Los antecedentes que a continuación se mencionan dan una información sobre este tipo de corrosión.

- ANTECEDENTES -

El agrietamiento por corrosión bajo tensión se convirtió - en un problema general debido a la introducción del metal estirado en frío, durante la segunda parte del siglo XIX. Hacia el final de este siglo apareció en el latón el agrietamiento.

Durante esta época el problema fué lo suficientemente importante que adquirió su propio nombre "SEASON CRACKING".

Durante este periodo el profesor W. Chandler Roberto Austen (De aquí nació Austenita), hizo dos aportaciones importantes al problema:

Mostró que un alambre estirado en frío de una aleación de - oro, plata y cobre sufriría agrietamiento por corrosión bajo tensión si se depositaba una gota de Cloruro Férrico (Fe_3Cl). Así demostraba que el fenómeno no se limitaba al latón, sino que se presentaba en una serie de diferentes aleaciones. Con ello el - Profesor W. Chandler Roberts le dió por primera vez importancia

al problema de corrosión bajo tensión.

Al final del siglo XIX se discutía el papel de las tensiones residuales efecto del conformado en frío, y se decía que eran los causantes del agrietamiento por corrosión bajo tensión. Se observó que la distribución de los esfuerzos tiene una compleja geometría. En el bronce fué muy conocido que las tensiones se aliviaban mediante tratamientos térmicos para productos formados en frío. Con este descubrimiento se contribuyó al desarrollo de las reglas en las que se establece la existencia que hay un medio específico corrosivo y un determinado esfuerzo los cuales pueden causar ACBT en una aleación dada.

También a fines de este siglo fué cuando se encontró que el amoniaco juega un papel muy importante en el agrietamiento por corrosión bajo tensión del cobre y sus aleaciones.

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 y sus aportaciones.

A principios del siglo XX el ACBT fué observado en aleaciones de aluminio, y fué atribuido a la humedad atmosférica. Tam bién durante este periodo fué observada la corrosión bajo tensión en aceros martensíticos, sin embargo no fué reconocido sino hasta la era de los programas Aeroespaciales. Y así, conforme fué pasando el tiempo se estuvo detectando la susceptibilidad de diferentes materiales. En 1930 el acero inoxidable se empezó a usar en gran escala en las industrias de papel, Química y Petrólera y el ACBT fué observado en esta clase de aleaciones a temperaturas elevadas.

También en 1930, aleaciones de magnesio para aviones militares fueron encontradas susceptibles al ACBT en atmósferas húmedas.

Durante el año de 1950 los programas aeroespaciales desarrollaron aleaciones, para disminuir el problema de algunos aceros martensíticos que eran susceptibles al ACBT. Las aleaciones de Titanio eran también susceptibles en contacto con cloruro de sodio - NaCl a altas temperaturas. Estas experiencias confirmaron la suposición de que el ACBT, es un fenómeno esperado en gran número de aleaciones.

Para 1960 la técnica de producir grandes réplicas de superficies de fracturas había sido desarrollada en forma básica y esto pasó a ser de suma importancia para un gran número de investigadores.

Esta aplicación al ACBT es inevitable y productiva, ya que con ayuda del microscopio electrónico, en la superficie se puede observar la fractura en análisis de fallas.

Así por ejemplo se pueden percibir diferencias en la topología de la fractura y la pequeña diferencia entre ACBT y por picadura la cual es siempre macroscópicamente y frágil en apariencia y - las grietas de fractura frágil en el mismo material.

En este mismo año de 1960 la mecánica de fractura comenzó a ser aplicada. Tanto así que se aplicó la teoría del campo de esfuerzos cerca de la grieta de CB.T. en una trayectoria determinada, particularmente después de que se ha hecho el análisis para el esfuerzo último en vigas de acuerdo a la mecánica de fractura, e in-

cluso se han hecho desarrollos posteriores.

Concluiremos diciendo que en el análisis de mecánica de fracturas se tiene que usar la metodología y algo de la instrumentación desarrollada, adecuada y conveniente para el estudio de casos en particular del ACBT.

1.1. - HISTORIA DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio es un metal que cuando es puro, pero sobre todo empleado como aleación ha alcanzado un lugar muy importante en el campo de los metales.

Se han encontrado testimonios acerca del empleo de alúmina (Oxido de Aluminio) en el norte de Irak alrededor de 5000 años A.C.

No fué sino hasta el siglo XIX cuando el hombre pudo separar el aluminio del oxígeno, con el que se combina en su estado natural, y clasificarlo como elemento metálico con propiedades únicas y valiosas.

Acercas de la existencia de un metal que formaba parte de la composición de la arcilla, conjeturó en 1808 el científico inglés Davy fué quien le dió el nombre de aluminio.

En 1825 el danés Oersted obtuvo por vez primera partículas de aluminio. Los autores del procedimiento que se emplea actualmente para fabricar el aluminio (Electrólisis de sales fundidas) fueron el norteamericano Charles Hally el francés Paul Heroult. Ambos de manera independiente, el uno del otro patentaron el procedimiento.

Hasta 1890 solo se habían producido en el mundo 200 ton. de aluminio (que antes valía tanto como el oro ahora), pero, en la década siguiente se produjeron 28000 ts. y en 1930 en solo un año 27000 tn. El volumen actual de la producción mundial de aluminio (sin contar el obtenido en la U.R.S.S.) es de alrededor de 10 millones de ton. al año.

El aluminio metálico que se produce mediante los modernos procesos de reducción, se obtienen en las tinajas electrolíticas - con un contenido de pureza mínimo del 99.5 %.

El 0.5% restante consiste en residuos de otros elementos que el proceso de reducción no pudo remover de este aluminio básico. Puede producirse una gran familia de aleaciones. Un proceso - intenso de refinación puede producir aluminio de alta pureza hasta de 99.9% que se utiliza como catalizador en la producción de gasolina de alto octanaje y para piezas de joyería; en forma de hoja se emplea bastante en la industria electrónica, sin embargo la - mayor parte del aluminio se emplea en forma de aleaciones. A continuación enlistamos algunos de los principales aleantes:

Cobre, magnesio, manganeso, silicio, zinc.

Además de los elementos aleantes mencionados pueden agregarse muchos otros elementos metálicos, para mejorar las propiedades de los grupos básicos de las aleaciones o para proporcionar - efectos especiales. Ejemplos representativos incluyen:

- a).- El Bismuto, el Plomo y el Estaño, imparten una mejor maquinabilidad.
- b).- El Berilio mejora las características de soldadura

y vaciado.

- c).- El Boro ayuda a incrementar la conductividad eléctrica.
- d).- El Cromo, el Zirconio y el Vanadio se utilizan para producir efectos especiales.
- e).- El Níquel imparte una mayor resistencia a temperaturas elevadas.
- f).- El Titanio ejerce un poderoso efecto de refinamiento de grano lo que mejora la resistencia y la ductilidad.

Así pues una serie de elementos que constituyen aleaciones de aluminio forman soluciones sólidas de solubilidad limitada y con concentración variable.

Para que sea más conveniente estudiar la gran variedad de las aleaciones de aluminio hay que clasificarlas en aleaciones de composición binaria y complicada.

Las aleaciones de composición binaria comprenden las aleaciones de los sistemas: Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn. Las aleaciones de composición complicada se producen por adición de un tercero o cuarto elemento a las aleaciones de composición binaria.

La gran resistencia a la corrosión del aluminio y sus aleaciones se debe a la formación inmediata sobre las superficies expuestas a la acción de los agentes atmosféricos de una fina película invisible de óxido que protege al material de una posterior oxidación. Si, por cualquier causa la película de óxido se elimina, en muchos medios ambientes se forma inmediatamente una nueva

película y el metal continúa totalmente protegido.

Se puede formar una capa de óxido de cierto espesor sobre el aluminio o sus aleaciones introduciendo el metal en una solución acuosa de ácido sulfúrico con una concentración de ácido de 15 a 25%. Este procedimiento es conocido como anodizado.

La resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio-cobre y aluminio-zinc, aunque para la mayoría de las aplicaciones es satisfactoria es inferior generalmente a los de otras aleaciones de aluminio. En determinadas condiciones sufren corrosión intergranular.

Investigaciones posteriores estuvieron interesadas en los efectos así como la influencia de otros elementos para mejorar propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Cu y Al-Zn y su resistencia más amplia a la corrosión para campos específicos de aplicación.

1.2.- CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

Una clasificación común de las aleaciones de aluminio es representada en la siguiente tabla (Tabla 1) que muestra además su composición química típica.

Uno de los problemas serios de ACBT, es el agrietamiento de las aleaciones de aluminio (Series 2XXX y 6XXX).

Los principales elementos de la serie 2000 son: cobre - 3.8 a 4.9 % Magnesio 1.2 a 1.8%

Los principales aleantes de la serie 6000 son: Magnesio 0.8 a 1.4%, Cobre 0.7 a 1.2%, Silicio 0.9 a 1.8%, Manganeso 0.6 a 1.1%

Alloy	Zinc	Magnesium	Copper	Iron	Silicon	Manganese	Chromium	Titanium	Others	
									Each	Total
2014	0.25	0.20-0.8	3.8-5.0	0.7	0.50-1.2	0.48-1.2	0.18	0.15	0.05	0.15
X2020	0.25	0.03	4.0-5.0	0.4	0.40	0.30-0.8	—	0.10	0.05	0.15
2021	0.10	0.02	3.8-4.8	0.3	0.20	0.20-0.40	—	0.02-0.10	0.05	0.15
2024	0.25	1.2-1.8	3.8-4.8	0.50	0.50	0.30-0.9	0.10	—	0.05	0.15
2124	0.25	1.2-1.8	3.8-4.8	0.30	0.20	0.30-0.9	0.10	—	0.05	0.15
2218	0.10	0.02	3.8-4.8	0.30	0.20	0.20-0.40	—	0.02-0.10	0.05	0.15
2618	—	1.3-1.8	1.8-2.7	0.8-1.3	0.25	—	—	0.04-0.10	0.05	0.15
5062	0.10	2.2-2.8	0.10	0.45 Fe+Si	—	0.10	0.15-0.25	—	0.05	0.15
5083	0.25	4.0-4.8	0.10	0.40	0.40	0.30-1.0	0.05-0.25	0.15	0.05	0.15
5086	0.25	3.8-4.8	0.10	0.50	0.40	0.20-0.7	0.05-0.25	0.15	0.05	0.15
X5090	0.20	6.0-8.0	0.25	0.50	0.50	0.35	0.05-0.20	0.015	0.05	0.15
6454	0.25	2.4-3.0	0.10	0.40 Fe+Si	—	0.50-1.0	0.05-0.20	0.20	0.05	0.15
6458	0.25	4.7-5.5	0.10	0.40 Fe+Si	—	0.50-1.0	0.05-0.20	0.20	0.05	0.15
8081	0.25	0.8-1.2	0.15-0.40	0.7	0.40-0.8	0.15	0.04-0.20	0.15	0.05	0.15
8086	0.25	0.8-1.4	0.7-1.2	0.50	0.9-1.8	0.8-1.1	0.40	0.20	0.05	0.15
8079	0.25	0.50-1.2	0.15-0.40	0.50	1.0-1.7	0.40-1.0	0.10	0.15	0.05	0.15
8181	0.25	8.45-0.8	0.35	1.0	0.8-1.2	0.20	0.15-0.20	0.15	0.05	0.15
7001	8.8-9.0	2.8-3.4	1.8-2.8	0.40	0.35	0.20	0.18-0.25	0.20	0.05	0.15
	4.0-5.0	1.8-1.8	0.10	0.40	0.35	0.20-0.70	0.05-0.20	0.01-0.05	0.05	0.15
X7007	6.0-7.0	1.4-2.2	0.25	0.40 Fe+Si	—	0.40	0.05-0.25	0.01-0.05	0.05	0.15
7030	3.5-4.5	2.3-3.3	0.10	0.40	0.30	0.10-0.40	0.15-0.25	0.10	0.05	0.15
7049	7.2-8.2	2.8-2.8	1.2-1.8	0.35	0.25	0.20	0.10-0.22	0.10	0.05	0.15
X7050	5.7-6.7	1.8-2.8	1.0-2.8	0.15	0.12	0.10	0.04	0.05	0.04	0.15
7075	3.1-4.1	2.1-2.9	1.2-2.8	0.50	0.40	0.30	0.18-0.26	0.20	0.05	0.15
7076	7.0-8.0	1.2-2.8	0.3-1.0	0.80	0.48	0.30-0.80	—	0.20	0.05	0.15
A274	6.5-6.5	2.1-2.5	0.7-1.8	0.50	0.40	0.10	0.15-0.25	0.10	0.05	0.15
7079	1.8-4.8	2.8-3.7	0.48-0.8	0.40	0.30	0.10-0.20	0.10-0.25	0.10	0.05	0.15
X7086	3.0-7.0	1.5-3.0	0.50-1.50	0.40	0.30	0.10-0.70	0.25	0.20	0.05	0.15
7175	5.1-6.1	2.1-2.9	1.2-2.8	0.20	0.15	0.10	0.18-0.30	0.10	0.05	0.15
7178	6.3-7.3	2.4-3.1	1.8-2.4	0.50	0.40	0.30	0.18-0.26	0.20	0.05	0.15
X7475	6.2-6.2	1.8-2.8	1.2-1.8	0.12	0.10	0.05	0.18-0.25	0.05	0.05	0.15
Cladding alloys										
1230 ^{1b}	0.10	—	0.10	0.7 Fe+Si	—	0.05	—	—	0.05	—
8080 ^{1f}	0.20	0.8-1.5	0.10	0.8	0.26-1.8	0.05	0.35	0.10	0.05	0.15
7088 ¹²	4.4-5.5	0.7-1.4	0.05	0.10	0.10	0.05	0.12-0.25	0.05	0.05	0.10
7011 ¹³	4.0-5.5	1.8-1.8	0.05	0.20	0.15	0.10-0.30	0.05-0.20	0.05	0.05	0.15
7072 ¹⁴	0.2-1.0	0.10	0.10	0.7 Fe+Si	—	0.10	—	—	0.05	0.15
Welding wires										
2319	0.10	0.02	5.8-8.8	0.30	0.20	0.20-0.40	—	0.10-0.20	0.05 ¹⁵	0.15
4043	0.10	0.05	0.30	0.8	4.5-6.6	0.05	—	0.20	0.05 ¹⁶	0.15
4145	0.20	0.15	3.3-4.7	0.8	9.3-10.7	0.15	0.15	—	0.05	0.15
5036	2.4-3.2	2.3-4.3	0.03	0.40	0.10	0.30-0.50	0.10-0.20	0.10	0.05 ¹⁶	0.10

TABLA No. 1 COMPOSICION QUIMICA DE ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

En general, la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio se debe a la formación, en la superficie de las mismas de una película pasiva. Se forma esta película siempre de que el medio que rodea la aleación sea capaz de ceder oxígeno.

El cobre, magnesio, manganeso, silicio, son los elementos base de las aleaciones de aluminio, siendo el cobre el elemento que mayor influencia tiene con 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 es tán 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 y otras propiedades de algunos de los distintos elementos que intervienen en las aleaciones de aluminio.

COBRE.- Hace a las aleaciones tratables térmicamente e incrementa la fuerza y la dureza.

MAGNESIO.- Incrementa la resistencia a la tensión, la resistencia a la corrosión en atmósferas marinas, la dureza y la facilidad para soldarse.

MANGANESO.- Incrementa la resistencia a la corrosión.

SILICIO.- Hace descender el punto de fusión, incrementa la facilidad para fundirse y en combinación con el magnesio procuce aleaciones tratables térmicamente con una buena ductibilidad y resistencia a la corrosión.

ZINC.- Tiende a aumentar la dureza y en combinación con -
reducidos porcentajes de magnesio produce aleaciones tratables -
térmicamente con alto grado de resistencia.

Para eliminar las tensiones residuales uno de los medios -
más eficaces es de someter las aleaciones de aluminio a un "Trata-
miento de Eliminación de Tensiones".

1.3.- APLICACIONES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

El aluminio se utiliza en diferentes medios como en la in-
dustria de la construcción, transporte, conductores de electrici-
dad, distribución y empaque de comida.

Debido a las propiedades del aluminio como son su poco pe-
so, resistencia, resistencia a la corrosión, aptitud para la de-
formación plástica, este metal juega un papel muy importante en el
diseño y construcción de cualquier cosa que se pueda mover, volar,
flotar y manejar.

En particular nos estamos refiriendo a la industria auto-
motriz en promedio se supone que un kilo de aluminio en un auto -
puede reemplazar a tres kilos de fundición y de acero.

El aluminio utilizado en un auto es más económico porque
gracias a su poco peso ahorra material de las partes de soporte -
(disminuye el peso y las dimensiones).

En el transporte marítimo, el aluminio se utiliza para -
construir los cascos de barcos pequeños, yates y otros particular-
mente para navegación fluvial y vehículos navales muy rápidos.

Ultimamente el aluminio se utiliza en la construcción de tanques para gases licuados. El gas condensado se transporta en tanques esféricos hechos de aluminio de 30 m. de diámetro. 6 de tales esferas se juntan para formar un sistema de transporte.

Las aleaciones de Al-Cu se aplican en estructuras de aviones, roblones, artículos de ferrería, ruedas de camión y tornillería.

Para la fabricación de piezas que han de estar sometidas a temperaturas elevadas como ocurre con las culatas de los cilindros de motores forjados y con los pistones. Se ha desarrollado una aleación aluminio-cobre con un 2% de Níquel.

En transporte de la energía eléctrica el aluminio es el material básico y más energía eléctrica se produce en el mundo que se distribuye mediante cables de aluminio (con una pequeña cantidad de hierro).

La aplicación del aluminio para el empaque evita la pérdida de comida y ahorra mucha energía cuando está es transportada.

En general debido al almacenamiento de cereales en graneros se pierden millones de toneladas de grano por año. Estas pérdidas se pueden evitar almacenando el grano y secándolo en tolvas de aluminio.

C A P I T U L O I I

ASPECTOS TEORICOS

2.1.- GENERALIDADES

El término corrosión se define como el deterioro de las propiedades de un material (comúnmente un material metálico), a causa de una reacción con el medio ambiente en que se encuentra.

Además esta definición admite que otros materiales diferentes a los metales se pueden corroer. El deterioro de madera, cerámicos, plásticos, etc., debe también ser estudiada por la ingeniería de corrosión y puede ser incluidos en el término corrosión. También hay que dirigir nuestra atención a las propiedades de los materiales que pueden ser deteriorados en algunas formas de corrosión, en que no hay cambio de peso o alguna deterioración visible en un corto tiempo. Sin embargo, las propiedades cambian y el material puede fallar inesperadamente a causa de ciertos cambios internos.

