

DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA – FACULTAD DE  
INGENIERÍA



**CATEDRA**

**MATERIALES II**

***CORROSIÓN***

Profesor Titular: Ing. Aer. Dawid Gomplewicz  
Profesor Adjunto: Ing. Aer. Claudio Rimoldi  
Colaborador: Sr. Fernando Cordisco

**CORROSION****Definición**

Definiremos a la corrosión cómo la degradación química o electroquímica de un elemento con el ambiente. Siendo solo característica de los metales.

**Causas de la corrosión**

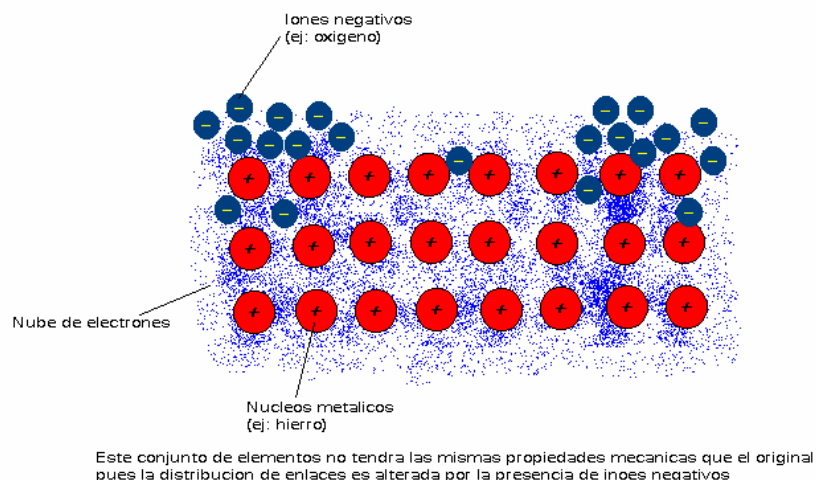
La corrosión causa severos daños a los metales. Afecta a todos en mayor o en menor medida. Por ello es necesario comprenderla, para poder controlarla y reducir los daños producidos en la mayor medida posible.

En la corrosión, como en la mayoría de las reacciones químicas, la electronegatividad de cada elemento cumple un papel muy importante.

Recordemos que un metal es un conjunto de enlaces metálicos que forma una gran molécula (Teoría del Gas de electrones) en la cual cada átomo metálico tendrá cierta electronegatividad. Los elementos más electronegativos tienden a ganar electrones reduciéndose y los de menor electronegatividad entregan electrones oxidándose y corroyéndose.

Esta reacción corrosiva no solo se presenta entre metales con metales sino también entre metales y no metales, siendo estos últimos elementos de elevada electronegatividad en relación a los primeros.

Así, al combinarse químicamente los elementos (Metal – Metal y Metal – No Metal) mediante la reacción de sus electrones de valencia se forman compuestos (enlaces Metálicos + ionicos + covalentes) que serán más nobles que sus predecesores. Estos elementos son más estables en la naturaleza pues no tienden a reaccionar químicamente.



De esta forma podemos decir que los metales al ser analizados en función de la corrosión se comportan como elementos metaestables.

Ejemplos como los metales nobles (oro, plata, etc.) son casos excepcionales en los que su baja energía (poca inestabilidad) les confiere una resistencia prácticamente ideal a la corrosión. Lamentablemente estos materiales carecen de buenas propiedades mecánicas (exceptuando la maleabilidad).

**Nota:** Es interesante saber que los metales se encuentran en la naturaleza en forma de minerales (Bauxita: Aluminio, Cromita: Cromo, Ferrita: Hierro, etc.) y para ser obtenidos en su forma refinada deben pasar por diversos tratamientos en los cuales mediante la entrega de energía se los lleva del estado mineral al estado utilizado en la industria. Al entregarles energía estos pierden su estado de equilibrio natural y tienden por ejemplo mediante la corrosión a volver a su estado natural (de menor energía).

## **NATURALEZA DE LA CORROSION**

La corrosión puede presentarse de diferentes formas en la naturaleza. En todos los casos termina por la deterioración o destrucción del metal y puede ser caracterizada de las siguientes tres formas:

- Metal – Líquido
- Metal – Gas
- Metal – Metal

Cada caso puede ser modelizado en forma diferente.

### **Metal – Líquido**

Como ya se enunció, cada elemento posee una electronegatividad diferente. Ésta le otorga un cierto potencial electroquímico (también conocido como FEM) que dependerá de la solución (electrolito) en el que se encuentra inmerso (esto es por razones que no citaremos aquí) [3].

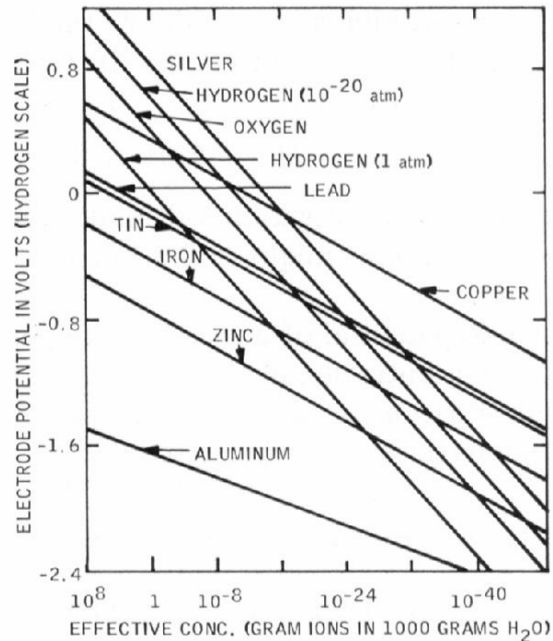
A continuación se presenta una tabla válida para electrolitos de elevada concentración en la cual se toma como referencia un electrodo de hidrogeno para medir la diferencia de potencial.

TABLE 4.2. ELECTROMOTIVE FORCE SERIES

Element, <i>m</i>	Electrode reaction	Standard electrode potential, $E_m^0$ volts, 25° C
Gold	$Au = Au^+ + e$	1.68
Platinum	$Pt = Pt^{++} + 2e$	1.2
Palladium	$Pd = Pd^{++} + 2e$	0.83
Silver	$Ag = Ag^+ + e$	0.800
Copper	$Cu = Cu^+ + e$	0.522
Copper	$Cu = Cu^{++} + 2e$	0.345
Hydrogen	$H_2 = 2H^+ + 2e$	0.000
Lead	$Pb = Pb^{++} + 2e$	-0.126
Tin	$Sn = Sn^{++} + 2e$	-0.136
Nickel	$Ni = Ni^{++} + 2e$	-0.250
Cadmium	$Cd = Cd^{++} + 2e$	-0.402
Iron	$Fe = Fe^{++} + 2e$	-0.440
Chromium	$Cr = Cr^{+++} + 3e$	-0.71
Zinc	$Zn = Zn^{++} + 2e$	-0.762
Aluminum	$Al = Al^{+++} + 3e$	-0.67
Magnesium	$Mg = Mg^{++} + 2e$	-2.34
Sodium	$Na = Na^+ + e$	-2.712
Potassium	$K = K^+ + e$	-2.922

Tabla 1 (FEM)

Por otra parte es importante saber que para casos muy específicos la posición de ciertos elementos en la tabla puede verse alterada por la disminución de la concentración del electrolito:



Effect of concentration of metal ions on electrode potential.