Ahora bien estos últimos fenómenos no son encontrados frecuentemente, no obstante, son importantes formas de acción corrosivas con las cuales el ingeniero está relacionado. El ingeniero debe buscar materiales adecuados para una gran variedad de medios corrosivos y diferentes rangos de temperatura; se debe de conocer a fondo el comportamiento de numerosas aleaciones, así como posibles sustituciones de materiales como plásticos, madera, caucho, cerámicos, piel, vidrio, etc., De este modo el término corrosión ha sido ampliado para incluir el deterioro de materiales no metálicos.

Debido a que los metales seguirán siendo materiales de ingeniería de mucho interés, se eligió concentrar este estudio sobre el comportamiento de los metales a la corrosión sobre este tema.

La distribución de las áreas de corrosión y la naturaleza física de los productos resultantes muestran diferentes variaciones. Los lugares ánódicos constituyen solamente una parte del metal expuesto, en cuyo caso el resto de la superficie proporciona una área catódica grande, penetra el ataque considerablemente a consecuencia de la intensa actividad de las áreas anódicas. Este tipo de ataques crea problemas graves, específicamente cuando los metales y aleaciones presentan películas altamente resistentes, por ejemplo el aluminio y aceros inoxidable, si bien puede encontrarse prácticamente en cualquier superficie metálica.

La corrosión es una reacción ánódica (ocurre en el ánodo) que produce una serie de electrones, los cuales se consumen en el cátodo en una reacción catódica (de reducción de algún producto, por ejemplo H^+ , en un ácido).

Los iones de cloruro Cl^- ; de sulfato SO_4^{2-} etc., no intervienen en las reacciones electroquímicas.

A veces en un proceso de corrosión, ocurren varias reacciones ánódicas y catódicas a la vez, En estos casos tenemos que la velocidad de la suma de reacciones anódicas será igual a la suma de la velocidad de las reacciones catódicas. Es muy importante mencionar que las reacciones anódicas y catódicas dependen una de otra, de modo que será posible reducir la corrosión deduciendo una de las dos reacciones.

Debemos de tomar en cuenta que una reducción de porcentaje de oxígeno disuelto produce en muchos casos la corrosión: No hay corrosión del acero en agua de mar si no contiene oxígeno, porque no hay ninguna reacción catódica.

2.2.- IMPORTANCIA DE LA CORROSION.

La corrosión es un proceso natural como el agua que fluye en declive.

Generalmente todos los materiales se deterioran con el tiempo cuando son expuestos sus elementos. De los metales cada uno de ellos tiene diferentes propiedades mecánicas, químicas y físicas, aunque todos se corroen en un medio dado en diferente grado y probablemente, en una forma diferente. Además un 50% de los metales son aleados para constituir más de 40,000 aleaciones. Indudablemente muchas más serán hechas conforme pase el tiempo.

Las precauciones para prevenir la corrosión del hierro y sus aleaciones y otros materiales constituye uno de los mayores esfuerzos en el control del deterioro. Es por eso que frecuentemente recurrimos a las pinturas, electrochapeado, electrolisis, etc. para poder formar capas protectoras artificiales sobre la superficie de hierro y así prolongar la vida útil.

2.3.- TIPOS DE CORROSION.

Es conveniente clasificar la corrosión según la forma en la cual aparece. En la mayoría de los casos, un examen a la vista

permite clasificar el tipo de corrosión entre alguno de los siguientes:

CORROSION UNIFORME

Es muy común y se caracteriza por una reacción sobre la su superficie total del material, reduciendo así su espesor hasta que finalmente llegue a la ruptura.

La corrosión uniforme se puede prevenir o reducir con el uso de:

- a) - Materiales adecuados, incluyendo recubrimientos.
- b) - Inhibidores
- c) - Protección catódica.

CORROSION GALVANICA O BIMETALICA

Siempre de que se sumergen dos materiales diferentes en una solución corrosiva o conductora se establece un potencial eléctrico entre los dos, una corriente de electrones fluye y causa una corrosión en el ánodo.

A veces ocurre una corrosión galvánica en puntos inesperados. Un recubrimiento de tela impregnada con sales de cobre causó corrosión sobre tubos de acero. Este problema se resolvió usando un recubrimiento de nylon recubierto de vinil, sin contenido de elementos metálicos.

CORROSION EN GRIETAS

A menudo ocurre una corrosión localizada dentro de grietas o de superficies recubiertas con un producto húmedo. Este ti-

po de corrosión en grietas está asociado con pequeños volúmenes - de solución corrosiva estancada en huecos, juntas, depósitos superficiales, grietas debajo de tornillos, remaches, entre láminas. A veces se habla de una corrosión en empaques.

La prevención de la corrosión por grietas se puede realizar:

- 1.- Usando juntas soldadas en lugar de atornilladas o remachadas.
- 2.- Diseñar tanques para drenaje completo, evitar codos - agudos y áreas con líquido estancado.
- 3.- Inspeccionar regularmente el equipo, retirar continuamente los depósitos existentes.
- 4.- Eliminar las partículas sólidas en suspensión del proceso cuando ésto sea posible.

CORROSION EN PICADURAS

En una forma de ataque extremadamente local, resultando - en perforaciones de material. En la mayoría de los casos estas perforaciones o picaduras son muy pequeñas. Algunas veces las picaduras se encuentran aisladas, en otros casos también se juntan hasta formar una superficie rugosa. En forma general se podría describir una picadura como una cavidad o agujero con un diámetro superficial parecido a su profundidad.

Las reglas para evitar la corrosión en grietas también se aplican a la corrosión en picaduras. No hay que usar materiales - que puedan mostrar una tendencia a picadura en ensayo de laborato

rio para construir equipo o instalaciones en contacto con este me
dio corrosivo.

CORROSION INTERCRISTALINA

Generalmente en todos los casos, los límites de grano, no son de mucha importancia cuando hay corrosión general, por que so
lo son un poco más reactivos que el grano. En algunos casos, sin embargo los límites de grano se hacen extremadamente activos y re
sulta una corrosión intercrystalina: Solo se atacan los límites -
de grano y la aleación se desintegra (cae en polvo) y pierde su -
resistencia mecánica.

La causa de una corrosión intercrystalina puede ser:

- 1.- Impurezas segregadas en los límites de grano.
- 2.- Enriquecimiento de un elemento de aleación en los lí-
mites.
- 3.- Empobrecimiento de uno de los elementos de aleación
en los límites de grano.

DISOLUCION SELECTIVA

Es el proceso de corrosión el cual uno de los elementos-
de una solución sólida (aleación), se disuelve preferentemente.

Este tipo de corrosión solo se observa en materiales como
el zinc en el latón.

CORROSION-EROSION

Este tipo de corrosión en la aceleración del ataque corro

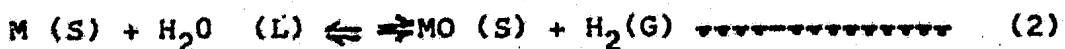
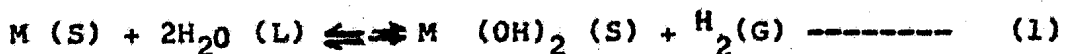
sivo de un metal debido al movimiento relativo entre el medio corrosivo y la superficie del metal. Cuando este movimiento es bastante rápido ocurre un efecto de desgaste mecánico o de abrasión. La apariencia de la superficie metálica atacada por corrosión-erosión es muy típica y presenta ondulaciones. La falla por corrosión erosión ocurre en un tiempo relativamente corto y es mas fuerte que lo esperado debido a que las pruebas de evaluación de la resistencia a la corrosión del material con el que se llevan a cabo dichos ensayos, se efectúan en condiciones estáticas.

La corrosión-erosión se puede prevenir de la siguiente manera:

- 1.- Selección de materiales más resistentes.
- 2.- Diseño adecuado.
- 3.- Alteración del medio corrosivo.
- 4.- Recubrimientos.
- 5.- Protección catódica.

2.4 - MECANISMO Y 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, representándose en las siguientes reacciones:

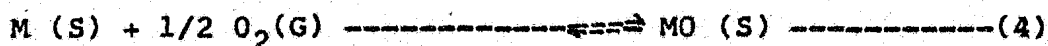
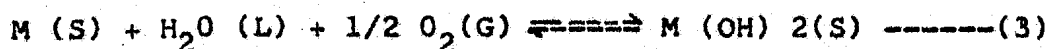


Donde:

M = Metal
S = Sólido

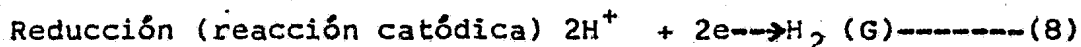
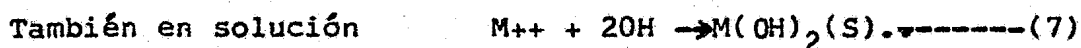
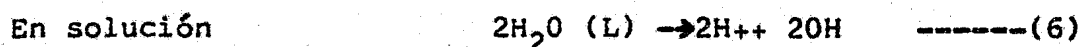
L = Líquido
G = Gas

Cuando existe la presencia de oxígeno las reacciones son:

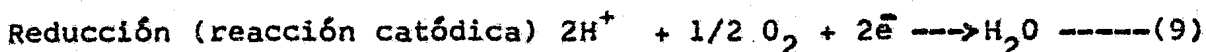


Hay algunos metales que pueden reaccionar con el agua en ausencia del oxígeno, tales como el Fe, Zn, Cr, Al y Mg.

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 haya conductores en el electrolito. Es por eso que la ecuación (1) puede considerarse como la suma de las siguientes cuatro ecuaciones:



La reacción (3) se puede considerar como la suma de las ecuaciones (5), (6) y (7) dando como resultado la siguiente reacción:



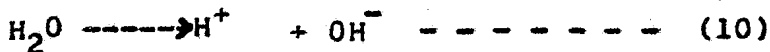
Las reacciones anódicas y catódicas estarán controladas por el flujo de electrones a través del metal y no serán independientes. Si el flujo de electrones es determinado, la corrosión electroquímica también lo será.

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 disolución de oxígeno en el

medio, llevándose a cabo la reacción (9). Este proceso se llama depolarización.

La magnitud en la cual se lleva a cabo la reacción catódica (8) y la reacción (9) será proporcional a la difusión del oxígeno hacia la superficie metálica, la cual será proporcional a la cantidad de oxígeno disuelto en el medio. El oxígeno disuelto tiene una reacción con los átomos de hidrógeno que han sido casualmente absorbidos por la superficie metálica, independientemente de la presencia o ausencia de impurezas en el metal.

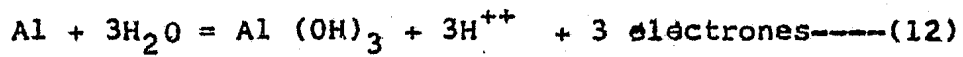
La reacción de oxidación procederá tan pronto como el oxígeno alcance la superficie del metal. Tomándose como un caso particular el aluminio, sumando las ecuaciones (5) y (9) y haciendo uso de la reacción.



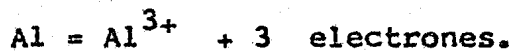
Tenemos la siguiente reacción:



En el caso del aluminio, la reacción de corrosión produce un engrosamiento de la película que en ocasiones se sitúa dentro de la gama de colores de interferencia. El hidróxido formado durante la reacción de corrosión tiende a disolver la película aunque no necesariamente a concentrar el ataque. Sin embargo, podrán desarrollarse picaduras sobre el aluminio cuando las circunstancias experimentales motiven la eliminación de gran parte de el hidróxido formado (por ejemplo, por reacción con bicarbonato cálcico y dejen inalterados los productos locales anódicos. La reacción produce iones hidrógeno.



cuya acumulación, si no se destruyen o eliminan, causa un gradual decrecimiento del pH. Por tanto, el ataque se incrementará progresivamente de acuerdo con un mecanismo auto-catalítico. Con el tiempo podrá cesar la formación de película, de manera que la única reacción posible en la base de la picadura será.



CAPITULO III

CORROSION BAJO TENSION

3.1 - DEFINICION

Es un fenómeno combinado, que requiere tanto de la acción de un esfuerzo de tracción así como de la presencia de un medio-corrosivo específico.

Este tipo de ataque es más propiamente conocido como: Agrietamiento por corrosión bajo tensión ACBT y es el resultado de la acción combinada de un medio corrosivo y esfuerzos de tensión que, son aplicados ó en su defecto residuales, y que muchas veces provocan la falla espontánea de metales y aleaciones.

Muchos investigadores definen la CBT de diferentes maneras, esto es debido a que todavía no se sabe cuál es el mecanismo exacto de ACBT. Es por eso que hay muchas teorías, pero ninguna de ellas describe el mecanismo completamente, ya que sólo se define el proceso en forma particular por el grado de dificultad que se tiene de generalizar para todos los casos existentes. Además cada investigador define el proceso según la visualización que le de al problema.

Algunos consideran que el esfuerzo aplicado es el factor más importante en el A.C.B.T.; esto es importante para los ingenieros de corrosión, pero para los químicos el proceso más importante es el electroquímico. Por las diferencias que existen es difícil unificar los mecanismos.

El investigador H. W. Gillet describió el siguiente proceso: "Es frecuente que ocurra en un metal que tiene un rango considerable de elasticidad para alargarse sin sufrir fractura alguna cuando está sometido a un esfuerzo de tracción aún por arriba del valor de esfuerzo de cedencia y que además, cuando no está - sometido a dichos esfuerzos es resistente a la acción de un medio corrosivo, se comporte sin embargo de manera frágil cuando se le aplican esfuerzos ligeramente menores al límite de cedencia en - presencia del medio corrosivo".

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

- 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 que continúa a lo largo de una trayectoria en la cual es electroquímicamente activa con respecto al metal que hay a su alrededor. Para el caso de fragilización por hidrógeno, resulta la fractura debido a la penetración del hidrógeno en el metal, el cual reduce la habilidad de deformación plástica del metal.

Sucede a menudo que no se sabe claramente cual de los ti-

pos de mecanismos es el responsable de la fractura, por eso es más bien práctico utilizar el 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 tipos de fallas debidas a diferentes variables. Por ejemplo, se dice que la protección catódica es un método muy efectivo para prevenir el ACBT; pero ésta acelera los efectos de fragilización por hidrógeno.

De aquí se observa que el ACBT y la fragilización por hidrógeno son dos fenómenos diferentes. Nos enfocaremos particularmente al ACBT dando sus características más importantes en el proceso.

Durante el ACBT, el metal o aleación es virtualmente inatacable sobre todas las demás partes de su superficie ya que se trata desde un principio de una corrosión localizada en el cual una fina grieta se prolonga a través de él llegando finalmente a una fractura de la estructura sin que se haya acercado el esfuerzo aplicado al esfuerzo permitido normalmente en el uso sin la presencia del medio corrosivo.

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

Se puede decir que para una aleación dada, el número de medios diferentes a los cuales es susceptible a un agrietamiento son generalmente pocos. Se muestran en las siguientes tablas -

Nos. 2,3, 4, listas de diferentes sistemas de aleaciones y los -
medios corrosivos en los que son susceptibles para el ACBT.

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. Na OH Sol. NaOH-Na ₂ Si O ₂ Sol. Calcio, Amoniac y Nitrato de Sodio Mezcla de Acidos -(H ₂ SO ₄ - HNO ₃) Sol. HCN Sol. Acidas H ₂ S Agua de Mar
Aleaciones de Cobre (Latones, etc.)	Soluciones y vapores de amoniac Aminas Agua-Vapor.
Aceros Inoxidable	Sol. Acido Clorhidrico MgCl ₂ -BaCl ₂ (Cloruros)

Continúa Tabla No. 2

<u>MATERIAL</u>	<u>MEDIO AMBIENTE</u>
Aleaciones de Titanio	Sol. NaCl-H ₂ O ₂
	Agua de Mar
	H ₂ S
	Sol. NaOH-H ₂ S
	Acidos Politiónicos
	Hidróxidos Concentrados.
	Cloruros
	Alcohol Metil
	Cloruros Sólidos a Temperatura 550°F.

TABLA No. 3 SISTEMAS ALEACION-MEDIO CORROSIVO Y EL TIPO DE AGRIETAMIENTO QUE SE ESPERA OBTENER

<u>ALEACION</u>	<u>MEDIO</u>	<u>TIPO DE AGRIETAMIENTO</u>
18Cr-8Ni (Acero Inoxidable)	Cl ⁻	Transgranular
Aceros	OH ⁻	Intergranular
70 Cu-30 Zn	MH ₄ ⁺	Transgranular
	Algunas Aminas	Intergranular en Soluciones Neutras (Agrietamiento Estacional)
Aleaciones		
Al-4% C	Cl ⁻	En regiones adyacentes a los límites de grano

Continúa Tabla No. 3

<u>ALEACION</u>	<u>MEDIO</u>	<u>TIPO DE AGRIETAMIENTO</u>
Al-7% Mg	Cl ⁻	Intergranular
Acero Dulce	No. 3	Intergranular
	OH ⁻	Intergranular (Agrietamiento por álcalis caústica)
Cu-P	NH ₄ ⁺	Intergranular
	Algunas aminas	
Latones B	Cl ⁻	Transgranular
	NH ₄ ⁻	Intergranular
Cu ₃ Au	Fe Cl ₃	Intergranular

TABLA No. 4 SISTEMAS PARA LOS ENSAYOS DE CORROSION BAJO TENSION
MEDIOS-CONCENTRACION Y TEMPERATURAS

<u>MATERIAL</u>	<u>MEDIOS</u>	<u>CONCENTRACION</u>	<u>TEMPERATURAS (°C)</u>
Aleaciones de Aluminio	NaCl	3%	T.A.
Aleaciones de Cobre	Atmósfera- por encima de NH ₄ OH-- (Concentrado)	50 ml.	
	Agua 4	50 ml.	T.A.
	SO ₂	0.1%	T.A.
	Aire		

Continúa Tabla No. 4

<u>MATERIAL</u>	<u>MEDIOS</u>	<u>CONCENTRACION</u>	<u>TEMPERATURAS</u>
Aleaciones de Magnesio	NaCl	0.01%	T.A.
	NaCl	3.5%	
	K ₂ CrO ₄	2.0%	T.A.
Acero	Na OH	10%	60
Aceros Inoxidables	Ca Cl ₂	60 gr.	
	HgCl ₂	0.1g	-100
	Agua	40 ml	
	HCl	0.1N	
	FeCl ₃ 6H ₂ O	1%	T.A.
	MgCl ₂	40-60%	Punto de ebulli- ción
		MgCl ₂	pH 2-4
Aleaciones de Níquel	Na OH	10%	Fundido

T.A. = Temperatura Ambiente.

Entre las variables que afectan al ACBT, se encuentra:

El esfuerzo, estructura metálica, la composición de la solución, la temperatura, dirección de esfuerzos, composición del metal, etc. Todas estas variables serán discutidas con mayor detalle en el siguiente punto.

3.2 - CARACTERISTICAS DEL ACBT.

Según su orden de importancia para que ocurra el ACBT, - consideramos las siguientes condiciones como las más importantes.

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

Las tres condiciones antes mencionadas son las más importantes en el ACBT, y las clasificamos como variables primarias - ya que son imprescindibles y necesarias en el ACBT, y en ausencia de una de ellas no dará lugar a que se origine este proceso. Las condiciones 2 y 3 se deben dar al mismo tiempo en los intervalos y rangos adecuados para que suceda el ACBT, porque si no simplemente sería un caso de fractura o corrosión.

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

Algunas de las variables secundarias existentes son:

- 1).- Concentración de la solución.
- 2).- Temperatura.
- 3).- Estructura Metálica.

4).- Tipo de Aleación

5).- Esfuerzos de Bajo Nivel

Es importante hacer notar que las variables antes mencionadas no son todas las que existen, sino que hay otras más, que van apareciendo según sea el caso que se estudie y sería muy difícil enumerar todas. Al combinarse estas variables secundarias con las primarias hacen más difícil el fenómeno del ACBT, dificultando su estudio al grado de que se tienen que separar las variables para conocer de que manera influye cada una de ellas en el ACBT. Al analizar las muestras fracturadas, se observan ciertos rasgos muy particulares en los cuales podemos determinar la influencia de cada una de las variables que intervinieron en el proceso; de esta misma manera, que tanto influyen en el proceso, etc.

Para aclarar lo antes dicho y que quede una idea más clara, mencionaremos como actúan primero las variables según fueron clasificadas, las cuales trataremos por separado; mencionando sus características más importantes la influencia que tiene una sobre la otra.

No se podrá establecer una regla general de cada una de las variables y su forma de actuar en todos los casos existentes.

Además mencionaremos algunos ejemplos particularmente donde aparezca 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, entre:

- 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 metastabilidad).

Estos unidos, más la interacción o la composición del medio corrosivo y el esfuerzo afectada por el tiempo de fractura, complican su estudio al aparecer todos ellos al mismo tiempo. Se piensa que únicamente las aleaciones son susceptibles al ACBT y no los metales puros.

Esta idea se ha generalizado desde antes del descubrimiento del ACBT, hasta nuestros días en que se cree que los metales puros no se agrietan y es posiblemente correcta. Pero, ahora nos podemos preguntar ¿qué tan puro es un metal? ya que se han hecho investigaciones, 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 tienen amoniaco.

El ACBT., se ha producido también en aceros sin carbono - (conteniendo 0.001% de carbono, pero existiendo pequeñas cantidades de manganeso, azufre y silicio), en soluciones de amonio hidr

viendo.

Recientemente el ACBT se ha producido en titanio comercial (conteniendo entre esos componentes, 6000 partes por millón de oxígeno, 100 partes por millón de hidrógeno).

Por estas razones, la idea que se tiene y con un material dado, que es comercialmente "Puro" no puede fallar por ACBT, es incorrecta.

Aunque el caso de metales puros es por lo general un adecuado medio para prevención del ACBT, sin embargo 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 fue laminado, que en sentido paralelo a la dirección longitudinal. Este efecto es debido a la distribución de precipitados, los cuales resultan del laminado.

3.2.2- MEDIO CORROSIVO

En este caso como en todos los demás no se puede dar como regla general para todos los casos ya que 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 conocido que sucede en varios medios acuosos pero que también pueden ocurrir en ciertos metales líquidos, sales fundidas y líquidos acuosos inorgánicos.

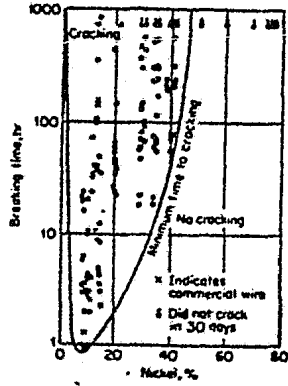


FIG. 1 ACB de Alambre Acero - Cromo - Niquel en cloruro de Magnesio hirviendo al 42% (Efecto del contenido de níquel).

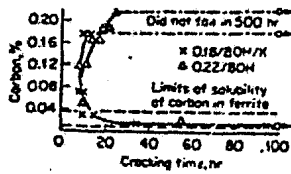


FIG. 2 Efecto del contenido de carbón sobre el tiempo de agrietamiento de un acero ordinario

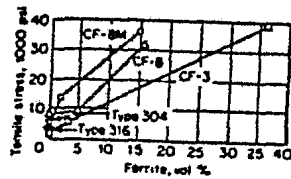


FIG. 3 Efecto de la cantidad de Ferrita en -- función del esfuerzo requerido para conducir el ACBT

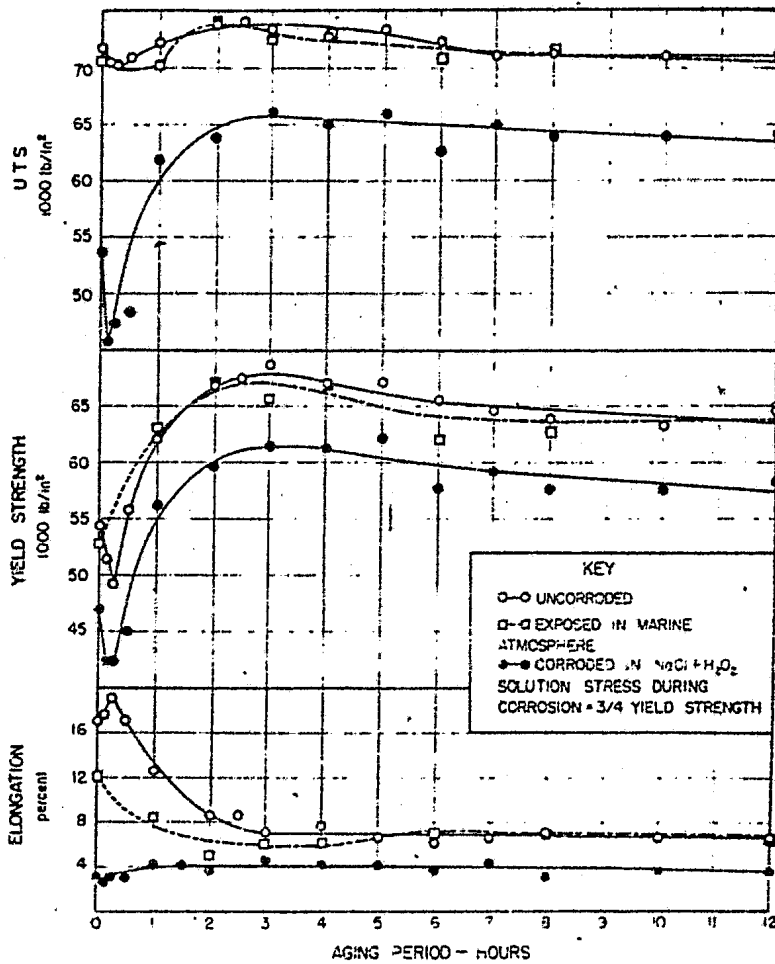


FIG. No. 4 GRAFICA DE LAS ALEACIONES SERIE 2XXX DE ALUMINIO. (2062)

En las tablas No. 3 y 4 se enlista un cierto número de Sistemas-Medio-Aleación, en los cuales la fractura ocurre. Constantemente se 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 ACBT, cuando la composición ambiental varía.

Un caso típico del ACBT, se observa en el acero que es atacado en soluciones de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 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, por lo cual puede acarrear problemas en perjuicio o beneficio 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 estudiado. La mayoría de las aleaciones susceptibles al ACBT, empiezan a agrietarse a unos $100^{\circ}C$.

El estado físico del medio es también importante, ya que aleaciones expuestas en 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 a continuación.

Se sabe que si aumentamos el esfuerzo aplicado disminuye el tiempo para que ocurra la fractura. Todavía se tiene duda y no se ha llegado a un acuerdo sobre el cual es el mínimo esfuerzo requerido para 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 de 70% del punto de fluencia. Para cada combinación-medio-corrosivo-aleación hay la posibilidad de que exista un mínimo esfuerzo efectivo para el ACBT, o un esfuerzo de entrada que ocasione la fractura. Con este 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 el laboratorio como en la práctica, - es difícil que las condiciones ambientales permanezcan constantes, si no se le tiene el cuidado debido, y aún así se tienen variaciones.

El criterio que se adopta para aplicar esfuerzo en el laboratorio para los casos en donde se quiera que ocurra ACBT, es que 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).- Trabajo en frío.
- c).- Desequilibrio de ensamble
- 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 sinúmero de casos en 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 en seguida de la aplicación de la soldadura, (pero a veces los esfuerzos residuales también son añadidos por los procesos de fabricación). En la mayoría de los casos sin embargo este recocido no es posible. En caso de que sea posible el recocido, hay que tener cuidado con el enfriamiento - desde la temperatura del recocido pues puede inducir 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 estos ocupan más volumen que el metal del cual fueron formados, producen suficiente esfuerzo para causar ACBT. En la figura 5 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 entre el espacio entre la tuerca y el tornillo y provocaron esfuerzos de tensión sufi--

cientes sobre la tuerca como para causar ACBT.

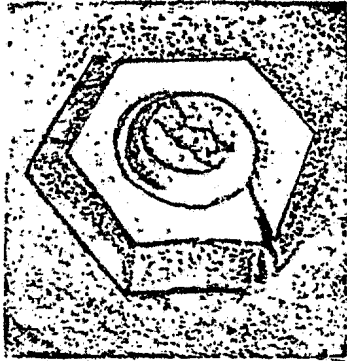


FIG. No. 5 AGRIETAMIENTO POR CORROSION BAJO TENSION EN UNA TUERCA DE ALEACION DE ALUMINIO.

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 prever o retrazar el ACBT. El término ACBT implica la formación de grietas y usualmente hay muy pocas 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 atacado por corrosión hasta que este no pueda sostener la carga aplicada, no se clasifica como ACBT.

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- ASPECTOS MECANICOS DE LA C.B.T.

La resistencia a la C.B.T. ha sido medida a largo de muestras pulidas, muestras para pruebas de tensión, en forma de argollas o anillos en "C" y otros. Entre los resultados más importantes que han sido obtenidos con tales técnicas, son las llamadas de los niveles de "Esfuerzos de Entrada" (Thre-Hold Stress) - bajo los cuales las aleaciones son consideradas libres de corrosión bajo tensión (para un tipo dado de muestra, orientación de muestras, medio ambiente, tiempo de ensayo o reacción y otras).

La tabla 5, presenta una selección de muestras pulidas, - valores de entrada para un número de aleaciones de aluminio de alta resistencia, basados sobre reportes publicados recientemente.

En años recientes, pruebas con muestras pulidas han sido complementadas con ensayos que fueron diseñados para medir la resistencia a la corrosión bajo tensión de pieza pre agrietada. Una de las razones para ésto, se puede fácilmente deducir de la tabla 6. Como puede verse en esa tabla, las fallas de servicio en C.B.T., frecuentemente se originan en defectos o concentradores de esfuerzo, (ranuras, grietas por fatiga, corrosión localizada). Una medida cuantitativa de la resistencia a la C.B.T. de una aleación (o estructura) bajo esfuerzo en presencia de un defecto es dado - por la curva de velocidad-crecimiento de grieta-vs-intensidad- de esfuerzo, ilustrada en la Figura 6 donde la razón de crecimiento

(velocidad v) de una grieta de corrosión bajo tensión es graficada (vs) contra la intensidad de esfuerzo aplicado (K).

Alloy and Temper	Direction of Applied Stress	Plates		Extrusions		Forgings	
		MN/m ²	(ksi)	MN/m ²	(ksi)	MN/m ²	(ksi)
2014-T6	L	310	(45)	310	(45)	210	(30)
	LT	210	(30)	150	(22)	170	(25)
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)	<55	(<8)
2219-T87	L	>270	(>40)	>240	(>35)	>260	(>38)
	LT	>260	(>38)	>240	(>35)	>260	(>38)
	ST	>260	(>38)	>240	(>35)	>260	(>38)
2024-T3, T4	L	170	(25)	>340	(>50)		
	LT	140	(20)	120	(18)		
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)		
2024-T8	L	>340	(>50)	>410	(>60)	290	(43)
	LT	>340	(>50)	>340	(>50)	290	(43)
	ST	200	(30)	>310	(>45)	100	(15)
7039-T64	L	>290	(>42)				
	LT	240	(35)				
	ST	<35	(<5)				
7075-T6	L	340	(50)	410	(60)	240	(35)
	LT	310	(45)	220	(32)	170	(25)
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)	<55	(<8)
7075-T76	L	>340	(>49)	>360	(>52)		
	LT	>340	(>49)	>340	(>49)		
	ST	170	(25)	170	(25)		
7075-T73	L	>340	(>50)	>360	(>53)	>340	(>50)
	LT	>330	(>48)	>330	(>48)	>330	(>48)
	ST	>300	(>43)	>300	(>43)	>300	(>43)
7178-T6	L	380	(55)	450	(65)		
	LT	260	(38)	170	(25)		
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)		
7178-T76	L	>360	(>52)	>380	(>55)		
	LT	>360	(>52)	>360	(>52)		
	ST	170	(25)	170	(25)		
7079-T6	L	>380	(>55)	>410	(>60)	>340	(>50)
	LT	270	(40)	240	(35)	210	(30)
	ST	<55	(<8)	<55	(<8)	<55	(<8)
7049-T73	ST					≈170	(≈25)
7050-T736	ST					>170?	(>25?)
7175-T736	ST					≈170	(≈25)
RX 720	ST	>170	(>25)				
RR 58	L	>300	(>44)				
	ST	>270	(>40)				
DTD 3067	ST	140	(20)				
DTD 3066	ST	140	(20)				
AZ 74	ST					310	(45)

TABLA 5.- ESTIMACION DEL NIVEL DE ESFUERZO DE TENSION MAS ALTO EN EL CUAL LAS PROBETAS, DE DIFERENTES ORIENTACIONES DE ESTRUCTURA DE GRANO, DE MODO QUE NO FALLA POR CORROSION BAJO TENSION CON 3.5% DE NaCl (INMERSION ALTERNADA) PRUEBA DE 84 DIAS O EN MEDIO AMBIENTE INDUSTRIAL CON DURACION DE (1 AÑO).

Concentradores de esfuerzo debido al diseño (Barreno, aislado, etc.).....	25%
Agujero por interferencia apropiada para buje.....	15%
Corrosión en agujeros.....	12%
Grieta por fatiga.....	5%
Uso inadecuado.....	5%
Corrosión intergranular.....	4%
No conocidas.....	34%

TABLA No. 6 Sitios de iniciación de grieta de corrosión en aleaciones de aluminio de alta resistencia.

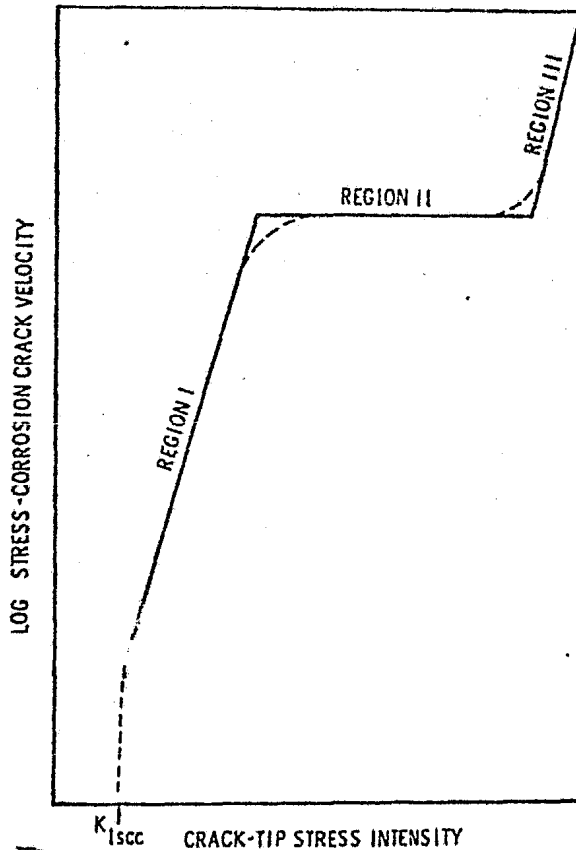


FIG. No. 6 Representación gráfica de la intensidad de esfuerzos sobre la velocidad de crecimiento de las grietas de corrosión bajo tensión

La curva $v-k$ mostrada en la Fig. 6 es encontrada en muchas combinaciones de material al medio ambiente. Generalmente la curva $v-k$ exhibe tres regiones. En la región I, relativamente bajo intensidades de esfuerzo, la velocidad de la grieta es fuertemente dependiente del esfuerzo. La relación funcional entre v y k pueden ser aproximadas por una función exponencial, esto es una línea recta en una gráfica semi logarítmica. Con intensidades de esfuerzos intermedios en la región II, la velocidad de grieta es independiente de la intensidad de esfuerzo aplicado. La curva $v-k$ muestra una meseta relativamente con elevadas intensidades de esfuerzo, la velocidad de grieta puede ser nuevamente dependiente del esfuerzo en la región III.

Generalmente en aleaciones de aluminio comerciales de alta resistencia solo se observan las regiones I y II. En la parte más baja de la región I de la curva $v-k$, ahí puede o no haber una intensidad de esfuerzo, "de inicio" designada como K_{ISCC} bajo la cual no ocurre crecimiento de grieta. La obtención de tales valores de K_{ISCC} es sumamente consumidora de tiempo para aleaciones de aluminio, porque ocurren a intensidades de esfuerzo donde las velocidades de crecimiento de grieta son sumamente lentas (10^{-11} m/s).

Así parece que la medición de la velocidad de crecimiento de una grieta de corrosión bajo tensión como una función de la intensidad de esfuerzo aplicado tiene grandes posibilidades (en algunos casos ya se ha demostrado en importancia), como un método para:

Evaluar el efecto del esfuerzo sobre el crecimiento de la grieta de corrosión bajo tensión.

Evaluar el efecto del medio ambiente sobre el crecimiento de la grieta de corrosión bajo tensión.

Clasificar aleaciones según su resistencia a la corrosión bajo tensión.

Realizar apéndices de datos de corrosión bajo tensión para muestras pulidas con datos aplicables a la C.B.T. a estructuras y máquinas conteniendo defectos.

Estimar la vida útil de servicio sobrante de las estructuras donde la C.B.T. en grietas se ha iniciado.

3.2.5 - TIEMPO DE FRACTURA

El parámetro "Tiempo" es importante en los fenómenos del 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. 7 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 crecimiento de la grieta hasta llegar finalmente a la fractura mecánica.

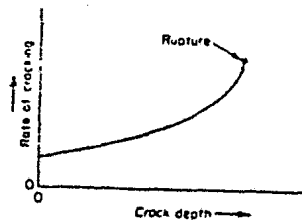


FIG. No. 7 VELOCIDAD DE AGRIETAMIENTO EN FUNCION DE LA PROFUNDIDAD DE LA GRIETA.