Tabla 2

Sin embargo haremos nuestros análisis en base a la Tabla 1. Puede observarse allí como a medida que disminuye el potencial el elemento va pasando de un estado anódico a uno más catódico.

Así como la corrosión electroquímica nos permite generar energía eléctrica (pilas, baterías, etc.) por otro lado genera miles de millones de dólares en pérdidas mundiales debido a su efecto destructivo en los metales.

Dentro de este tipo de corrosión podemos distinguir diferentes tipos de celdas electroquímicas. Nosotros analizaremos solo las más importantes y comunes que son las celdas galvánicas y las celdas de concentración. Otro tipo de celdas como por ejemplo: diferencias de temperatura, celdas por diferencias de batido, etc. Pueden encontrarse en la bibliografía citada.

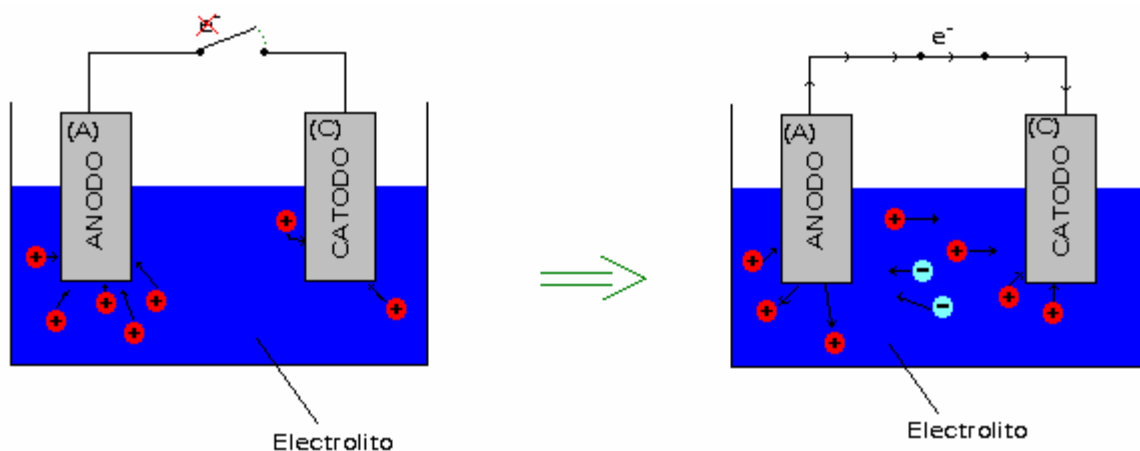
### Celdas galvánicas

Una combinación de dos tipos diferentes de conductores eléctricos (metales) sumergidos en un mismo electrolito se conoce como celda galvánica en honor a Luigi Galvani, físico italiano que publicó sus estudios de la acción electroquímica en 1791.

A los conductores eléctricos se los conoce como electrodos. El de menor FEM será el ánodo y el de mayor FEM el cátodo.

En el cátodo se producirán reacciones de reducción, mientras que en el ánodo se producirán reacciones de oxidación y será éste el que se corroe.

Modelo.



**Fig. 1**

Como puede observarse en la **Fig.1**, la corrosión se producirá si y solo si el circuito es cerrado. En caso contrario la corrosión no se producirá excepto por impurezas en el electrolito o en el ánodo (que analizado, genera una celda galvánica). La tasa de corrosión se verá influenciada *solo* por la corriente (densidad de corriente, **J**) y en consecuencia será

dependiente del área en contacto entre el electrolito (conducción de iones) y el conductor (conducción de electrones), es decir será función de la superficie del electrodo.

$$J = \frac{I}{A} = \frac{Q}{A \cdot t} \quad Q : \text{carga}, \quad t : \text{tiempo}$$

A mayor J, mayor tasa de corrosión.

Ejemplo:

Supongamos una chapa de aluminio que contiene impurezas de cromo en sus superficie como muestra la Fig. 2:

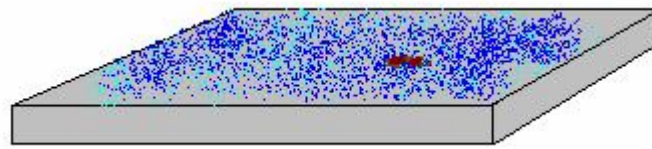


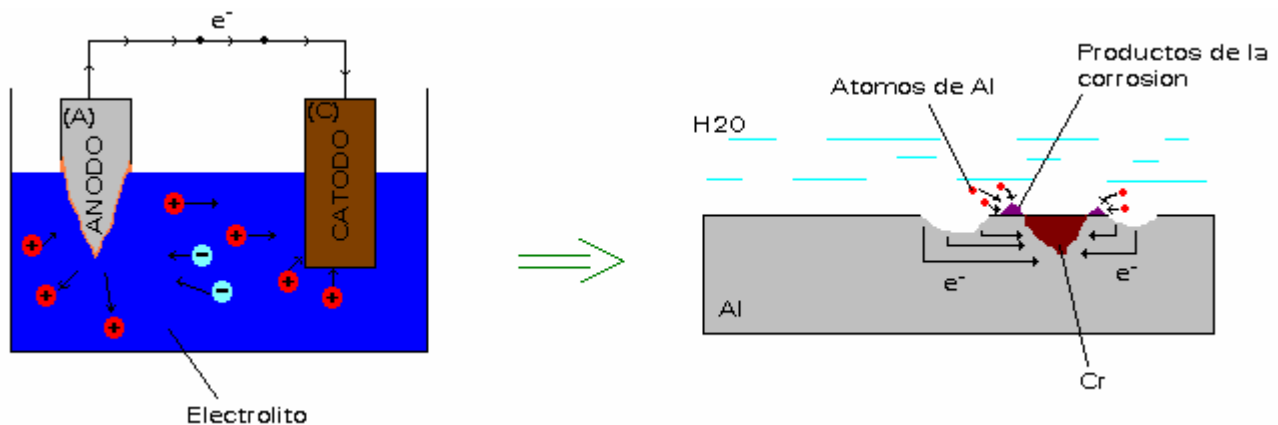
Fig. 2

Supongamos también que el ambiente se encuentra con una humedad relativa del 80%.

Entonces, debido a la elevada humedad puede formarse sobre la superficie del metal una delgada capa de agua.

El agua actuará como electrolito. Analizando la **tabla 1**, encontramos que el aluminio se comporta como ánodo mientras que el cromo actúa como cátodo. El medio de conducción de electrones está dado por el contacto entre el cromo y el aluminio.