La figura No. 8 muestra la relación entre el tiempo de exposición y la elongación de la probeta durante la corrosión-

bajo tensión. Sólo en el último momento se abre la grieta y llega a la fractura.

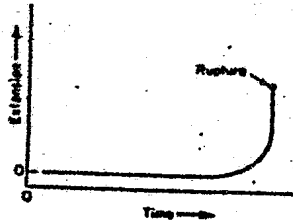


FIG. No. 8. Elongación de la probeta en función del tiempo de exposición.

Las figuras 7 y 8 demuestran que no tendrá sentido llevar a cabo pruebas de corta duración ya que solo hay evidencia física y mecánica del agrietamiento en la última fase del proceso de fractura.

3.2.6 - CONCENTRACION DEL MEDIO CORROSIVO

En relación a la cantidad de un medio corrosivo dado necesario para que ocurra ACBT, por lo general, no hay requisito que se encuentren grandes cantidades ó 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 sus-

ceptibilidad de un metal al ACBT, muchas veces depende de que la concentración esté variando y no de una alta concentración en la solución.

3.2.7- 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 las aleaciones de magnesio la fractura ocurre por lo general a temperatura ambiente en comparación de otros sistemas que requieren temperaturas más elevadas. La mayoría de las aleaciones que son susceptibles a la temperatura pueden fracturarse abajo de 100°C. Por ejemplo en aleaciones de titanio en ácido clorhídrico (HCl), y 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.

3.2.8- TIPOS 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. Existe una gran variedad de tablas en las que se nombran las aleaciones y los medios corrosivos en los que puede trabajar sin ningún problema, las cuales son de gran ayuda a la hora de seleccionar el 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 la misma estructura o equipo porque crea problemas galvánicos.

3.2.9- APARIENCIA MACROSCOPICA

El agrietamiento por CBT es 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 CBT., pero este corte en los bordes no es parte del proceso de CBT). Para ciertos casos, el ACBT, es análogo al corte completo en la fractura bifurcada de origen puramente mecánico.

3.2.10 - PLANO DE ESFUERZOS

La forma de la fractura producida por C.B.T. macroscópicamente es usualmente diferente en cada caso, aun usando el mismo tipo de aleación porque se generan en diferentes planos de deformación y es función de cómo se encuentre el esfuerzo aplicado en ella. En condición necesaria para el ACBT, que exista un estado de esfuerzo 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 resis

tentes al ACBT, si estas están sometidas a esfuerzos en la dirección de laminado, pero son susceptibles si están sometidas a esfuerzos en la dirección transversal más corta. Para entender mejor esta idea la siguiente figura (No. 9) muestra un cuadro generalizado de la microestructura que se espera encontrar en una placa de aleación de aluminio.

Como se describió en el ejemplo de la Fig. No. 5, la tuerca de aluminio mostrada había sido maquinada de una barra laminada y fue sometida a esfuerzos por el aumento de productos de corrosión en la dirección transversal.

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

Investigaciones recientes indican que si una aleación es susceptible al ACBT, el límite de grano normal a la tensión aplicada está sujeto al mismo ataque en un medio corrosivo cualquiera que sea su orientación con respecto a la dirección de laminado. Fig. No. 9

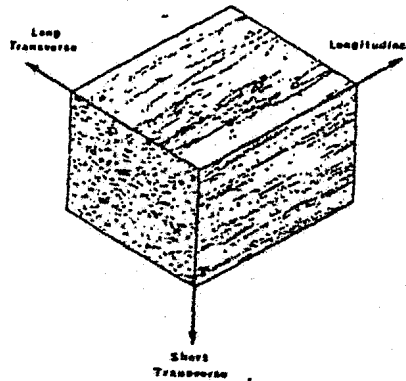


FIGURA No. 9 ESTRUCTURA DE GRANO ILUSTRANDO LOS PLANOS DIRECCIONALES.

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 exista 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 metal; por lo tanto es inmune al ACBT, si los esfuerzos se aplican en esta dirección.

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 se une a otra formada en el límite de grano más próximo. 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 que los que son requeridos para causar una falla en la direc--

ción longitudinal con respecto a la dirección de laminado.

La siguiente figura No. 10 muestra como las grietas pueden unirse para producir una grieta continua con el material sometido a esfuerzos en la dirección transversal.

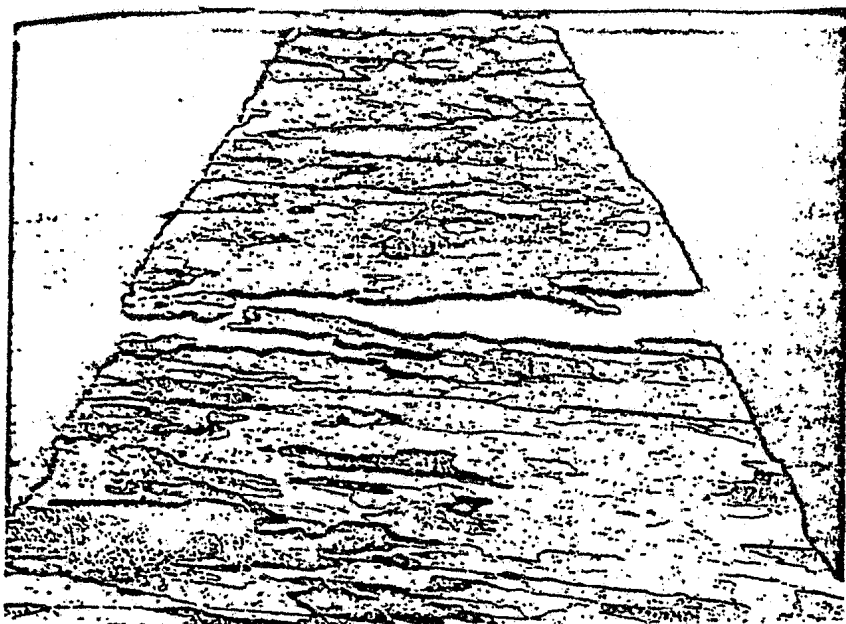


FIG. No.10 AGRIETAMIENTO INTERCRISTALINO ESFUERZOS APLICADOS EN LA DIRECCION TRANSVERSAL.

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 aplicable en la dirección transversal corta.

Por consiguiente, una aleación soportará esfuerzos más - grandes sin fallar por ACBT., cuando se encuentre en esfuerzo en dirección transversal larga, mejor que en la dirección transversal corta pero con esfuerzos menores que cuando están en la dirección longitudinal.

3.3- MORFOLOGIA DE LA GRIETA

Las grietas producidas por ACBT, tienen la apariencia a simple vista de una simple fractura como podría esperarse de un proceso de corrosión localizado.

Sin embargo aún cuando el ACBT, no es estrictamente un proceso mecánico, es conveniente conocer el proceso y las características generales de las grietas.

En el proceso de ACBT, se puede observar dos tipos de fallas por fractura.

- a).- Inter cristalina.
- b).- Trans cristalina.

Estos tipos de fallas en etapas próximas a su desarrollo son microscópicas. 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 inter cristalinas siguen límites de grano en el metal. Este tipo de agrietamiento es encontrado comúnmente en aleaciones de aluminio, latones y aceros de bajo carbono. 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 si se hace una cuidadosa observación metalográfica del metal adyacente a la grieta principal se revelan estas. En la siguiente figura No. 11, se muestra una grieta inter cristalina encontrada en el latón.



FIG. No. 11 AGRIETAMIENTO INTERCRISTALINO
ENCONTRADO EN EL LATÓN.

En el mecanismo transcristalino las grietas avanzan a través de los granos en lugar de seguir los 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 incompatibilidad entre granos, resultando de los esfuerzos que existen entre los límites de grano producidos por la evolución de hidrógeno a alta velocidad.

El agrietamiento en las aleaciones de aluminio-serie 2000 en soluciones de cloruro de sodio (Na Cl) al medio ambiente no sigue los bordes de grano sino las regiones blandas desprovistas de cobre.

En la siguiente figura No. 12 se muestra una grieta trans cristalina causada por corrosión bajo tensión en una aleación de aluminio con 4% de Cu.

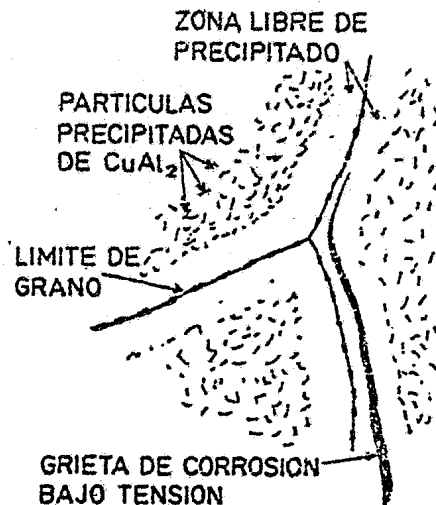


FIG. No. 12 AGRIETAMIENTO TRANSCRISTALINO ENCONTRADO EN UNA ALEACION DE ALUMINIO-COBRE

El agrietamiento en un metal puede ser predominante trans cristalino o intercristalino.

Sin embargo una grieta trans cristalina puede seguir el límite de grano por una corta distancia y viceversa. El agrietamiento en una aleación particular puede ser intercristalina en un medio y trans cristalina en otro. De hecho un cambio en la temperatura ó pH del medio corrosivo puede cambiar el modo de agrietamiento en una aleación en un medio particular.

En un material de grano muy fino puede ser difícil predecir si el agrietamiento es inter. o trans cristalino o una combi-

nación de los dos.

3.4- MECANISMO DE AGRIETAMIENTO

Varios mecanismos han sido propuestos, algunos de los cuales involucran una compleja teoría en relación al efecto y presencia de las dislocaciones. Básicamente, el mecanismo es cuando menos parcialmente de carácter electroquímico. Como mencionamos anteriormente, el ACBT, 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 ACBT, es en parte por lo menos electroquímico por naturaleza.

3.4.1- PROPAGACION DE LA GRIETA.

A medida que la grieta formada por corrosión bajo tensión y propagada por acción predominantemente electroquímica penetra dentro del metal, la concentración de esfuerzos aumenta dentro de la grieta hasta que haya suficiente energía disponible para iniciar el agrietamiento mecánico. Se requiere esta energía para formar nuevas superficies y deformar 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. 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 Fig. (No. 13) muestra que la propagación de la grieta es en parte, mecánica.

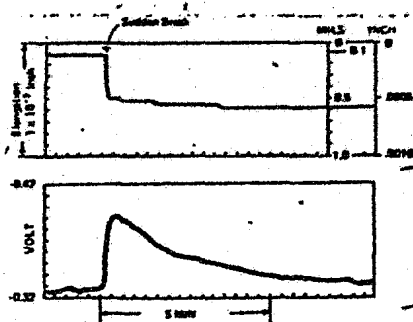


FIG. No. 13 DEMOSTRACION DE LA PROPAGACION
MECANICA

La curva superior es una gráfica de la elongación de una probeta de acero de bajo carbono ranurada, expuesta a una solución hirviente al 20% de NH_4NO_3 (Nitrato de Amonio). El rompimiento de la curva indica que una pequeña fractura mecánica ha**u**bia ocurrido. Si el agrietamiento fuera puramente electroquímico, la curva debería descender lenta y uniformemente sin un rompimiento repentino.

En la curva inferior se registró simultáneamente a la elongación, la curva del potencial de la probeta en la solución. El cambio de potencial, que ocurre con la repentina elongación de la probeta, confirma la idea de que ahí tiene lugar una fractura mecánica. Este rompimiento de la capa superficial

expuso al metal al descubierto (sin película de óxido) al medio corrosivo, haciéndolo mucho más reactivo que el metal cubierto. Esto explica el repentino cambio de potencial.

3.4.2- METODOS DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN BAJO TENSION

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 de 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 ya hemos mencionado las fallas no ocurren comúnmente sólo por los esfuerzos aplicados, sino cuando éstos son superpuestos como esfuerzos residuales presentes en el material producto de los procesos de fabricación. Se indicó 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 ó 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, 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 hayan 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 mencionado varios ejemplos, uno de ellos es el de mantener los niveles de oxígeno, cloruros y de agua en partes por millón al mínimo dentro de un sistema cerrado.

Otra es lavando las unidades de una refinería con una solución alcalina cuando ellas están " Fuera de servicio " y entonces interferirlos con nitrógeno para evitar la formación de ácidos politónicos.

Uno más es el uso de aleaciones de níquel serie 4000 (Monel) conservándolas completamente sumergidas y de este modo se evita su exposición al aire, humedad y vapores ácidos en el servicio de ácidos fluorhídricos.

Se han hecho grandes esfuerzos en la investigación de inhibidores para prevenir el ACBT. Los inhibidores pueden actuar ya sea por cambiar el medio (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 actúan en ambos sentidos.

El hecho de que haya investigaciones intensivas de la re-

sistencia de las aleaciones de aluminio a la corrosión y a la corrósión bajo tensión es indicativa de un esfuerzo grande para de sarrollar aleaciones más resistentes al agrietamiento que las - disponibles ahora. De vez en cuando hay variaciones en la compo sición y/o tratamientos térmicos de aleaciones comunes, diseñadas para mejorar su resistencia a la corrosión bajo tensión. Hay cier- tos procedimientos especialmente recomendados para la prevención de la corrosión bajo tensión en aleaciones de aluminio. Una de estas es el maquinado de grandes piezas forjadas tan cerca como sea posible a sus dimensiones finales antes del tratamiento de la solución.

El enfriamiento de una masa grande de metal desde la tempe- ratura de solución producirá altos niveles de tensiones residua- les internas en el metal.

El maquinado puede remover las capas superficiales de com- presión y exponer el metal altamente esforzado. La subsecuente- exposición de esta superficie, en una atmósfera húmeda puede in- ducir el ACBT.

La superficie anodizada, protegida con pintura o cera pro- longará el tiempo de exposición requerido para producir ACBT, pe- ro no lo evitará por completo. Los inhibidores que limitan la corrósión general pueden acelerar el ACBT.

La pintura se ha sugerido como un recubrimiento protector de gran resistencia.

En atmósferas marinas o industriales, es recomendado un re cubrimiento de aluminio aplicado a alta temperatura como el me- jor recubrimiento de un acero o un material de alta resistencia.

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 adecuada.

Cuando se encuentran presentes esfuerzos residuales y un medio corrosivo dado, entonces se debe considerar la posibilidad de hacer un cambio en el diseño. La primera consideración en el nuevo diseño sería quitar, 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.

Finalmente si los esfuerzos residuales no pueden evitarse, si el medio no puede ser cambiado, o si la superficie 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.

Otras ocasiones más de una las técnicas mencionadas, es usada para resolver el problema que presenta la corrosión bajo tensión.

Por ejemplo la solución al problema mencionado de la figura No. 5 de la tuerca de aluminio fue recubrir el tornillo con un "primer" (recubrimiento primario) recubrimiento 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; conservarlo sin contacto con la humedad y, para una nueva instalación, usar

una aleación resistente.

3.5- CORROSION BAJO TENSION EN ALEACIONES DE ALUMINIO

La corrosión bajo tensión en aleaciones de aluminio ha sido considerada generalmente como limitada a aquellas aleaciones que pueden ser endurecidas por tratamiento térmico. Estas son, por supuesto, las aleaciones que son más usadas para piezas resistentes a cargas en aviación.

Aleaciones que pueden ser endurecidas solamente por trabajo en frío, son relativamente inmunes a la corrosión bajo tensión.

Aleaciones de aluminio-cobre-magnesio-manganeso.- Se ha encontrado que el duraluminio extruido y aleaciones de aluminio forjadas ó extruidas propias para aeroplanos dirigibles, han fallado como resultado de la corrosión bajo tensión, así como cojinetes o puntos de apoyo de mayor tamaño que han sido forzados dentro de estos ajustes produciendo los esfuerzos que causan las fallas en una atmósfera marina. Estas partes fueron subsecuentemente encontradas como susceptibles a la corrosión intercristalina, en condiciones de ausencia de esfuerzo.

Trabajos adicionales han mostrado que las extrusiones de aleaciones de alta resistencia son más susceptibles a la corrosión por esfuerzo cuando es cargada en orientación hacia la sección transversal (y particularmente en la dirección transversal corta) que en la dirección longitudinal.

Si el tipo de duraluminio de la aleación 2017 (era templado desde la temperatura del tratamiento térmico de disolución -

de 500 °C (930 °F) en agua hirviendo, ésta era susceptible a la corrosión intercrystalina en cloruros. Cuando era templada en agua fría, ésta era inmune a este tipo de corrosión.

Después se mostró que si un material similar (aleación - 2024) era enfriado desde una temperatura superior a 400 °C, a 125 °C (750 a 225 °F) a una velocidad fija de 1100 °C/sec (1980 °F/sec) o mayor, el material era inmune a cualquier indicio de corrosión intercrystalina. Y muestras de aleaciones templadas a velocidades de 400 °C/sec o menores eran susceptibles a severa corrosión intercrystalina. A velocidad intermedia las muestras eran susceptibles a corrosión por picadura e intercrystalina.

A continuación se postuló la idea que la corrosión en la aleación de duraluminio era debida a la precipitación del cobre, en los límites de grano de CuAl_2 , resultando el agotamiento del cobre adyacente a las fronteras. Y la región agotada se propone como anódica en relación a los granos interiores y límites de grano en soluciones de cloruro y por lo tanto, podría ser disuelta por un proceso electroquímico.

Sobre la base de estas ideas y de trabajos experimentales llevados a cabo en aleaciones de aluminio-cobre, se propuso de grano grande un mecanismo para explicar la corrosión bajo tensión. La idea es que la corrosión intercrystalina, podría avanzar por un proceso electroquímico a lo largo de las regiones anódicas adyacentes a los límites de grano hasta que las concentraciones de esfuerzos se vuelven tan elevados en las puntas de las grietas de corrosión normales al esfuerzo aplicado al metal que podría ser prácticamente roto exponiendo el metal al descubierto

y al medio corrosivo que es muy anódico respecto a la película del metal en contacto con la solución. Entonces la corrosión bajo tensión sucederá autocatalíticamente.

En las aleaciones de aluminio así como en otros materiales, la deformación plástica, podría romper la película protectora sobre la superficie del metal.

Aleaciones de aluminio, zinc, magnesio y cobre. En la investigación de materiales con más alta resistencia y mayor oposición a la corrosión intercrystalina que las aleaciones de aluminio-cobre, se han desarrollado las aleaciones aluminio-zinc. Una aleación conteniendo cerca del 5% de zinc, con pequeñas cantidades de magnesio y cobre tuvo más alta resistencia que las aleaciones tipo duraluminio, sin embargo, son susceptibles a la corrosión bajo tensión. Al añadir una pequeña cantidad de cromo a esta aleación aumenta marcadamente la resistencia a la corrosión bajo tensión. Y así fué el cromo el elemento efectivo para mejorar la resistencia a CBT., estas aleaciones son designadas como series 7xxx (7000).

Estas aleaciones no solo tienen más alta resistencia a la tensión que las aleaciones, aluminio-cobre, magnesio, sino que además son un poco más resistentes a la corrosión bajo tensión.

El mecanismo de la corrosión bajo tensión en aleaciones de aluminio-zinc no ha sido tan bien establecido como en las aleaciones de aluminio-cobre.

Las susceptibilidades relativas a la corrosión bajo tensión, de un número de aleaciones extruidas de alta resistencia, han sido determinadas en inmersión alterna en un 3.5% de solu-

ción de cloruro de sodio (NaCl).

La razón de la diferencia en las susceptibilidades de extrusiones con diferentes direcciones de esfuerzos aplicados, no son aún claras, se ha sugerido que debido a que los intermetálicos se distribuyen a lo largo de los límites de grano, un ataque electroquímico puede esperarse que sea más dañino a lo largo de estos límites que a lo largo de los límites normales a la dirección de extrusión.

Durante la extrusión los granos serán estrechados en la dirección longitudinal y aplanados en la dirección transversal. Si una muestra es maquinada con su eje mayor en la dirección longitudinal, habría relativamente un pequeño número de límites de grano por unidad de longitud. Solo unos pocos de estos límites serán normales al esfuerzo longitudinal en la superficie de extrusión.

Si la corrosión bajo tensión se debe a segregación, como la de componentes intermetálicos en los límites de grano, es mucho más probable que ésta condición exista en algunos límites de grano normales al esfuerzo aplicado, en la dirección transversal corta que en cualquier otra dirección.

Si las aleaciones son deformadas, las regiones libres de precipitados son sitios favorables para el movimiento de dislocaciones. Los efectos de concentración de esfuerzos generalmente ocurren en los límites de grano, y como resultado de ello el movimiento de dislocaciones puede tener lugar en las regiones libres de precipitado a niveles de esfuerzos aplicados considera-

blemente, abajo del límite elástico macroscópico. Los movimientos de dislocaciones hacia la superficie del metal pueden formar "escalones" en la misma superficie. Esto puede llevar a la ruptura de la película protectora, y el metal queda descubierto y es muy anódico respecto a la película protectora del metal y aumentaría la corrosión.

Aleaciones de aluminio-magnesio.- Ciertas aleaciones de aluminio-magnesio de la serie 5xxx (5000) y 6xxx (6000) también contienen silicio y pueden ser reforzadas por tratamientos térmicos al precipitar un compuesto de $MgSi_2$. Estas aleaciones junto al aluminio y magnesio que contienen, pueden tener menos del 3% de magnesio, pueden endurecerse por el trabajo en frío, y son generalmente muy resistentes a la corrosión bajo tensión.

Hay un buen número de datos en la literatura que indican que aquellas aleaciones de aluminio que contienen 5% o más de magnesio, pueden ser susceptibles a la corrosión bajo tensión o envejecida y a relativamente bajas temperaturas.

Aleaciones de aluminio fundido.- Generalmente, las aleaciones fundidas son más resistentes a la corrosión bajo tensión que las aleaciones forjadas. Sin embargo, la corrosión bajo tensión ha sido reportada en ciertas aleaciones de aluminio fundido.

En resumen podemos decir lo siguiente:

1. Las aleaciones de aluminio de alta resistencia forjadas que contienen cobre o zinc como elemento de aleación principal y/o aleaciones de aluminio-magnesio que contienen más del 5% de magnesio pueden ser susceptibles a la corrosión bajo-

tensión. Las aleaciones de aluminio que pueden ser endurecidas solamente por trabajo en frío son generalmente consideradas inmunes a la CBT.

2.- Aleaciones extruidas muestran sensibilidad direccional a la corrosión bajo tensión. Son más susceptibles a agrietarse cuando los esfuerzos están en la dirección transversal corta y mucho más resistentes a agrietarse cuando los esfuerzos están en la dirección de extrusión.

3.- La corrosión bajo tensión es un proceso electroquímico, al menos en parte. Es intercrystalina, y puede seguir la grieta trayectorias adyacentes a los límites de grano en aleaciones de aluminio-cobre que son empobrecidas en cobre, y por tanto son anódicas respecto al límite de grano y al grano interno. Esto puede prevenir en las aleaciones de aluminio-zinc del ataque sobre un precipitado (que es anódico) colocado en los límites de grano considerándose que se trata de la fase β (MgZn) ó $MgZn_2$. Aun es motivo de estudio encontrar cual es la fase anódica en las aleaciones de aluminio de alto contenido de magnesio.

4.- Aleaciones fundidas conteniendo de 9 a 11% de magnesio fueron reportadas como susceptibles a la corrosión bajo tensión en laboratorios de pruebas.

Una aleación fundida conteniendo zinc como elemento de aleación principal falla por corrosión bajo tensión expuesta al medio ambiente.

5.- En adición a los procedimientos usuales para prevenir la co

rosión bajo tensión de metales, existen algunos específicos aplicables a aleaciones de aluminio. Piezas forjadas y extruidas deben ser maquinadas tan cerca como sea posible a sus dimensiones finales previas a un tratamiento térmico; esfuerzos provenientes de la extrusión en la dirección transversal corta de extrusión, deben evitarse la protección catódica en la forma de clad o "Alclad" sobre la superficie del metal laminado, de alta resistencia puede usarse para protección contra la corrosión general y la corrosión bajo tensión.

CAPITULO IV

PRUEBAS DE CORROSION

Como se mencionó anteriormente la corrosión consiste esencialmente en las reacciones que pueden producirse entre un metal y el medio ambiente que lo rodea. Así pues, el comportamiento ante la corrosión es una propiedad conjunta del metal y del medio ambiente al cual se expone. Cuando en una prueba de corrosión se trata 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

Las pruebas de corrosión se clasifican en cuatro categorías.

- 1.- Pruebas a escala de semi-planta ó planta-piloto.
- 2.- Pruebas de planta ó de servicio
- 3.- Pruebas de campo
- 4.- Pruebas de laboratorio

De las cuatro anteriores categorías, se puede decir que - las mejores y más adecuadas son las pruebas de semi planta ó - planta-piloto, en las cuales se puede reproducir más fácil y - exactamente las condiciones de la planta, pero en una pequeña escala. Se hace la prueba durante un tiempo suficiente para - obtener buenos resultados. Conviene mencionar aquí la importan

cia de considerar aspectos de corrosión desde el inicio de la planeación de la planta, para evitar problemas mayores cuando ocurran fenómenos de corrosión en una etapa más avanzada del di seño.

Las pruebas en planta o en servicio solo puede 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 ca lor, 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 condicio nes 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 y cuantitativos o ambos casos a la vez, y se pueden clasificar como sigue:

- 1.- Ensayos de rutina para comprobar al logro de un determinado standard de calidad del metal o del medio corrosivo; en ambos casos, la reproducibilidad de los resultados tiene generalmente mas 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 las cuales pueda usarse satisfactoriamente un metal determinado.
- 5.- Pruebas para la obtención de aleaciones nuevas, con una resistencia a la corrosión adecuada ó máxima. Para este fin se requiere especialmente la adaptación del laboratorio a las mismas.
- 6.- Ensayo para el estudio del mecanismo de la corrosión en general, o de un metal o aleación determinada, 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 la 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 in-

dicar 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 puede estar sometido en el uso industrial. Si cualquier aleación durante el servicio, debe estar sometido 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 representan 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 pueda 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 ambienu

- 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 solulción es muy importante en este último aspecto.
- 3.- Más importante todavía que los factores mencionados - en el punto 2 pueden ser los gradientes de concentralción 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 corrolsión, ya que estos pueden actuar como protectores, o pueden incluso acentuar la corrosión.
- 6.- La presencia de sustancias coloidales y cuerpos extralños en la solución.

Los factores siguientes se pueden aplicar a las dos fases:

- 1.- La temperatura incluyendo los gradientes de temperatulra 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 puede ser un factor importante, ya que incluso cuando se intenta conseguir condiciones en que no se produzca movimiento, este puede darse, inevitablemente, debido a los efectos de gravitación y otros.

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

Y así, podríamos continuar enumerando una serie de otros muchos 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 dejaremos de hablar de las pruebas de corrosión de una manera general y nos enfocaremos a nuestro estudio.

4.2- DESCRIPCION DE PRUEBAS A NIVEL LABORATORIO DE CORROSION BAJO TENSION

Para conocer la susceptibilidad de un metal dado al ACBT, es necesario exponer la probeta a condiciones corrosivas, tanto sin tensión como con tensión simultánea, de tal forma que puede fácilmente averiguarse el efecto que dicha tensión puede tener.

Mostraremos sólo una serie de probetas que se utilizan en los ensayos de carga constante, pero no hablaremos más ya que éstas no se utilizan en nuestro estudio.

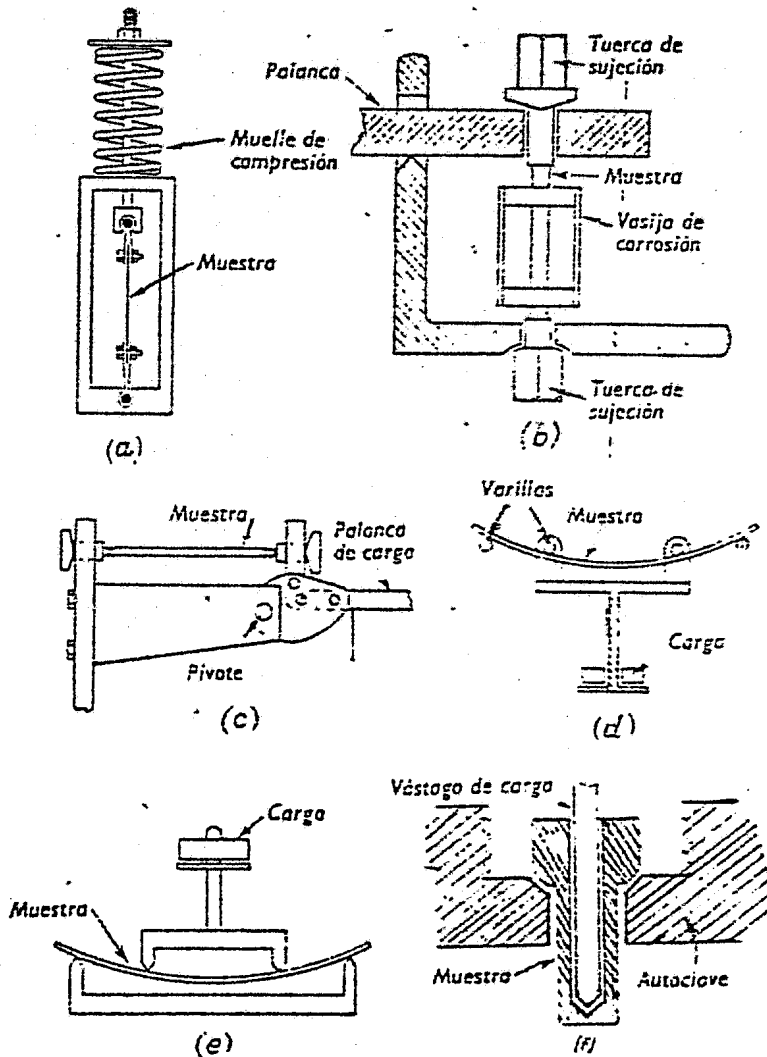


FIGURA No. 14.- Probetas que se utilizan en las pruebas de corrosión bajo tensión del tipo de carga constante.

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

En la siguiente figura No. 15 mostraremos una serie de probetas que pueden ser utilizadas en este tipo de pruebas.

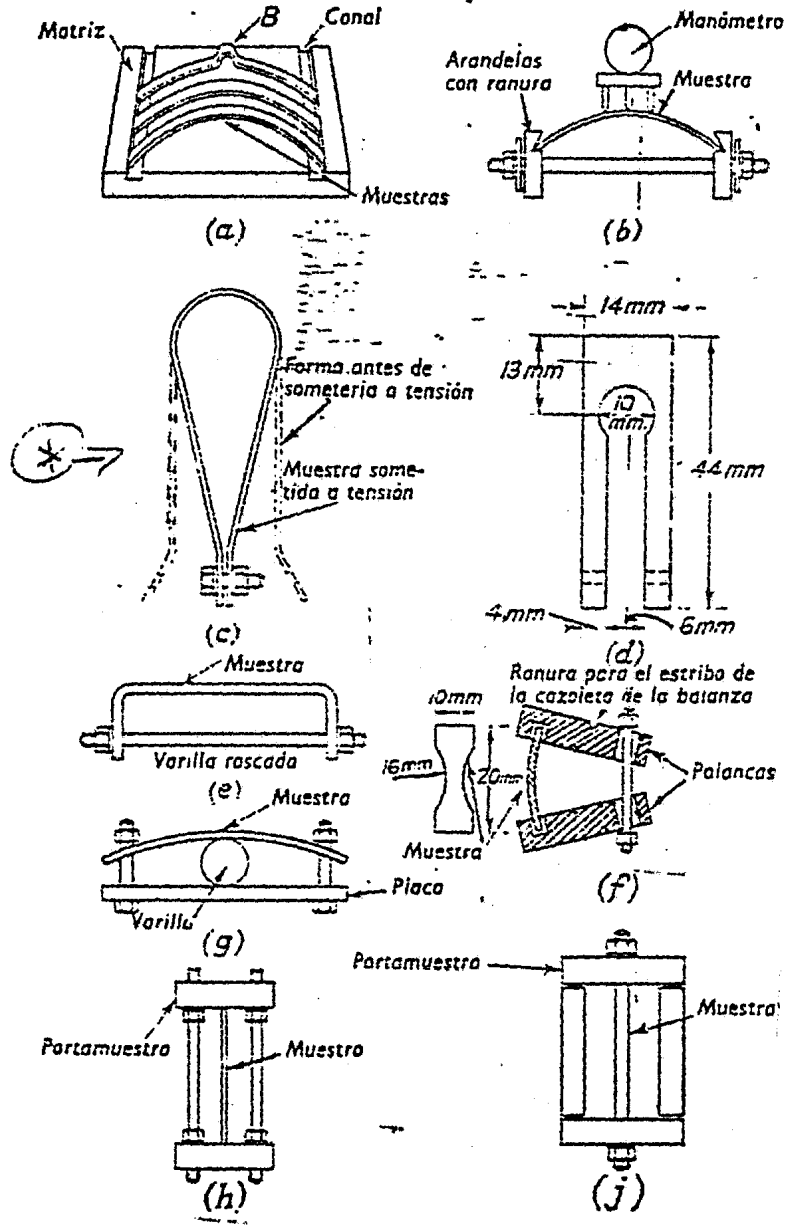


FIGURA No. 15.- Probetas que se utilizan en las pruebas de corrosión bajo tensión del tipo de deformación constante.

Y de esta variedad de probetas mostradas, se seleccionó - la de la forma de "U" (Fig. 16) que como se mencionó anteriormente es con lo que se pudo trabajar con mayor facilidad.

Con este tipo de ensayo es muy difícil determinar las propiedades mecánicas de la muestra después de la corrosión, por comparación con muestras no sometidas a tensión durante la misma. Además, las condiciones de tensión difieren en muestras - de propiedades mecánicas iniciales diferentes. Las pruebas son, por consiguiente, de mayor valor para ensayos cualitativos que para cuantitativos. Con muestras a las que se les ha dado una forma semicircular, la tensión máxima puede ser calculada por la siguiente fórmula:

$$\nabla = \frac{dET}{\pi R^2} \quad \text{si } R/T < 0, \text{ donde } E \text{ es el módulo de elasticidad, } d \text{ es la deformación, } T \text{ el grosor y } R \text{ es el radio inicial para la fibra neutra.}$$

Muchas veces las probetas en forma de "U" se usan con un tornillo pasando a través de dos agujeros en las piernas de la probeta. El tornillo con tuerca impone una deformación constante a la probeta; es así un esfuerzo de tensión en las fibras exteriores.

Es muy importante utilizar el mismo material como la probeta para evitar la formación de una celda galvánica, que es lo - que se hace concretamente con nuestras probetas.

Otros autores proponen la siguiente fórmula para el cálculo del esfuerzo superficial de una probeta doblada:

$$\bar{V} = \frac{\pi^2 E h y}{2 L^2}$$

con

\bar{V} = esfuerzo en lb/pulg²

E = módulo de elasticidad
en lb/pulg²

L = longitud de la probeta
en pulg

h = espesor de la probeta
en pulg

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

NOTA: Estas fórmulas solo pueden ser utilizadas 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 \bar{V}_E . A veces se usan probetas previamente agrietadas (por fatiga) para evitar el tiempo de incubación o de iniciación de la grieta.

4.3- 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: G-30-72 que es la recomendada para la producción y usos de probetas dobladas en "U" para pruebas de corrosión bajo tensión: la cual se describe a continuación:

1.- ALCANCE

1.1- Esta práctica describe los procedimientos para la producción y usos de probetas dobladas en "U" para la evaluación de la fractura por CBT en metales. La probeta doblada en "U" es generalmente una tira rectangular la cual es doblada 180° alrededor de un predeterminado radio y manteniéndola 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. 16 muestra algunas configuraciones de las probetas dobladas en "U" que exhiben distintos comportamientos al aplicar los esfuerzos.

ASTM G 30

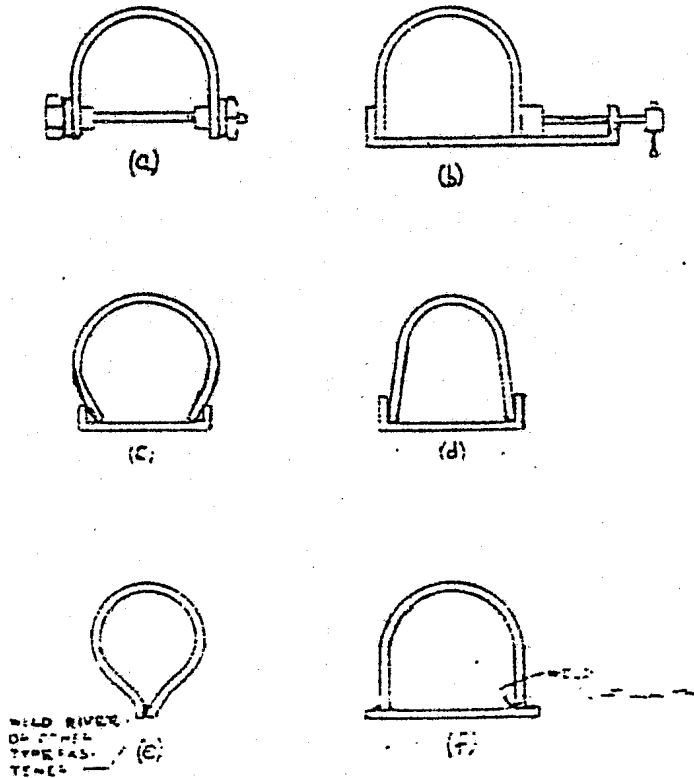


FIG. 1 Typical Stressing Devices

FIGURA No. 16 Configuraciones típicas de las probetas -
dobladas en forma de "U"

1.2- Este tipo de probetas están sujetas a la deformación elástica y plástica. Aunque en algunos casos es posible únicamente producir deformación elástica.