En consecuencia podemos modelizar la situación como sigue:



Esta pequeña segregación de cromo provocará el picado del aluminio en sus alrededores. Este picado se transformará en un pequeño concentrador de tensiones que en conjunto con la corrosión y tensión puede provocar una falla conocida como corrosión por fatiga que analizaremos luego.

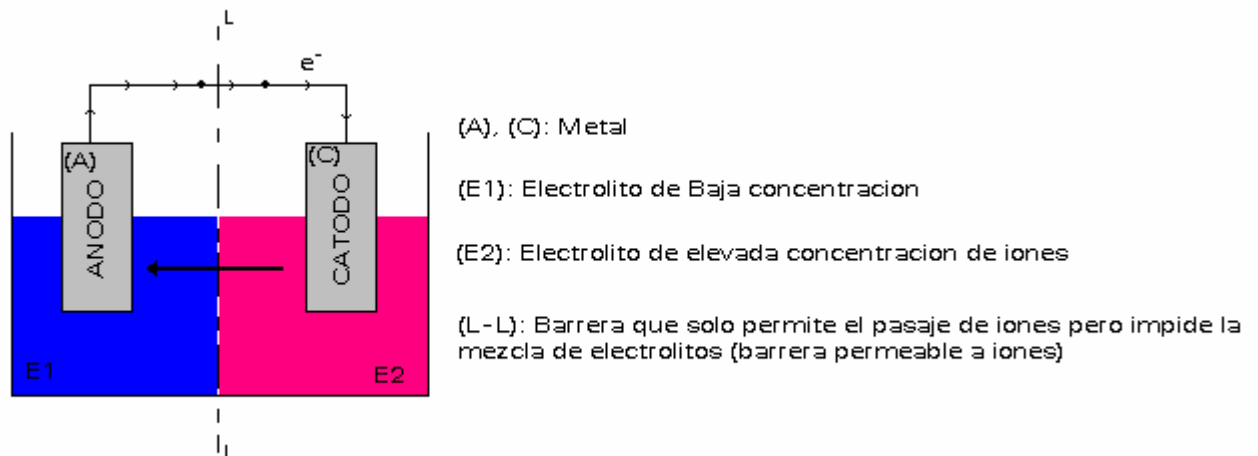
Debe tenerse presente este tipo de factores cuando la aeronave se encuentra en regiones muy húmedas.

### Celdas de concentración

Hablamos de “Celdas de concentración” cuando la diferencia de potencial viene dada por la diferencia de concentración o de composición en los electrolitos y **no** por diferencia en los electrodos.

Entonces, podemos definir “Corrosión por celdas de concentración” a la corrosión que se presenta cuando los electrolitos en contacto son diferentes y el metal es el mismo.

Modelemos el caso de la siguiente manera (**Fig. 4**),



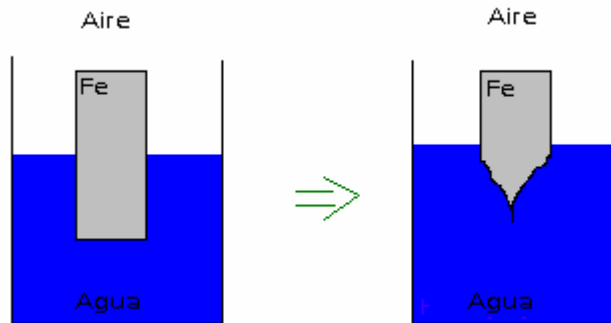
**Fig. 4**

La región que contenga al electrolito de elevada concentración se comportará como catódica y por lo tanto el metal que se encuentre allí no será afectado por la corrosión, mientras que la región de baja concentración será anódica y el metal allí se corroerá.

Esto es consecuencia del flujo eléctrico que se establece debido a la diferencia de concentración de iones. Los iones en el electrolito de elevada concentración tienden a desplazarse hacia el de baja concentración (por equilibrio). Este flujo de iones (corriente) inducirá el flujo de electrones en sentido opuesto para lograr el equilibrio eléctrico. Consecuentemente el metal que desprende electrones se corroerá impidiendo que la celda llegue al equilibrio y cerrando así el ciclo de corrosión.

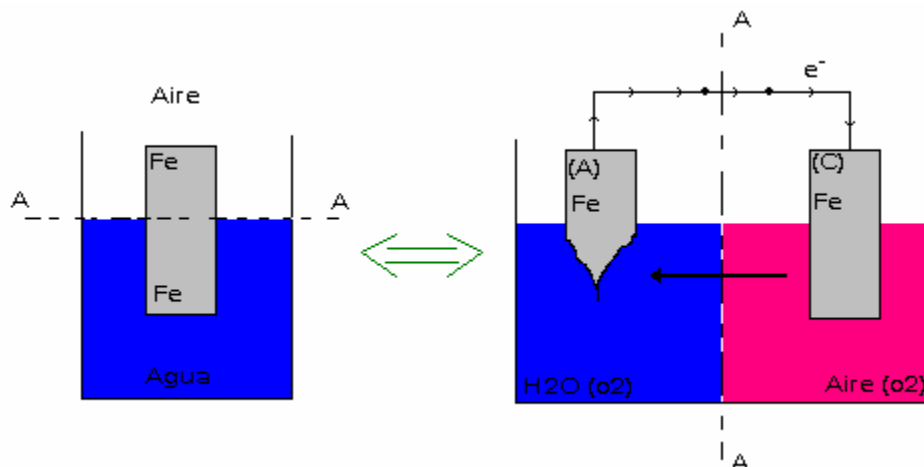
Un ejemplo en el que se ve claramente la barrera L-L es un tipo de corrosión que se conoce como “Corrosión por Línea de Agua”.

Dado un metal (hierro) que se encuentre parcialmente en agua y parcialmente en aire, véase **fig. 5(izq.)**. Al cabo de un tiempo determinado encontraremos que el Fe se encuentra bajo los efectos de la corrosión como se muestra en la **fig. 5 (derecha)**.



**Fig. 5**

La situación puede explicarse de la siguiente forma: Debido a que hay presente un único metal y dos electrolitos será un caso de corrosión por celdas de concentración, que puede ser representado por el modelo de la figura 6:



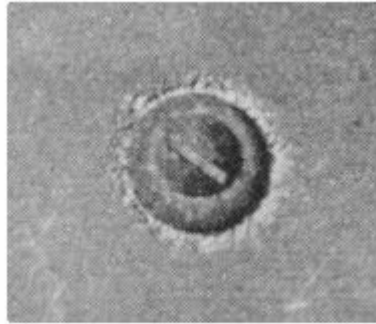
**Fig. 6**

Tomando al aire y al agua como electrolitos teniendo ambos en común el ion  $O_2$  (ion de elevada electronegatividad). Si se realiza el análisis correspondiente se encuentra que en el agua habrá menor concentración de iones de oxígeno que en el aire. La línea A-A (interface Aire – Agua) actuara como la barrera L-L de la **Fig. 4**. Mientras que el propio metal actuara como conductor de electrones.