1.3- Esta norma se interesa únicamente con la prueba de probetas y no con los aspectos del medio corrosivo.

1.4- 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, pie
za de fundición o uniones soldadas; también pueden ser usadas
probetas de alambre.

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

Estas son más provechosas para detectar grandes diferen--
cias 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 procedimiento de la prueba.

2.- PROBETAS DE PRUEBA

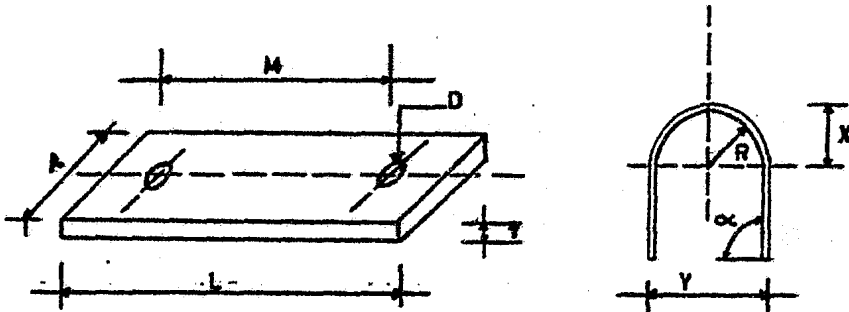
2.1- Se considera como el primer paso en la prueba de --
corrosión la obtención del material para la prueba. Cuando las
probetas son cortadas de lámina, fleje, barra o placa, se hace

lo posible por hacer el corte transversal o longitudinalmente a la dirección del laminado.

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

2.2- Dimensiones de la probeta. En este caso se expone * la siguiente figura No. 17 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.

2.2.1- 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	5/8	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. 17 Dimensiones para las probetas dobladas en forma de "U"

2.2.2- 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.

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

2.2.4- 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 que están siendo probados.

2.3- PREPARACION 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 permite hacerlo.
- c) Para evitar en lo posible, la contaminación.
- d) Para obtener una superficie más uniforme en todas las muestras con el objeto de obtener resultados más concordantes.

En general, se usa una superficie limpia para la prueba. Es usual lijar sobre papel esmeril con un número 120 ó 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 la pro-

beta se le fuera hacer análisis metalográfico (lija 180 hasta 600); por último se le da un acabado sobre paño con alúmina. Se deben usar lijas limpias para evitar una contaminación de la superficie, lo que causaría efectos galvánicos.

2.3.1- A veces son necesarios tratamientos térmicos antes de la preparación.

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

2.3.3- El maquinado o esmerilado deberá ser hecho en etapas para que así el corte final deje la superficie con un terminado de 30 Min. (762 mm).

Los bordes de la probeta deberán recibir el mismo acabado como las caras.

La preparación química de la superficie evita, o puede eliminar, la contaminación o trabajado 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 detec

ción del comienzo del ataque en la prueba siguiente.

2.3.4- La etapa final de preparación es desengrasar. Dependiendo sobre el método de aplicación de esfuerzos, esto puede hacerse antes o después de la aplicación de esfuerzos.

2.4- IDENTIFICACION DE PROBETAS.

Es mucho mejor llevarlo a cabo por estampado o marcado cerca de una de las esquinas de las probetas lo más retirado del área sometida a esfuerzos. Etiquetas no metálicas pueden ser puestas, fijándoles por medio de un amarre en el tornillo de fijación para mantener la probeta en tensión.

3.- CONSIDERACION DE LOS ESFUERZOS.

3.1- Los esfuerzos de principal interés en el doblado son circunferenciales.

Esto es, no uniformes porque existe un gradiente de esfuerzos a través del espesor variando desde una máxima tensión en la superficie exterior a una máxima compresión sobre la superficie interna, el esfuerzo varía desde cero en el exterior hasta un máximo en el centro del doblado, y los esfuerzos pueden variar a través del espesor del doblado.

3.2- La probeta doblado, en las fibras exteriores del doblado es deformada dentro del rango plástico según una curva esfuerzo-deformación.

3.3- La deformación total ($\bar{\epsilon}$) sobre el exterior del do-

blado se puede aproximar a la ecuación:

$$\sqrt{\epsilon} = \frac{T}{2R} \quad \text{cuando } T \ll R$$

T = espesor de la probeta
R = radio de curvatura del
doblado

4.- APLICACION DE ESFUERZOS.

4.1- Esta aplicación usualmente se lleva a cabo por medio de una operación a una etapa o a dos etapas.

4.2- La aplicación a una etapa es realizada por un doblado dentro de la forma deseada y manteniéndola sin permitir relajación de la tensión elástica de deformación. Este tipo de método se muestra en la siguiente Figura No. 18

Teniendo en cuenta que el método de la figura 4 a es el más conveniente para la aplicación de esfuerzos.

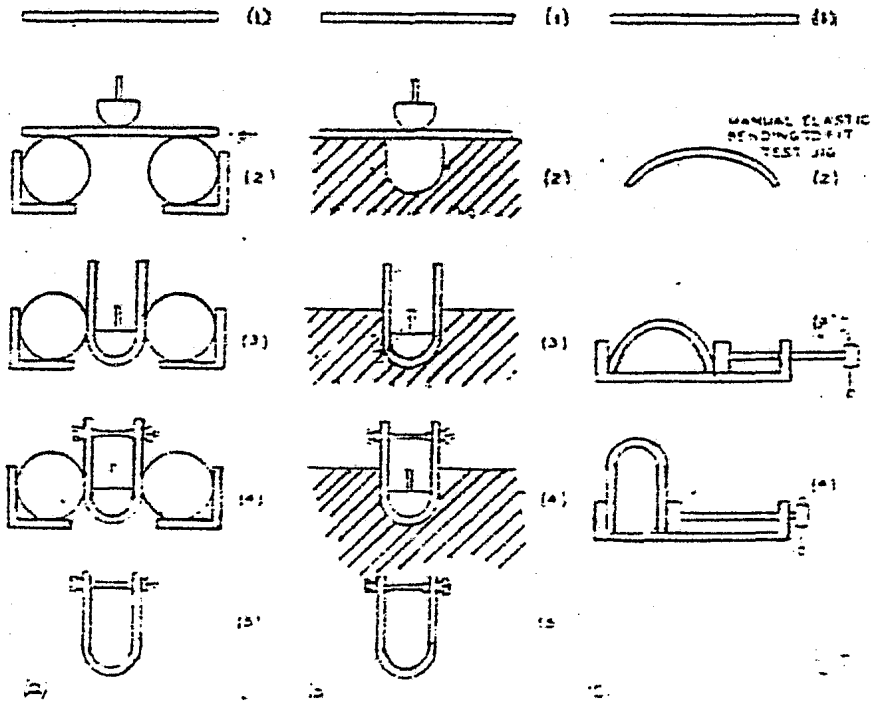


Figura No. 18 Métodos de aplicación de esfuerzos en una simple etapa.

4.3- La aplicación de esfuerzos en dos etapas involucra - primero hacer 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.

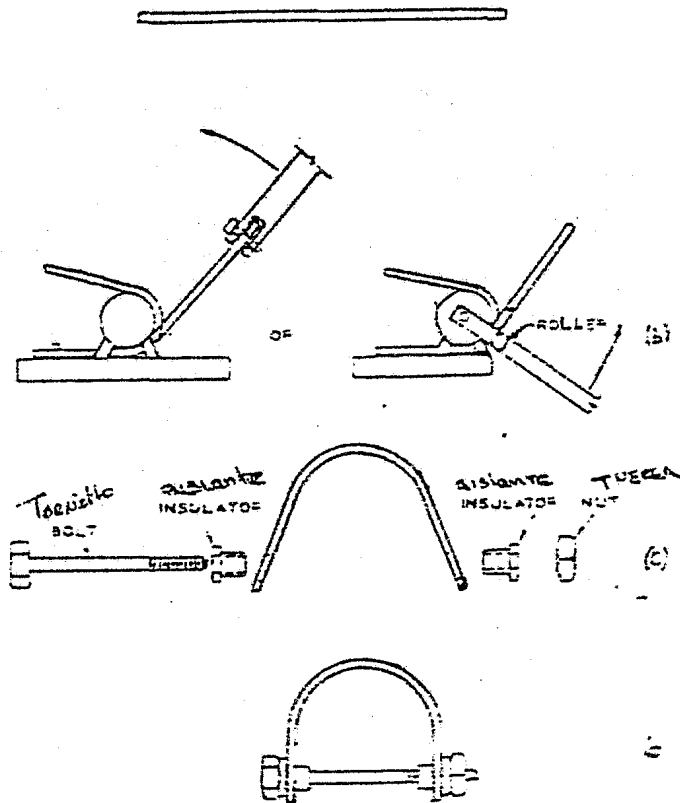


Figura No. 19 Método de aplicación de esfuerzos en dos etapas.

4.4- El perno o patron de fijación usado 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.

4.5- 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

ta puede astillarse en una o dos piezas debido a la gran condición de esfuerzos en probeta doblada, estas piezas pueden salir (botar) de la probeta a grandes velocidades y provocar algún accidente.

5.- EXPOSICION DE LA PROBETA.

5.1- Antes de la exposición, medidas y pesado de la probeta, ésta debe ser desengrasada en una solución desconocida, que sea químicamente inerte al metal de prueba.

Una vez producido el doblado y habiendo colocado el tornillo tensador, se procede el desengrase de la probeta justo antes de las medidas de peso y dimensiones. Si será determinado después de la corrosión la pérdida de peso o de esfuerzos.

Un método fácil de remover grasas y aceites (excepto aceites con silicones) es usar un solvente de vapor desengrasador. Pero si tal equipo no está disponible, las probetas deberán ser limpiadas con un rápido secado, con solventes de bajo residuo, tales como acetona, alcohol o metil etil cetona (MEK). Solventes que sean grandemente flamables (gasolina), tóxico (tetracloruro de carbono), o aquellos que dejen una película de residuo (Kerosina) no deberán ser usados.

Una vez realizada la limpieza de las probetas, estas deberán ser tratadas cuidadosamente para evitar una contaminación posible en el material de prueba.

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 corto tiempo razonable, ella deberá ser colocada en un desecador ó cubriéndolas con un aceite protector y en un lugar seco y libre de polvo.

5.2- La probeta bajo esfuerzo deberá ser examinada para agrietamientos mecánicos anteriores a la prueba. Una similar o exigente inspección técnica deberá usarse en las subsecuentes pruebas.

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

6.- 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).- Se deben colocar bien las muestras, según el objetivo de la prueba, inmersión parcial o completa, contacto con fases de vapor, etc.

4.4- NORMA PARA LA PREPARACION DE LA SOLUCION

Norma recomendada para pruebas de CBT en inmersión alterna en solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3.5% ASTM Designación G 44-75.

1.- ALCANCE

1.1- Esta recomendación práctica abarca los procedimientos para realizar pruebas de CT en solución de cloruro de sodio -- (NaCl) al 3.5%, (es algunas veces realizada en substitución de agua de mar preparada de acuerdo a especificaciones. Originalmente se aplica a pruebas de aleaciones de aluminio y aleaciones ferrosas, pero pueden ser usadas para otros metales. Trata de las condiciones ambientales de la prueba y los medios para controlarlos.

1.2- Esta práctica recomendada se aplica solamente a pruebas en las cuales las muestras están en contacto con el aire -- circundante bajo condiciones que permiten el secado. No abarca pruebas en las cuales las muestras son colocadas dentro de reci

pientes cerrados en los cuales la solución es periódicamente - bombeada y donde no se pueden secar las muestras.

1.3- Esta práctica recomendada está pensada para el desarrollo de aleaciones y para aplicaciones donde la prueba de inmersión alterna sirve como una prueba de control sobre la calidad - de los sucesivos lotes del mismo material. Por esto, las condiciones estrictas de prueba son especificadas de modo que exista la máxima seguridad de que las variaciones en los resultados son atribuibles a las variaciones en el material que está siendo probado.

2.- RESUMEN DEL METODO.

2.1- La prueba de inmersión alterna utiliza un ciclo de una hora que incluye un periodo de 10 minutos en una solución acuosa al 3.5% de Cloruro de Sodio (NaCl) seguido por un periodo de 50 minutos fuera de la solución, durante el se permite que sequen las muestras. Este ciclo de una hora es continuado 24 H/día del número total de días recomendado para una aleación particular que está siendo probada.

Típicamente, las aleaciones de aluminio y los aceros se exponen de 20 a 90 días o más tiempo, dependiendo de la resistencia de la aleación a la corrosión en agua salada.

3.- INSTRUMENTOS

3.1- METODO DEL CICLO

Puede usarse cualquier mecanismo apropiado para verificar la porción de inmersión del ciclo siempre y cuando se alcance la velocidad especificada de inmersión y remoción:

El aparato debe construirse de materiales inertes apropiados. Los métodos usuales de inmersión son:

3.1.1- Colocando las muestras sobre un bastidor móvil que es periódicamente bajado al interior de un depósito estacionario que contiene la solución.

3.1.2- Colocando las muestras sobre una parte giratoria hexagonal la cual gira cada 10 minutos 60 grados continuos y así, las muestras son pasadas por la solución contenida en un depósito estacionario. El uso de una rueda giratoria continuamente girando a una velocidad de una revolución por hora no es recomendada para muestras muy grandes, para las cuales la velocidad de inmersión será más lenta que la especificada en 3.2-

3.1.3- Colocando las muestras en una bandeja estacionaria-abierta a la atmósfera y teniendo la solución movida por presión de aire, bomba no metálica o desaguando por gravedad de un depósito a la bandeja.

3.2- VELOCIDAD DE INMERSION

La velocidad de inmersión y remoción de las muestras de la solución debe ser tan rápido como sea posible sin sacudirlas. -

Para propósitos de normalización, un límite arbitrario puede ser adoptado tal que no sea mayor, más de 2 minutos como tiempo medio desde que la primera porción de cualquier muestra es cubierta - hasta que esta lo es completamente, por la solución.

4.5- DESCRIPCION DEL METODO DE INMERSION

1.1- La inmersión alterna en Cloruro de Sodio al 3.5% - (NaCl) es una prueba general, de múltiples utilidades; prueba - que produce comparaciones válidas para la mayoría de los demás metales, particularmente cuando las muestras son expuestas en - niveles altos de esfuerzo aplicado o de intensidad de esfuerzo.

1.2- Si bien, la prueba de inmersión alterna es una prueba acelerada y es considerada representativa para ciertas condiciones naturales, no está destinada a pronosticar comportamiento en ambientes químicos especializados, en los que un modo diferente de agrietamiento puede ser el operativo. Por ejemplo, esto no pronostica el comportamiento de aleaciones de aluminio en medios altamente ácidos tales como vapores calientes de ácido nítrico. Para tales casos, los resultados de pruebas de inmersión alterna son de cuestionable significancia hasta que se haya establecido una relación entre ésto y medios de servicio anticipados.

1.3- Aún cuando la prueba es aplicable en algún grado a todos los metales, no es igualmente discriminativo de todas las - aleaciones, aún dentro del mismo sistema metálico. Consecuente-

mente, la información puede ser establecida para permitir comparaciones de realización del comportamiento de aleaciones de interés en la prueba de inmersión alterna y en medios naturales.

1.4- Volúmen mínimo.- El volúmen de la solución para la prueba debe ser suficientemente grande para evitar cualquier cambio apreciable en la corrosividad, debido al agotamiento, uno u otro de los elementos del medio corrosivo, la acumulación de productos de corrosión u otros elementos que pueden afectar significativamente la corrosión posterior. Una relación mínima arbitraria entre el volumen de la solución de prueba y el área de la muestra (incluyendo cualquier accesorio descubierto) es de 200 ml/pulgada² (3.2 lts/dm²) del área de la muestra es recomendada.

1.5- Recuperación del agua perdida por evaporación.- Debido a la pérdida por evaporación deben hacerse, por lo menos diariamente, adiciones de agua pura.

La pérdida por evaporación "No debe" ser recuperada con la solución salina. El procedimiento más simple y recomendado es en primer lugar llenar de la solución a un nivel de líquido hasta la línea de nivel indicada y rellenar diariamente hasta la línea. Puede ser usado un dispositivo automático con líquido a un nivel constante. Un método alternativo es checar la solución con un hidrómetro y agregar la cantidad necesaria de agua hasta llevar a la solución a la concentración salina al 3.5%.

Reemplazo de Solución.- Solución fresca puede ser prepara-

da semanalmente. En tal tiempo, las porciones de los instrumentos que están en contacto con la solución deben ser limpiados con un chorro de agua. Reemplazando con más frecuencia la solución puede requerirse para ciertos aceros si ocurre un enmohecimiento severo.

CONDICIONES DEL AIRE.

1.6- TEMPERATURA.

1.6.1- La temperatura del aire debe ser mantenida dentro de $\pm 19C$ ($\pm 29F$) durante todo el ciclo de prueba. Para normalización, una temperatura arbitraria de $27 \pm 19C$ ($80 \pm 29F$) debe ser adoptada.

4.6- TIEMPO DE PRUEBA.

Es muy importante la selección adecuada del tiempo de y el número de periodos de exposición.- Siempre se aconseja efectuar por lo menos dos ensayos, para poder determinar variaciones en el poder de la corrosión y detectar errores eventuales en el cálculo de la velocidad de corrosión. A menudo se efectúan pruebas en el laboratorio con una renovación o reemplazo del medio corrosivo.

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

$$\frac{2000}{m \text{ py}} = \text{Horas de duración de la prueba}$$

$$m \text{ py} = (\text{mili pulgadas por año})$$

Otro error muy común es la suposición que la temperatura - del medio corrosivo es la temperatura de corrosión pero en realidad, sobre todo para superficies calentadoras, la diferencia puede ser muy grande. En cursos de transmisión de calor se describen los métodos para calcular la verdadera temperatura superficial.

4.7- VELOCIDAD DE ATAQUE

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 la más usual es "mpy", la cual se calcula con la fórmula siguiente:

$$\text{mpy} = \frac{534 W}{DAT} \quad \text{donde:}$$

$W = \text{p\u00e9rdida de peso (mg)}$
 $D = \text{densidad (g/cm}^3\text{)}$
 $A = \text{\u00e1rea (pul}^2\text{)}$
 $T = \text{Tiempo (hrs.)}$

El factor de conversi\u00f3n de otras unidades a mpy es:

multiplique	por
in/yt = pulg/a\u00f1o	1000
in/month = pulg/mes	12,000
mg/dm ² dia (mdd)	1.44/densidad

4.8- ANALISIS DE PROBETAS DESPUES DE LA CORROSION

Ahora llegamos al paso m\u00e1s importante dentro de la prueba, me refiero a la inspecci\u00f3n de la probeta durante y despu\u00e9s de la corrosi\u00f3n.

Los procedimientos de ex\u00e1men depender\u00e1n sobre todo de la conveniencia y el prop\u00f3sito de la prueba. En la mayor\u00eda de las pruebas de laboratorio es conveniente remover la probeta del medio corrosivo (usando grandes tenazas) y examinarla a simple vista o por medio del microscopio.

Despu\u00e9s de la inspecci\u00f3n, en este caso para detectar grietas la probeta puede entonces ser regresada a la prueba.

Los productos de la corrosi\u00f3n pueden obscurecer la grieta en este caso se usan las t\u00e9cnicas para la limpieza de las probetas despu\u00e9s de la exposici\u00f3n.

Antes de limpiar la probeta, conviene examinar la capa de producto de corrosión, ya que a menudo el aspecto de la superficie puede proporcionar información sobre las causas ó 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).

R E P O R T E

- 1.- El reporte debe contener información esencial.
- 2.- Identificación de la aleación (ver la composición conforme a lo registrado en la designación de la aleación).
- 3.- Producto, temperatura y espesor del material de prueba.
- 4.- Procedimiento de muestreo, tamaño y localización de la muestra con respecto a la fabricación del material disponible, ó si está disponible.
- 5.- Detalle de probetas: tipo, tamaño y orientación de grano de las probetas de prueba y número de ellas.
- 6.- Niveles de esfuerzo ó intensidad de esfuerzo y método de carga.
- 7.- Duración de la prueba.
- 8.- Notación de cualquier desviación en el procedimiento de prueba.

Otra información que puede ser deseable en ciertos tipos de reportes incluyen:

- 9.- Condición de superficie de las probetas incluyendo cualquier recubrimiento protector ó tratamiento de trabajado superficial.
- 10.- Relación del volumen de solución al área superficial del metal.
- 11.- Descripción del tipo de aparatos de inmersión alternante.

- 12.- Método usado en la limpieza de la probeta, antes y después de la exposición.
- 13.- Lista de un tabulador individual que reúna cada probeta, mas resultados de apoyo de las observaciones metalográficas.

CAPITULO V

EXPERIMENTACION

5.1- TIPOS DE ALEACIONES DE ALUMINIO ENSAYADAS.

Los tipos de aleaciones ensayadas fueron:

Aleaciones de aluminio 2062 y 6063 revenidas cuya composición química típica es:

<u>COMPONENTE</u>	<u>PORCENTAJE</u>
TIPO-2062 Cobre	4.5 máximo
Silicio	0.8 "
Manganeso	0.8 "
Magnesio	0.5 "
TIPO-6063 Manganeso	1 máximo
Silicio	0.6 "
Cromo	0.2 "
Cobre	0.3 "

5.1.1- CARACTERISTICAS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO USADAS EN LA INVESTIGACION

A continuación hacemos mención de algunas características de las aleaciones de aluminio usadas en el laboratorio (tipos 2062 y 6063).

5.1.2- CARACTERISTICAS DE LA ALEACION 2062

Cuando se le mantiene a una temperatura de 500°C. en agua hirviendo, ésta será susceptible a la corrosión intercrystalina en cloruros. Si es templada en agua fría será inmune a este tipo de corrosión. Otra de sus características es su alto grado de maquinabilidad.

5.1.3- TRATAMIENTOS TERMICOS.

Para este tipo de aleación existen dos principales tipos de temple entre una temperatura de 910 y 930°C.

PROPIEDADES MECANICAS

TEMPLE T-6

Esfuerzo de Ruptura Mínima	35 Kg/mm ²
Esfuerzo Típico	39 "
Punto de Cedencia Mínimo	32 "
Punto de Cedencia Típico	36 "
Elongación Típica	9%

TEMPLE T-8

Esfuerzo de Ruptura Mínimo	36 Kg/mm ²
" Típico	40 "
Punto de cedencia Mínimo	31 "
" Típico	35 "
Elongación Típica	10%

5.1.4- CARACTERISTICAS DE LA ALEACION 6063

Este tipo de aleaciones también contienen Silicio y, pueden ser reforzadas por tratamientos térmicos al precipitar un compuesto de $Mg Si_2$. Estas aleaciones, junto con aleaciones que contienen menos del 3% de magnesio fortalecidas por trabajo en frío, son generalmente resistentes a la corrosión bajo tensión. Otra característica es que es resistente a medios marinos y atmosféricos y que se trata de un material de mediana maquinabilidad.

5.1.5- TRATAMIENTOS TERMICOS

Para este tipo de aleación existen dos principales tipos - de temple entre temperaturas de 70 y 204°C.

PROPIEDADES MECANICAS

TEMPLE T-6

Esfuerzo de Ruptura Mínima	20.9 Kg /mm ²
Punto de Cedencia	10.914 "
Elongación a 50 mm	10%

TEMPLE T-5

Esfuerzo de Ruptura Mínima	14.79 Kg /mm ²
Punto de Cedencia	10.71 "
Elongación	8%

5.2- DIMENSIONES DE LAS MUESTRAS

Se tomaron las siguientes dimensiones:

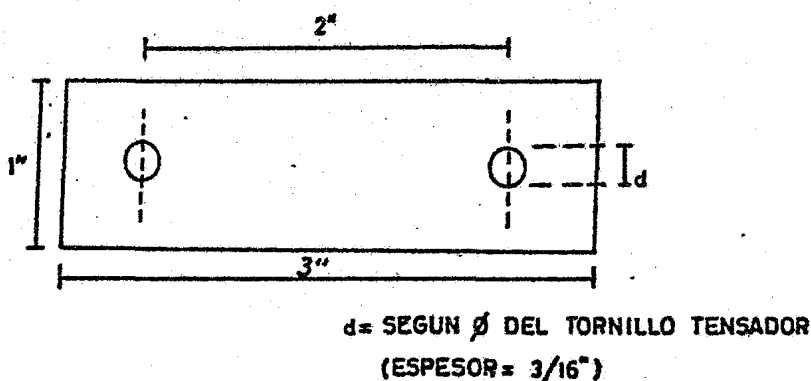


Fig. N° 20.

5.3- PREPARACION DE LAS MUESTRAS

El material se encontraba originalmente en forma de solera. 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 se pasó a un proceso de lijado con lijas de carburo de silicio (180, 220, 360, 400, 500, 600) después de este proceso pasaron a un pulido a espejo, con una pulidora provista de un paño, empleando alúmina (Al_2O_3) 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- PROCEDIMIENTO PARA EL DOBLADO EN FORMA DE "U"

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

El método usado fué el de dos etapas, el cual consiste (como fué mencionado anteriormente) en aplicar al material primero 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 puede verse en la fotografía número 1.

Todas las probetas deformadas fueron examinadas por medio del microscopio para detectar alguna posible fractura del material debido al proceso de deformación; no encontrándose falla alguna. En las fotografías número 3 y 4, se muestra un aspecto de éstas probetas.

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 obtenido.
- b).- Después que las probetas fueron cortadas se realizaron análisis metalográficos en la superficie y en los bordes, observándose una orientación de los gra-

nos hacia una misma trayectoria y con ésto se concluyó que la dirección del laminado es como se muestra en la figura 21.

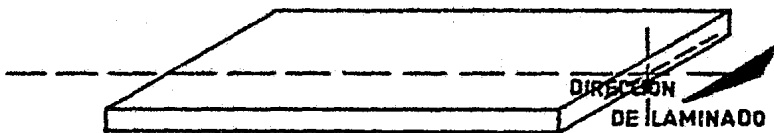


FIGURA N° 21 DIRECCION DE LAMINADO DE LAS PROBETAS DE PRUEBA

Y por la forma en que fue doblada la probeta se determinó que la aplicación de los esfuerzos fué en la misma dirección de laminado (longitudinalmente), esto es mostrado en la figura No. 22.

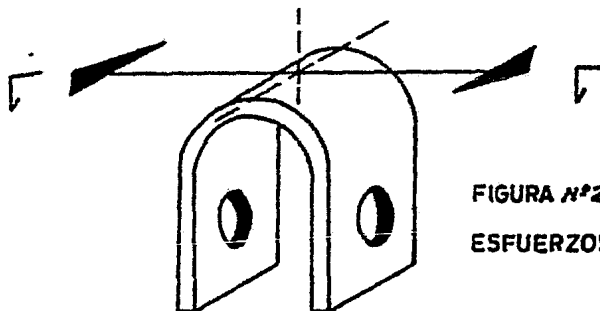


FIGURA N° 22 DIRECCION DE LOS ESFUERZOS APLICADOS

5.6- LIMPIEZA DE MUESTRAS ANTES DE LA INMERSION

Después de que las probetas fueron sometidas a esfuerzo, - eran desengrasadas por un método simple. Fueron lavadas las piezas con detergente y después enjuagadas con alcohol, quedando - listas para ser pesadas. Una vez que las probetas fueron desengrasadas, éstas se manipulan únicamente por medio de pinzas o - guantes con el objeto de evitar tocar las probetas con las ma- nos.

5.7- IDENTIFICACION DE LAS MUESTRAS

La identificación de las probetas se realizó a través de - los tornillos tensadores en donde se especificaba con un número el tipo de material que se estaba probando pieza por pieza, por lo cual fué fácil controlar todas las probetas. Cada pieza pro- bada era posteriormente introducida a una bolsa de polietileno con su número respectivo y era registrado en una libreta.

5.8- PESO DE MUESTRAS ANTES DE LA INMERSION

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

5.9- PREPARACION DEL MEDIO CORROSIVO.

Se empleó una solución a base de cloruro de sodio, agua -- oxigenada y agua destilada, tal como se especificó en la norma,

Muchas veces 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, compresivo y torsional aunque los esfuerzos de tracción son la causa más corriente 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 una condición intermedia o variable, pero las pruebas de laboratorio comprenden uno de los dos ca--

Los 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 el 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.

La dirección de las tensiones en relación con la estructura del metal, puede tener un marcado efecto sobre la vida 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 cuenta 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.

pero se preparó una solución con 90 mililitros de agua oxigenada y 10 grs. de cloruro de sodio, a la temperatura ambiente 23°C. Con esta solución fueron ensayadas 2 probetas de aleación (6063) por un tiempo de 5 días para cada una.

Después se preparó la solución que especifica la norma G 44 o sea 3.5 gramos de cloruro de sodio más 96.5 mililitros de agua destilada. Aquí se probó una probeta más de aleación (2062) durante 24 días en inmersión alterna.

Se hizo otra preparación de 5.7gr. de Cloruro de Sodio + 1 mililitro de Agua Oxigenada al 30% + 93.3 mililitros de agua destilada. Se probó también con una probeta de (2062) durante 20 días en inmersión constante, cambiando la solución cada 48 horas.

5.10- INMERSION DE LAS MUESTRAS EN EL MEDIO CORROSIVO

Después de que las probetas eran pesadas, se colocaban directamente en el medio corrosivo, soportando en los extremos del tornillo tensor con hilo de nylon. Se utilizó este tipo de soporte para evitar alguna interferencia tanto con la probeta como con la solución.

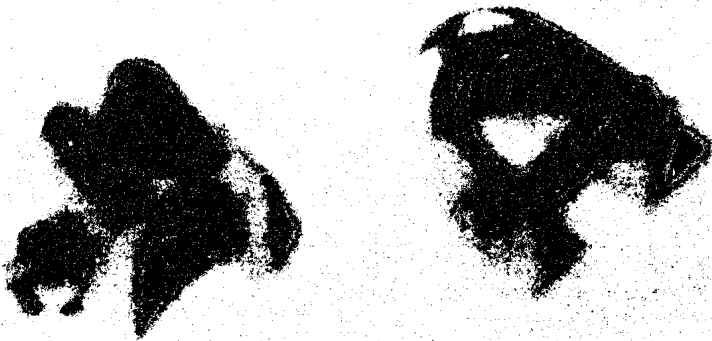
5.11- EQUIPO EMPLEADO EN EL LABORATORIO

1.- Vasos de Precipitado.

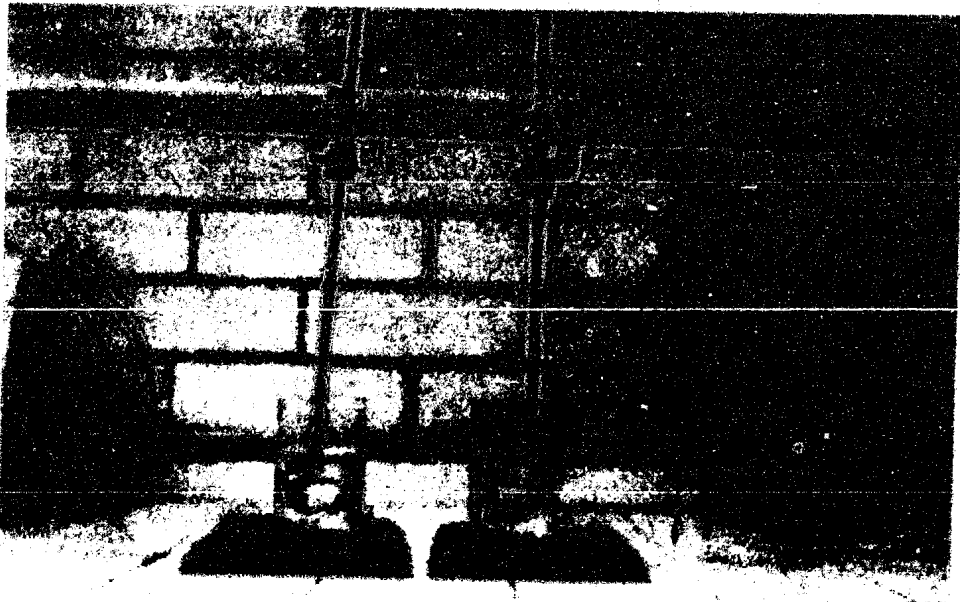
2.- Pipeta Graduada de 50 ml. y 100 ml.

3.- Pinzas para manipular las probetas

- 4.- Balanza analítica (para pesar probetas)
- 5.- Balanza granataria (para pesar sustancias)
- 6.- Pistola de aire (para secar probetas)
- 7.- Soporte de base metálica
- 8.- Macroscopio con equipo fotográfico acoplado
- 9.- " metalográfico con equipo fotográfico acoplado.
- 10.- Escobillón para lavar probetas antes y después de la prueba.



FOTOGRAFIA NUMERO 1. DIMENSIONES Y ACABADO DE LAS PROBETAS



FOTOGRAFIA No. 2. INSTALACION DEL EQUIPO EMPLEADO EN EL LABORATORIO

5.12- AIREACION Y TEMPERATURA

No existió aireación proporcionada por algún aparato.

La temperatura fué de: 23°C.

5.13- METODO DE INMERSION

El método de inmersión fue de inmersión total y de inmersión alterna (efectuando revisiones periódicas).

Las observaciones se hacían sacando las probetas del medio corrosivo y lavándolas con agua y frotándose con una escobetilla para poder quitar productos de la corrosión . De ahí eran llevadas al microscopio para detectar una posible grieta ó evolución de la misma.

5.14- LIMPIEZA DE LAS MUESTRAS DESPUES DE LA CORROSION

Una vez cumplidos los 5, 20 y 25 días de inmersión que se sugirió para esta prueba, las probetas eran sacadas del medio corrosivo y lavadas con un chorro de agua y con una escobetilla.

Posteriormente fueron introducidas en una solución de ácido nítrico al 30% a una temperatura de 30°C para eliminar los residuos existentes en la superficie de las muestras, tales como Sulfato de Cobre y otros.

5.15- PREPARACION DE PROBETAS PARA OBSERVACION METALOGRAFICA.

Una vez que las probetas fueron pesadas, se procedió a preparar una cara plana en la superficie de mayor radio de curvatura, con el fin de observar el tipo de grieta que se produjo. Este proceso se realizó con lija de carburo de silicio No. 600 y posteriormente se pasaron a un pulido a espejo en una pulidora provista de un paño empleando alúmina Al_2O_3 como abrasivo, - después fueron atacadas con reactivos DIX-KELLER compuesto de ácido nítrico, agua destilada, ácido fluorhídrico y ácido clórico.

REACTIVO DIX-KELLER

190 ml. de Agua Destilada

5 ml. Acido Nítrico

3 ml. Acido Clórico

2 ml. Acido fluorhídrico

Tiempo de ataque, 25 segundos.

CAPITULO VI

RESULTADOS

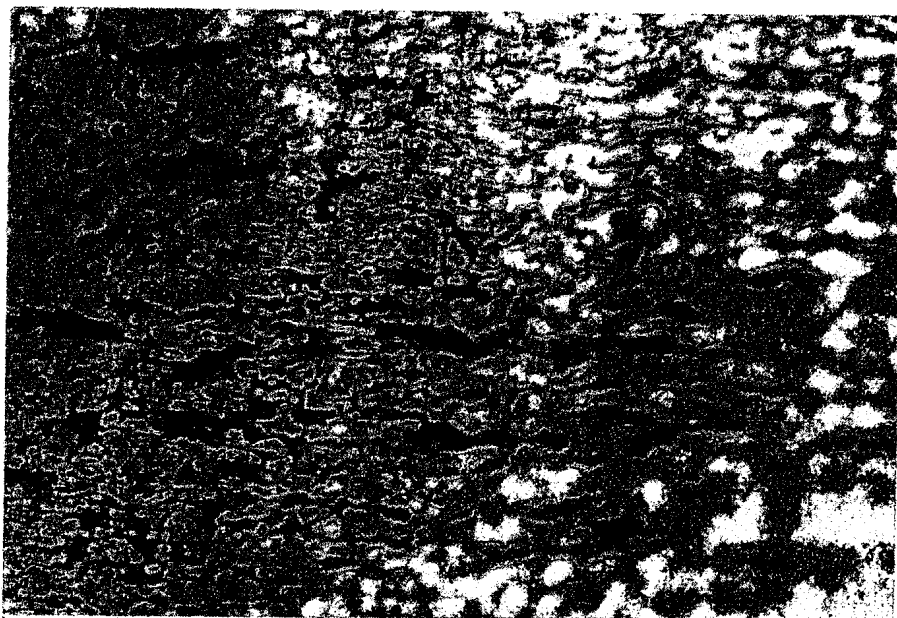
El tiempo efectivo de la inmersión en el medio fué de 5, 20 y 25 días, siendo este el tiempo en que aparecieron las primeras grietas por ser un método lento de ataque corrosivo. Hay muestras que pueden durar más tiempo antes de sufrir agrietamiento.