Entonces si seccionamos al metal mediante la línea A-A y los ubicamos como muestra la **Fig. 6** tendremos establecida una celda de concentración en la que el metal sumergido se corroerá, explicando la situación inicial.



Este tipo de corrosión electroquímica (celdas de concentración) es muy común en cambios de sección (esquinas). Cualquier tipo de enlace de metales genera corrosión localizada (peligrosa y no siempre detectable en forma sencilla), caracterizada por pequeños agujeros (pits) en el material que actúan como concentradores de tensiones y que ponen en riesgo el correcto funcionamiento de la pieza. Otro ejemplo se muestra en la figura 7.



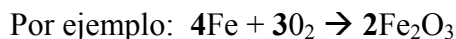
**Fig 7. Galvanic Corrosion**

Dentro de las diversas formas en que puede presentarse, puede clasificarse y encontrarse en la bibliografía como Celdas Metal – Ion, Diferencia de aireación y celdas pasivas activas.

### **Metal – Gas**

En la reacción entre el metal y un medio gaseoso las moléculas de gas son absorbidas sobre la superficie del metal mediante la reacción de los átomos del metal y el gas formando productos de corrosión (ver **fig. 1**.)

Usualmente debido a la electronegatividad de los “no metales” generalmente presentes en forma gaseosa en el medio ambiente, la corrosión Metal – Gas puede ser expresada químicamente como:



Dependiendo del metal el no metal y el medio (Temperatura, humedad, etc.) la tasa de corrosión puede variar. Por ejemplo, el aluminio en aire es muy activo y la corrosión actúa rápidamente sobre la superficie.

### **Pasividad**

Es conveniente dar, en este momento, una breve introducción al estudio del pasivado de metales.

Todo efecto corrosivo, ya sea si el material está expuesto a un medio líquido o gaseoso, formará una capa o película con los productos de la corrosión sobre la superficie del metal (recordando que estos últimos son más estables que el metal puro).

Esta película o “escama” puede ser continua y protectora o bien contener grietas (cracks) y poros y ser relativamente “no-protectora”.

Debido a que la naturaleza de los productos de la reacción es usualmente muy frágil, la iniciación de las grietas dependerá en cierta medida de si la película es formada bajo un estado tensional de tracción que favorece la fractura o bajo un estado de compresión.

Si el estado tensional es de compresión se evitarán los poros y la formación de grietas generando una película continua y protectora. En caso contrario la película no será protectora o lo protegerá levemente.

La compresión o tracción de la lámina dependerá del volumen de los productos de corrosión en relación a los reactivos. Si los productos ocupan más volumen que los reactivos entonces la lámina estará sometida a compresión.

Luego, conociendo el volumen molar y la densidad del metal, podemos obtener la siguiente relación:

$$\frac{M_c}{\rho_c} > \frac{M_m}{\rho_m} \quad (1)$$

Condición que determina la formación de la capa protectora donde el sufijo “c” representa los productos de corrosión y “m” a los reactivos.

**Nota:** Otra relación más general que (1) es:

$$\frac{M \cdot d}{n \cdot m \cdot D} > 1$$

m: peso molecular de los productos de corrosión

D: densidad de los productos de corrosión

M: peso atómico del metal

.d: densidad del metal

n: número de átomos del metal en su forma molecular (ej  $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow n=2$ )

El cálculo del espesor de la capa de productos corrosivos (película) en función del tiempo nos dará la tasa de corrosión en el metal.

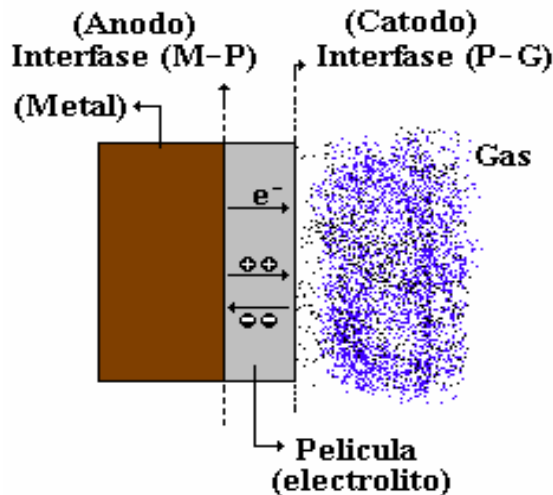
Para el caso particular de la corrosión Metal-Gas se puede hacer el siguiente análisis:

Cuando la capa no es protectora permite el constante contacto directo entre el gas y la superficie metálica y por lo tanto la reacción química procederá de forma constante. A esta forma de corrosión se la conoce como Ataque Químico Directo siendo la acción electroquímica poco importante. Luego el espesor de la película será:

$$x = C_1 t \quad \text{donde } C_1 \text{ es una cte. que depende del material}$$

x : espesor

Por otra parte cuando una capa no porosa y adherente es formada, la corrosión sólo progresara por difusión. Nótese que la corrosión puede ser retrasada pero es inevitable. En éste caso tendremos una acción electroquímica donde la película y la interface Metal - Película y Metal - gas conforman una celda galvánica como la representada a continuación.

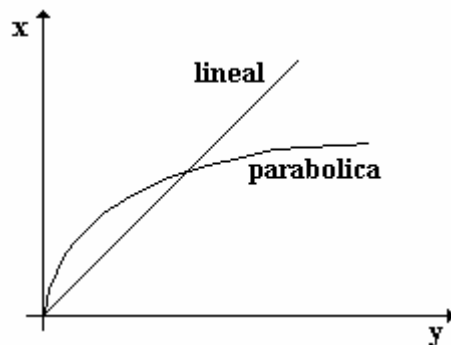


La interface Metal - película actúa como ánodo mientras que la interface película - gas como cátodo (recibe e<sup>-</sup>). A su vez la película actuará como circuito externo conduciendo electrones.

Vale aclarar que para los iones gaseosos por ser más grandes que los metálicos (debido a la mayor cantidad de electrones) la difusión es muy lenta y prácticamente despreciable. Como consecuencia, las reacciones predominantes se generan entre la interface película - gas o en la superficie de la película.

La tasa de crecimiento de la película puede ser calculada en términos del flujo de corriente y el incremento de las resistencia con el espesor <sup>(\*2)</sup>. Obteniéndose una ley parabólica:

$$x^2 = C_2 t \quad \text{donde } C_2 \text{ es constante y "x" el espesor}$$



(\*2) :Para una resolución completa ver “Richards Pag. 491” o “Corrosión and Corrosión control” Hebert Uhlig pag. 156 (escapa a los alcances del tema)”.

### **Metal – Metal**

Recordemos que los sólidos no presentan una superficie idealmente lisa sino una superficie rugosa (o montañosa) que está determinada en forma relativa como coeficiente de roce.

Esta propiedad, que es la causa de fricción entre superficies, también es la causa fundamental de la corrosión por fricción (Fretting Corrosión) y del efecto de erosión de superficies. En ambos casos la corrosión del metal es consecuencia de la remoción de la película protectora (elemento sobre la superficie del metal que retarda la acción corrosiva) que como resultado incrementa la tasa corrosiva.

Podemos definir corrosión por fricción como el efecto que se produce en la interface de contacto de dos superficies (una o ambas metálicas) sujetas a un movimiento relativo entre ellas (slip).

Debe tenerse presente que el diseño de muchas piezas o mecanismos es tal que impide el movimiento relativo entre las superficies. Sin embargo puede existir un muy pequeño juego entre ambas que no afecte estructuralmente al sistema pero que en un corto o largo plazo pueda afectar la capa protectora de uno o ambos metales. Como consecuencia el metal quedará expuesto a un medio que probablemente lo degradará por acciones electroquímicas generadas ya sea por humedad, algún tipo de fluido o un medio gaseoso externo.

A esto último debe sumarse algún gradiente de temperatura que se generará en la interface debido a la misma acción de rozamiento, la cual aumenta la tasa de corrosión. Esto es consecuencia de la ley de Arrhenius:

Donde  $r$ , que es la tasa de reacción (química en este caso) aumentará con un aumento en la temperatura.

$$r = \text{Cte.} \times (\text{nro. de colisiones por seg}) \times e^{-Ea / KT}$$

La corrosión por fricción es frecuentemente causa de falla en: resortes de suspensión, cabeza de tornillos, dientes de los engranajes del sistema mecánico de dirección, rodamientos, hélices de paso variable, juntas, relays eléctricos, ejes de contacto, y cualquier parte de maquinaria vibratoria. Puede causar decoloración de laminas de metal apiladas en embarques.

Para evitar este tipo de fallas es conveniente tener presentes los siguientes cuatro puntos:

- 1) Tratar de combinar materiales de mayor dureza con otros menor dureza.  
( El material de menor dureza va a fluir por corte en vez de generar partículas de oxido)
- 2) Evitar el movimiento relativo entre ambas superficies en el diseño.  
(Esto es difícil de cumplir pues se cree que hasta el movimiento a nivel atómico puede comenzar con esto. Un aumento en la carga tal que evite el slip de las superficies es

recomendable si y solo si se asegura que el slip sea prevenido, en caso contrario la situación puede revertirse y causar mayor daño).

3) Uso de lubricantes.

(Esta es sin duda una de las mejores soluciones para este tipo de fallas cuando la carga no es tan elevada).

4) Uso de amortiguadores elásticos o materiales de bajo coeficiente de fricción.

(La goma absorbe el movimiento y por lo tanto evita el slip en la interface. Otro recubrimiento posible es el Polytetrafluorotethylene (Teflón) que debido a su bajo coeficiente de roce reduce el daño. Sin embargo debido a su pobre resistencia mecánica, materiales como ésta clase son solo utilizados a cargas moderadas.

## **FORMAS DE CORROSIÓN**

La corrosión se presenta de diversas formas, puede ser uniforme, por picado, localizada, etc. También aparecen combinadas entre sí, sin embargo usualmente una predomina. Por ello identificar el tipo de corrosión presente es muy valioso tanto para el campo de investigación y diseño como para el de mantenimiento, pues conocido el tipo de corrosión se comprenderá la causa y se buscará la forma de disminuir el ataque.

Podemos dividir la corrosión en seis grandes campos:

- Uniforme
- Localizada (Picado)
- Erosión (cavitación, erosión por corrosión, Fretting corrosión)
- Ataque selectivo (localizado)(ataque en las fases, ataque intergranular)
- Cracking (corrosión por tensión, corrosión por fatiga)
- Corrosión por temperaturas elevadas
- Corrosión galvánica

Algunas de ellas fueron analizadas como ejemplos en secciones anteriores, las restantes serán analizadas a continuación.

### **Uniforme**

El ataque por corrosión uniforme puede ser rápido o lento y puede dejar el metal limpio o cubierto sobre su superficie por productos de corrosión. Un ejemplo de lo ultimo es la oxidación de algunos metales que se encuentran en el aire y son sometidos a elevadas temperaturas (hornallas de la cocina). Casos en los que el metal expone una superficie limpia sucede en algunas soluciones ácidas donde los productos de la corrosión no se encuentran sobre el metal.

La corrosión por ataque uniforme se mide en pérdida de peso respecto el material original o mediante la reducción de espesor. Dentro de la forma de medida estándar puede clasificarse como miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd) así como en pulgadas por día (ipy)

Téngase presente que la corrosión es un factor dependiente del tiempo y el ataque puede aumentar con éste. Por lo tanto deben realizarse controles para determinar su progreso.

Es importante tener en cuenta que hay casos en los que la superficie del material se encuentra cubierta por productos de corrosión que si bien es un caso de corrosión uniforme, bajo esta capa *pueden haber o no* otros tipos de corrosión más críticos.

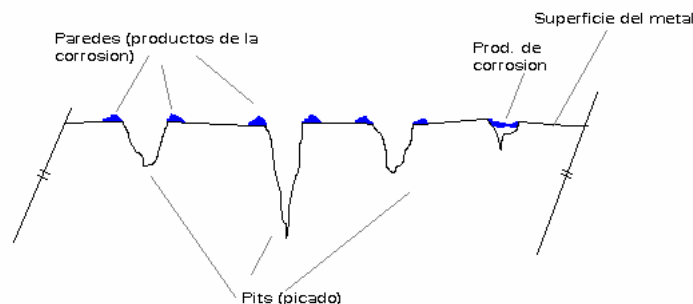
La corrosión uniforme puede presentarse tanto en corrosión metal – líquido como metal – gas.

### **Corrosión localizada**

Cuando la corrosión se encuentra localizada en áreas bien definidas y relativamente pequeñas comparadas con el total de la superficie hablamos de Corrosión Localizada. Ésta es generalmente caracterizada por picado.