En las siguientes fotografías números 3 y 4 se muestra una manera general (aleación de aluminio 2062 y 6063), las superficies sin ataque corrosivo o sea antes de la exposición y en las fotografías números 5,6,7 y 8, el agrietamiento de las probetas después de haber estado en el medio corrosivo: las fotografías fueron tomadas en el microscopio que se encuentra en el laboratorio de Pruebas Mecánicas de esta Facultad. Todas las probetas mostraban pequeñas grietas y picaduras.

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 resultados que se muestran más adelante.

Posteriormente se muestran las fotografías números 8,9,10- y 11 obtenidas por observación metalográfica de las probetas corróidas con el objeto de observar el tipo de agrietamiento presentado.

ALEACIONES DE ALUMINIO 2062



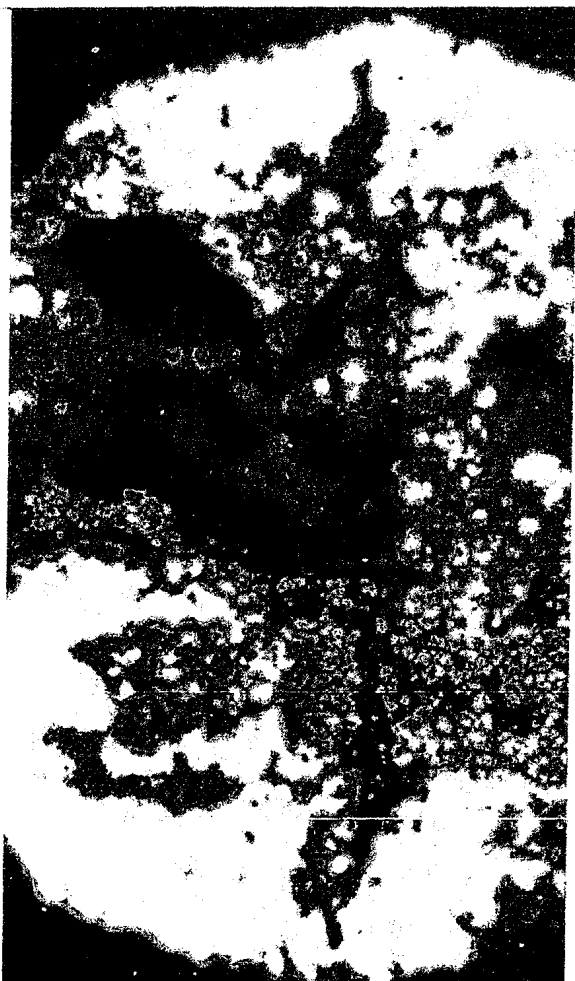
FOTOGRAFIA No. 3 Vista Macroscópica de la superficie de las -
probetas antes de la exposición al medio corrosivo Aumentos =8X)

FOTOGRAFIA No. 4

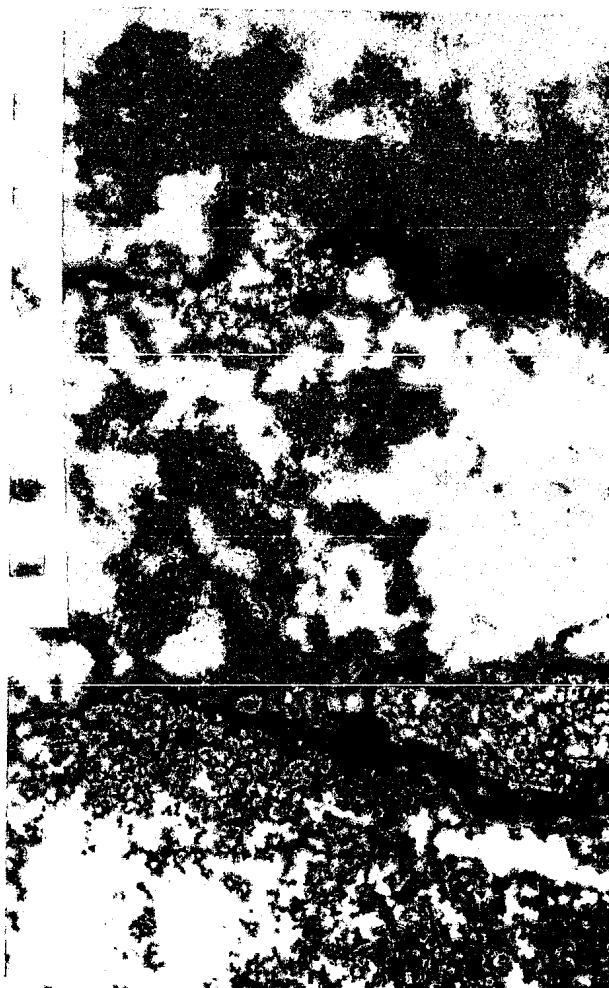
Vista Macroscópica La-
teral de las probetas
antes de la exposición
al medio corrosivo
(Aumentos = 8X)



ALEACIONES DE ALUMINIO 2062

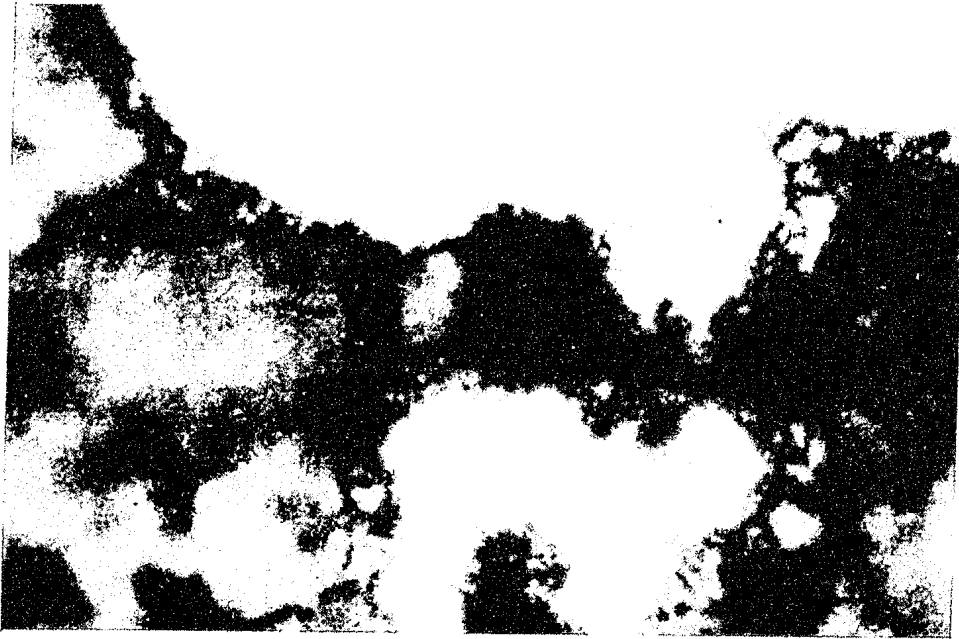


FOTOGRAFIA No. 5 Vista macroscópica de la Superficie después de la inmersión (Aumentos= 16X)



FOTOGRAFIA No. 6 Vista Macroscópica de la superficie agrietada en la dirección del laminado (Aumentos = 16X) después de la exposición.

ALEACIONES DE ALUMINIO 2062 y 6063



FOTOGRAFIA No. 7 Vista macroscópica general en la superficie - después de la inmersión de una aleación 6063 (Aumentos = 16X)



FOTOGRAFIA No. 8 Vista-
macroscópica general en la su-
perficie después de la inmersión
de una aleación 2062 (Aumentos
= 16 X)

Cálculos de:

- 1).- Velocidad de corrosión en "mdd" (miligramos/dm² x día)
- 2).- Profundidad de ataque (penetración) en mpy (milipulgadas por/año) y en "cpa" (Centímetros/año).
- 3).- Tiempo teórico de duración de la prueba (horas)

Las probetas tienen un área de 0.1925 dm²

Densidad del material = 2.697 gr/cm³

PROBETA No. 1

ALEACION DE ALUMINIO 2062

Peso antes de la inmersión = 27.615 gr

Peso después de la inmersión = 27.58 gr.

Pérdida de peso = 27.615 - 27.58 = 35.0 miligramos

mdd = 35/0.1925 x 24

mdd = 7.5757

mpy = mdd x 1.44/Dens = 7.57 x 1.44 / 2.697

mpy = 4.052

cpa = mdd x 0.00365 /Dens. = 7.57 x 0.00365/2.697

cpa = .0.0102

Tiempo Teórico = 2000/mpy = 2000/4.052

t = 493.58

PROBETA No. 2

ALEACION DE ALUMINIO (2062)

Peso antes de la Inmersión = 27.72

Peso después de la Inmersión = 27.61

Pérdida de peso = 27.72 - 27.61 = 110 miligramos

Duración en exposición - 20 días

$$\text{mdd} = 110/0.1925 \times 20$$

$$\text{mdd} = 28.5714$$

$$\text{mpy} = 28.5714 \times 1.44/2.697$$

$$\text{mpy} = 15.2550$$

$$\text{cpa} = 28.5714 \times 0.00365/2.697$$

$$\text{cpa} = 0.0386$$

$$\text{Tiempo Teórico} = 2000/15.2550$$

$$t = 131.10$$

PROBETA No. 3

ALEACION DE ALUMINIO (6063)

Peso antes de la Inmersión = 26.8920

Peso después de la Inmersión = 25.6410

Pérdida de peso = 26.8920 - 25.6410 = 1252 miligramos

Duración de la inmersión = 6 días

$$\text{mdd} = 1252/0.1925 \times 6$$

$$\text{mdd} = 1083.98$$

$$\text{mpy} = 1083.98 \times 1.44/2.697$$

$$\text{mpy} = 578.7657$$

$$\text{cpa} = 1083.98 \times 0.00365/2.697$$

$$\text{cpa} = 1.4670$$

$$\text{Tiempo Teórico} = 2000/578.7657$$

$$t = 3.456$$

PROBETA No. 4

ALEACION DE ALUMINIO (2062)

$$\text{Peso antes de la Inmersión} = 27.8653$$

$$\text{Peso después de la Inmersión} = 27.5937$$

$$\text{Pérdida de peso} = 27.8653 - 27.5937 = 272.6 \text{ miligramos}$$

$$\text{Duración de la Inmersión} = 5 \text{ días}$$

$$\text{mdd} = 271.6/0.1925 \times 5$$

$$\text{mdd} = 282.182$$

$$\text{mpy} = 282.182 \times 1.44/2.697$$

$$\text{mpy} = 150.6644$$

$$\text{cpa} = 282.182 \times 0.00365/2.697$$

$$\text{cpa} = 0.3818$$

$$\text{Tiempo Teórico} = 2000/150.664$$

$$t = 13.27$$

RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CBT DE INMERSION TOTAL Y
ALterna DE LAS ALEACIONES 2062 y 6063

PROBETA N°	TIPO DE MATERIAL	PERDIDA DE PESO(mg)	M. D. D.	M. P. Y.	C. P. A.	TIEMPO (h)
1	2062	35	7.5757	4.052	0.0102	493.58
2	2062	110	28.5714	15.2550	0.0386	131.10
3	6063	1252	1083.98	578.765	1.4670	3.456
4	2062	271.6	282.182	150.66	0.3818	13.27

DISCUSION DE RESULTADOS

De los cálculos presentados y de la tabla de resultados se puede hacer una comparación entre los dos tipos de aleaciones de aluminio ensayadas.

Como se puede observar, de la comparación de los resultados entre la probeta 1 y 2 se encuentra que al variar la formulación del medio corrosivo con un mililitro de agua oxigenada y 2.2% de cloruro de sodio, la corrosión es más rápida y existe una pérdida de peso mayor. La penetración de la corrosión, se incrementó a través de las picaduras rompiendo la película de óxido que se forma en la superficie del material.

En general, aunque en la aleación 2062 el agrietamiento resultó ser mayor en la dirección del laminado aunque también existió en la dirección transversal. Es recomendable hacer más ensayos en la aleación 6063 para contar con otra serie de resultados y hacer comparaciones con los ya obtenidos, modificando condición microestructural, medio corrosivo, temperatura, etc., a fin de tener más información acerca del comportamiento de esta aleación (de amplio uso) en relación con la CBT.

De las observaciones metalográficas presentadas en las fotografías anteriores podemos decir que el tipo de grietas observadas es intergranular y transgranular aunque se presenta un buen número de grietas transgranulares.

Se puede decir que es general la corrosión de la aleación 6063 es más acelerada (en función de la velocidad de corrosión calculada) y que esta se manifiesta principalmente como corrosión por picadura, y que en resistencia la corrosión bajo tensión es muy elevada.

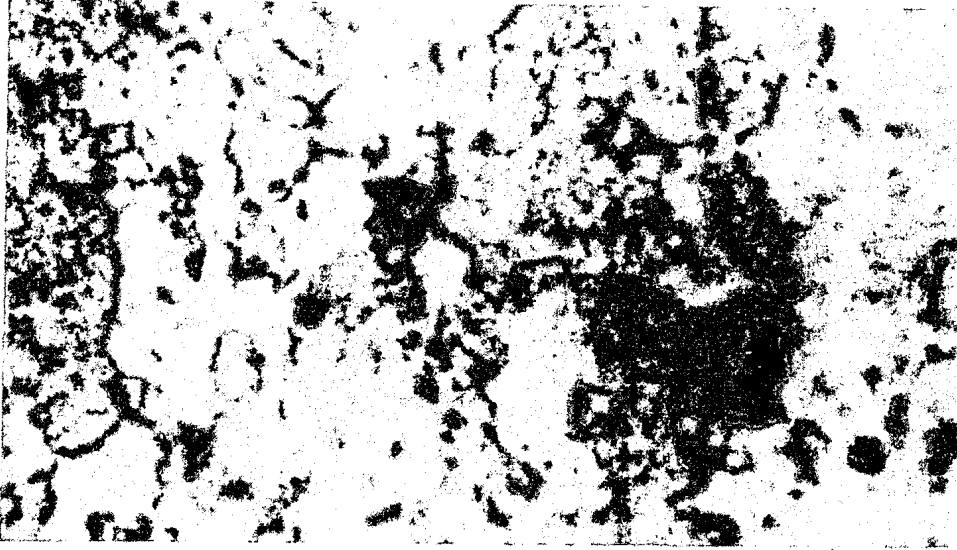
Cabe aclarar que en esta aleación (al cabo de 120 hrs.) se observaron pequeñas grietas que nacen de los orificios provocados por picaduras.

El tiempo de ensayo prolongado revela, en principio que -- aún en el caso de la aleación 2062 más susceptible a CBT; que -- la susceptibilidad de las aleaciones en los medios estudiados -- es bastante baja.

Como observación podemos hacer una comparación de las aleaciones de aluminio ensayadas (2062 y 6063) en diferentes medios corrosivos, como se observó que en la 6063 los orificios se iniciaron principalmente a partir de picaduras que fué el principal tipo de corrosión que ocurrió, en esta aleación se tuvo el problema de la corrosión galvánica debido a la diferencia del material en el medio corrosivo, en cuyo caso el tornillo tensador no era de la misma aleación.

EXAMEN METALOGRAFICO

TIPO DE AGRIETAMIENTO PRESENTADO EN LAS ALEACIONES DE ALUMINIO 2062 y 6063



FOTOGRAFIA No. 9. MICRO ESTRUCTURA PRESENTADA EN LAS ALEACIONES 2062 (SIN ATAQUE CORROSIVO) AUMENTOS = 80X



FOTOGRAFIA No. 10 GRIETA PRINCIPAL TRANSGRANULAR (T) Y OTRAS PEQUEÑAS INTERGRANULARES ALEACION 6063 AUMENTOS 80X



FOTOGRAFIA No. 11 GRIETA PREDOMINANTEMENTE TRANSGRANU-
LAR PRESENTADA EN LAS ALEACIONES 6063
AUMENTOS = 16 X

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

- a).- Teniendo en cuenta que las aleaciones de aluminio serie 2000 y 6000 ofrecen una alta resistencia a la corrosión, en este trabajo se presenta que las aleaciones de aluminio 2062 y 6063 son, en término medio susceptibles a la corrosión cuando estos se encuentran sometidos a esfuerzos y en medios que tengan cloruro de Sodio y Agua Oxigenada.
- b).- Observando las fotografías y los cálculos realizados sobre estas aleaciones, se puede decir que la aleación 2062 es más susceptible a la corrosión por esfuerzo como lo revela el hecho de una mayor velocidad de corrosión mayor penetración y tiempo medio de prueba.
- c).- Los resultados obtenidos mediante microscopia óptica, concluimos con respecto a lo expuesto en la parte teórica, el tipo de agrietamiento es tanto transgranular como intergranular, ya sea a partir de picaduras o de grieta formada de otra manera o forma.
- d).- De los resultados encontrados se puede decir que para disminuir la corrosión de este tipo de aleaciones hay que evitar hasta donde sea

posible que estos se encuentran sometidos a esfuerzos cuando estén en servicio con medios que contengan iones cloruro.

e).- La utilidad de este tipo de pruebas, sirven como primera instancia para que junto con otros datos y estudios complementarios hacen una elección del material y/o para prevenir posibles fracturas.

Es por esta razón que siempre se recomienda tratar de predecir el comportamiento de cualquier material de aleación de aluminio, en un medio determinado, mediante el uso de un ensayo de CBT mediante una prueba de inmersión total e inmersión alterna, tratando de reproducir al máximo las condiciones de trabajo y así poder elegir el tipo de aleación que ofrezca las mayores ventajas.

f).- Este tipo de pruebas realizado puede ser de utilidad didáctica para introducir a las personas interesadas el fenómeno de C.B.T. Aunque es una prueba de un tiempo medio de un proceso fácil de realizar.

g).- Se sugiere que para un estudio posterior sobre este tema se hagan pruebas con otras concentraciones de cloruro de sodio y aplicando temperatura así como aplicación de esfuerzos por métodos diferentes.

BIBLIOGRAFIA

- | | |
|---|---|
| Mars G. Fontana | Corrosión Engineering
2a. Edición
Internacional Student Edition
Mc Graw - Hill |
| Nace | Nace Basic Corrosion course
Publicado por Nace
4ta. Edición 1973 |
| Logan Hugh L.
F.A. Champion | The Stress Corrosion of Metals
Ensayos de Corrosión |
| ASTM | ASTM Standars
Designación G 44 - 75
Designacion G-36 - 72 |
| Revista Metallurgical
Transactions A | Volumen 6A, April 1975-635 |
| M.O. Speedel And M.V.
Hy ATT: | Advances in corrosion Science
and Technology, Vol. 2 |
| R.H. Brown, D.O. Sprowls,
and M.B. Schumaker | Stress Corrosion Cracking
of Metals - Astate of the Art.
Philadelphia 1972 |