### **Corrosión por picado (Pitting corrosion)**

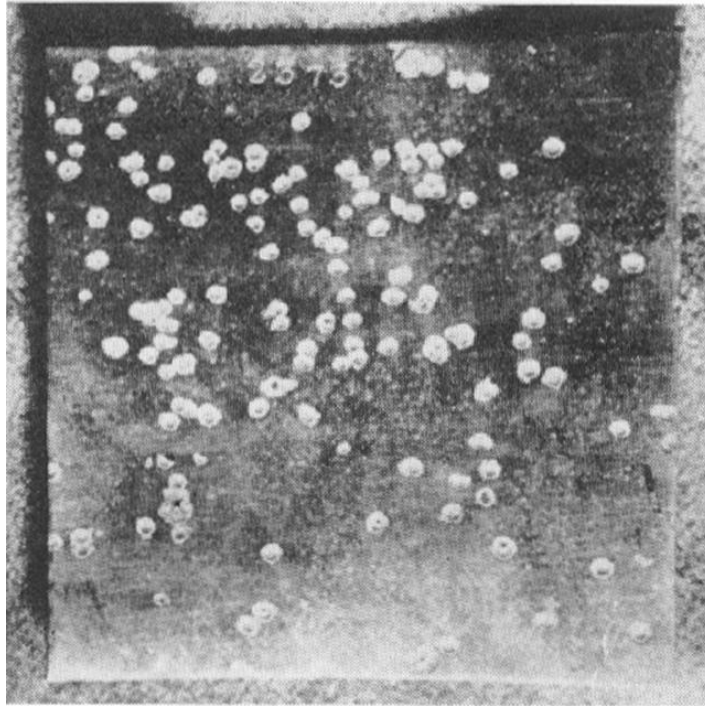
Cuando la superficie del metal se encuentra picada se la llama corrosión por picado. Un agujero (pit) puede distinguirse por un borde bien definido que encierra al perímetro del agujero. En general se encuentra alrededor del borde de éste una pequeña pared perpendicular a la superficie del metal consecuencia de los productos de corrosión. Ver **fig.9**



**Fig 9.**

Si bien los pits pueden tener un diámetro relativamente pequeño, su número, profundidad y tamaño pueden variar drásticamente. Como consecuencia en ciertos casos son difíciles de detectar y por lo tanto muy peligrosos. Por su forma actúan como fisuras en el material disminuyendo sus propiedades mecánicas y son fuente potencial de concentración de tensiones que pueden llevar a la falla por fatiga (fatiga por corrosión).

Si se analiza una superficie metálica que experimente este tipo de corrosión se encuentran zonas punteadas con irregularidades bien definidas. Ver **fig. 10**



**Fig 10.** Small pits distributed at random

El picado (pitting) puede ser medido mediante un micrómetro que tenga la adecuada forma o mediante un microscopio que esté calibrado para enfocar la superficie del pit y luego el fondo. Esto nos permite determinar la profundidad. O bien dentro de los Ensayos no destructivos si se desea cubrir grandes superficies puede utilizarse el método de Rayos x o gama, mientras que si desea hacerse un análisis más puntual puede usarse el método de Eddy Currents (o corrientes de Foucault).

En pitting corrosión la pérdida de peso no es una medida apreciable debido a la característica propia de este tipo de corrosión. El termino factor de picado (pitting factor) es usado para expresar el radio de profundidad del grupo de pits más profundos contra la penetración calculada en pérdida en peso (algunas veces se toma el promedio de los más profundos).

Usualmente la tasa de profundidad de picado disminuye con el tiempo.

Dentro de los factores que pueden generar ataque localizado o pitting podemos nombrar a las celdas de concentración, Erosión – Corrosión, inclusiones, imperfecciones, bordes de grano y dislocaciones.

### **Ataque selectivo**

Cuando un metal es procesado el material resultante no es perfectamente homogéneo sino que puede contener inclusiones, segregaciones, constituyentes indeseados en los bordes de grano, más de una fase y otras imperfecciones. Como la corrosión se ve influida muchas veces por la estructura interna del material, clasificamos a la corrosión debida a la imperfecciones de los materiales como *ataque selectivo*.

Teniendo esto presente, podemos decir que en el diseño un factor crítico es la selección del material pues dependerá del fabricante la calidad del producto final.

### Ataque debido a diferentes fases

Este tipo suele presentarse cuando dos o más fases están presentes en la microestructura de un cristal policristalino.

Las fases de un material pueden variar tanto en sus propiedades físicas como químicas, siendo la última consecuencia de la corrosión pues una fase puede presentar una FEM diferente que otra y por tanto una será corroída mientras la otra no.

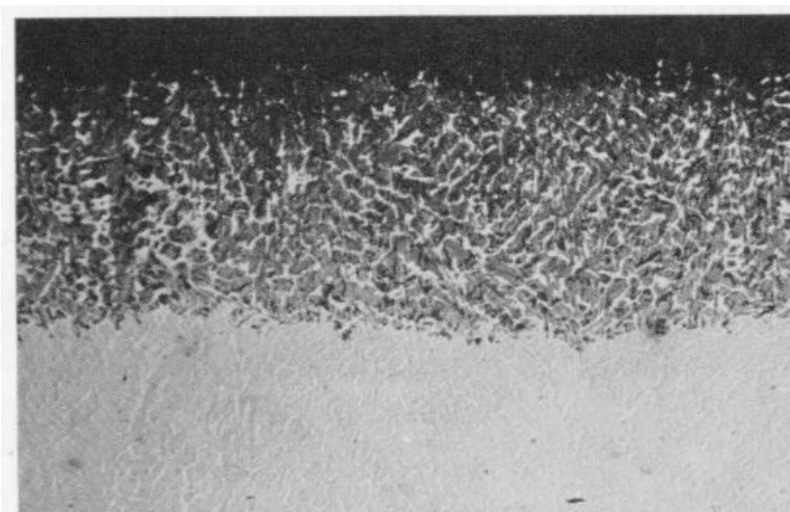
Este tipo de ataque puede ser muy peligroso, porque en apariencia puede presentarse como corrosión uniforme (superficial) pero en realidad presenta corrosión en su estructura interna. Luego, el material puede verse reducido en sus propiedades mecánicas quedando blando y débil. Ejemplificamos la situación de la siguiente forma:

La fundición gris presenta básicamente una microestructura formada por cristales de hierro rodeados por carburos de hierro como en la fig. 11.



**Fig 11.**

Como el carburo de hierro es más estable que el hierro, el primero se comportará como cátodo mientras que el último como ánodo. El cátodo permanecerá en su posición mientras que el ánodo será corroído y como el  $\text{Fe}_3\text{C}$  fija la posición de la martensita y la austenita el metal mantendrá su forma interna y externa pero sus propiedades mecánicas serán



**Fig12. Corrosion of 4.5 Ni-1.5 Cr alloy cast iron with the carbides unattacked (original magnification,  $\times 100$ ).**



totalmente diferentes, ver **fig. 12**.

Entonces cuando se presente un caso de corrosión uniforme se debe asegurar que solo sea superficial pues en caso contrario puede correrse el riesgo de la falla del material.

### Ataque intergranular

El ataque intergranular es un tipo de corrosión selectiva de los bordes de grano donde los cristales o granos permanecen sin un ataque apreciable. Es decir es el caso inverso al anterior.

Este tipo de ataque genera una disminución en la resistencia y ductilidad del metal siendo un serio problema de corrosión.

El mecanismo es debido a las diferencias de potencial entre los bordes de grano y el grano mismo. La fem puede verse influenciada durante el tratamiento térmico que genera precipitaciones en el borde de grano.

Esto ha de tenerse en cuenta a la hora de realizar soldaduras, pues es una indeseable forma de realizar un tratamiento térmico. Por lo tanto en los lugares propensos a la corrosión debe evitarse la soldadura.

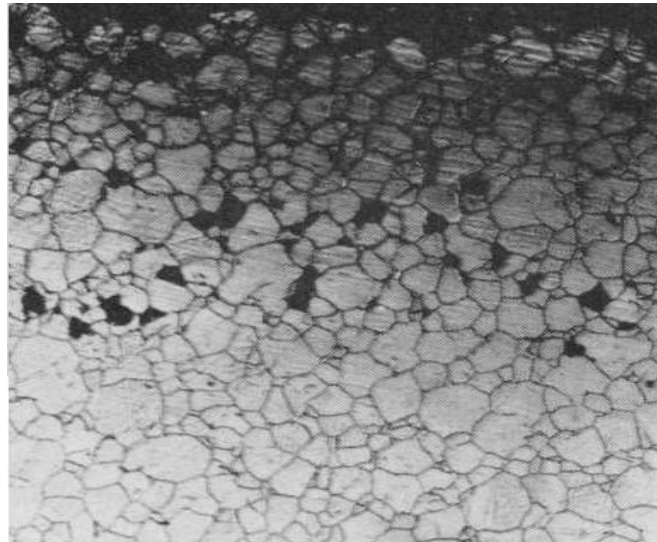
La única forma de eliminar el problema es seleccionar correctamente el material según el medio en que se encuentre inmerso (el ácido lo intensifica drásticamente) o bien luego de realizar la soldadura hacer un posterior tratamiento térmico con el fin de solucionar el problema.

En la **figura 13** puede verse una probeta con ataque intergranular a la que se le hizo una soldadura (nótese a la derecha la zona afectada como se marca la zona que sufre el ataque) Por ultimo vale aclarar que el ataque llega a una distancia finita de la soldadura y no se



**Fig 13.** Weld decay (original magnification,  $\times 50$ ).

extiende más. La **fig. 13b** presenta un material bajo corrosión intergranular.



**Fig 13b.** Intergranular attack  
(original magnification,  $\times 100$ ).

### Cracking

Hablamos de cracking cuando se combina el efecto de la tensión y el de la corrosión tal que culmina en la rotura de la probeta.

### Corrosión por tensión

Si se expone al material a un ambiente corrosivo y se lo solicita mediante algún estado tensional se encuentra que el proceso se ve acelerado respecto al estado original (sin tensión). A los casos en que la falla del material esta asociada a la corrosión y a la tensión se la conoce como *corrosión por tensión*.

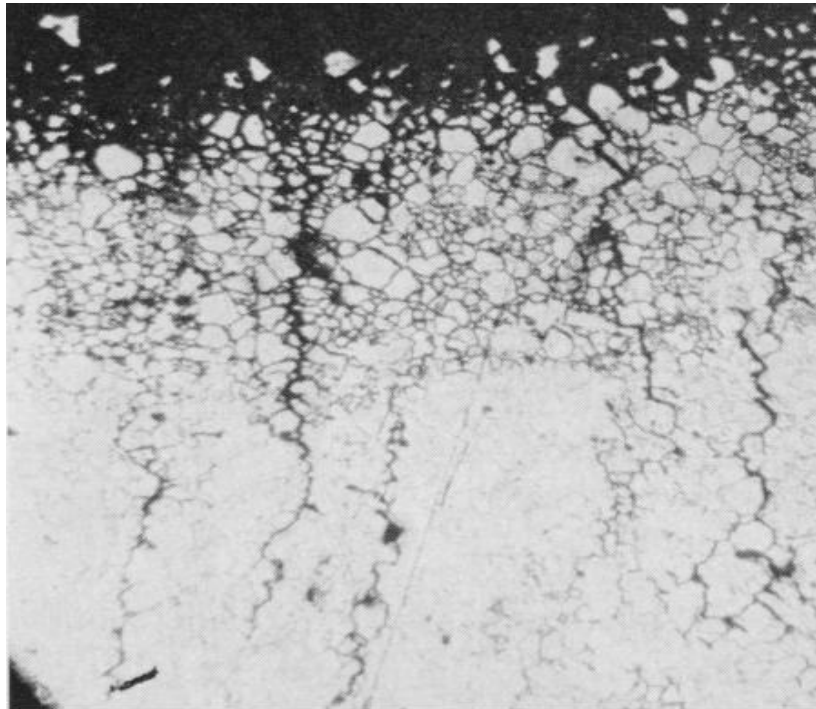
Como en general los metales puros *no* son susceptibles a la corrosión por tensión (en cualquier tipo de ambiente) las impurezas y los componentes de aleación son los elementos que afectan este tipo de falla.

Explicaremos la causa de este efecto mediante un ejemplo con Duraluminio ( 4% Cu-Al): Si se le hace al Duraluminio un tratamiento térmico a bajas temperaturas la microestructura queda formada por granos de cobre y en sus bordes precipita  $\text{CuAl}_2$ , componente que se comportará anódico con respecto al grano si se expone al metal a una solución de NaCl (electrolito). Se genera entonces una celda galvánica.

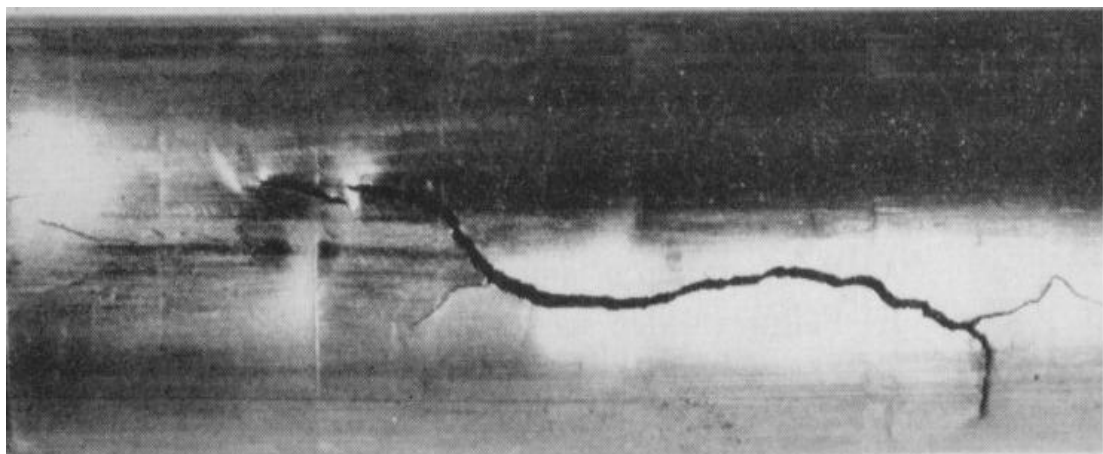
Si a su vez se lo somete a tracción, la tensión tenderá a separar los granos relativamente y permitirá que más electrolito esté en contactó con ambas fases. Por ser los bordes de grano los que se corroen, disminuirán sus propiedades mecánicas y comenzarán a deformarse plásticamente. De esta forma el material comienza a fisurarse a través de los bordes de grano y el proceso culmina en la fractura del metal.

Es decir, acabamos de presentar corrosión intergranular acelerada por el efecto de la tensión.

Pueden también presentarse casos de fallas transgranulares que son causa de imperfecciones tales como dislocaciones o impurezas en el grano que generan una diferencia de potencial. La tensión actúa deformando plásticamente las regiones corroídas y favoreciendo el deslizamiento de impurezas y dislocaciones tales que al acumularse generan una mayor diferencia de potencial (recuérdese que los planos favorecidos para la fractura son los planos que contienen impurezas).



**Fig 14.** Intergranular attack developing into stress-corrosion cracking (original magnification,  $\times 100$ )



**Fig 14bis.** Stress-corrosion cracking, intergranular (natural size).

Para evitar este tipo de fallas deben tenerse en cuenta:

- Si el metal trabaja en frío, fragilizará los componentes de la aleación y se incrementara la posibilidad de falla frágil.
- Debido al origen intergranular debe tenerse presente el tipo de tratamiento térmico a realizar.
- Evitar que el metal posea tensiones residuales de tracción. Si es necesario debe aplicarse la técnica de Shot Blasting que generará tensiones residuales de compresión en la superficie (pero por otro lado generara discontinuidades).
- Si es posible utilizar la técnica de protección catódica con la cual se reduce drásticamente la tasa de corrosión.

### Corrosión por fatiga

El daño producido por la acción conjunta de la corrosión y de la tensión cíclica en un metal se conoce como *corrosión por fatiga*, y fue mencionado por primera vez en 1917 por B. P. Haigh.

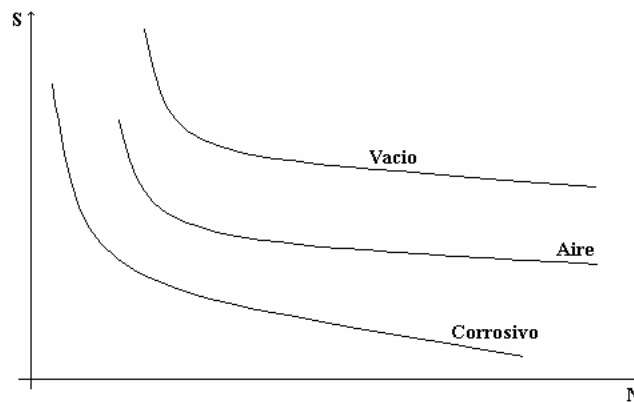
Si se realizan ensayos de fatiga en medios corrosivos se encuentra que el limite de fatiga se ve seriamente reducido respecto al de un medio no corrosivo. De echo, el aire es un medio corrosivo (debido a la humedad y los elementos presentes) y debe tenerse en cuenta a la hora de realizar el ensayo.

**TABLA 3**  
**Fatigue Limit and Corrosion Fatigue Strength of Various Metals (McAdam)**

Metal	Fatigue Limit (Air) psi	Corrosion Fatigue Strength, psi		Damage Ratio, Corros. Fatigue Strength/ Fatigue Limit	
		(10 <sup>7</sup> to 10 <sup>8</sup> cycles at 1450 cycles/min)			
		Well Water*	Salt Water†	Well Water	Salt Water
0.11% C steel, annealed	25,000	16,000		0.64	
0.16% C steel, quenched, drawn	35,000	20,000	7,000	0.57	0.20
1.09% C steel, annealed	42,000	23,000		0.55	
3.5% Ni, 0.3% C steel, annealed	49,000	29,000		0.59	
0.9% Cr, 0.1% V, 0.5% C steel, annealed	42,000	22,000		0.52	
13.8% Cr, 0.1% C steel, quenched, drawn	50,000	35,000	18,000	0.70	0.36
17% Cr, 8% Ni, 0.2% C steel, hot-rolled	50,000	50,000	25,000	1.00	0.50
Nickel, 98.96%, annealed 760°C	33,000	23,500	21,500	0.71	0.65
Monel, 67.5% Ni, 29.5% Cu, annealed 760°C	36,500	26,000	28,000	0.71	0.77
Cupro-Nickel, 21% Ni, 78% Cu, annealed 760°C	19,000	18,000	18,000	0.95	0.95
Copper, annealed 650°C	9,800	10,000	10,000	1.02	1.02
Aluminum, 99.4%, annealed	5,900		2,100		0.36
Aluminum, 98%, 1.2% Mn, hard	10,700	5,500	3,800	0.51	0.36
Duralumin, tempered	17,000	7,700	6,500	0.45	0.38
Brass, 60-40, annealed	21,000	18,000		0.86	

\* 2 ppm CaSO<sub>4</sub>, 200 ppm CaCO<sub>3</sub>, 17 ppm MgCl<sub>2</sub>, 140 ppm NaCl

† Severn River Water having about  $\frac{1}{8}$  the salinity of sea water



**Fig. 15**

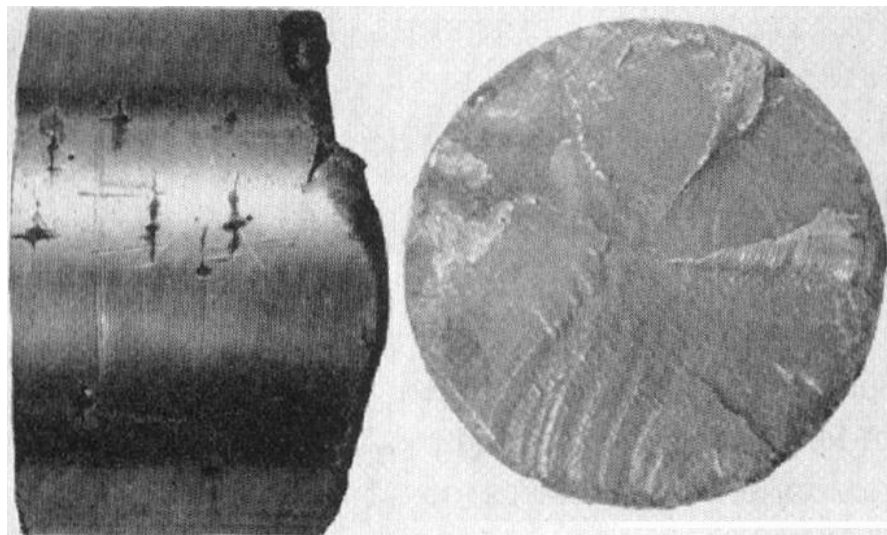
La disminución en la resistencia del metal es inducida por la formación de pits tanto por la acción de la corrosión como por acción de la fatiga.

El daño producido por la corrosión por fatiga es mayor que la suma del daño causado por tensiones cíclicas y corrosión en forma separada por consiguiente cuando ambas actúan en conjunto el efecto neto es el de incrementar la tasa de propagación de fisuras.

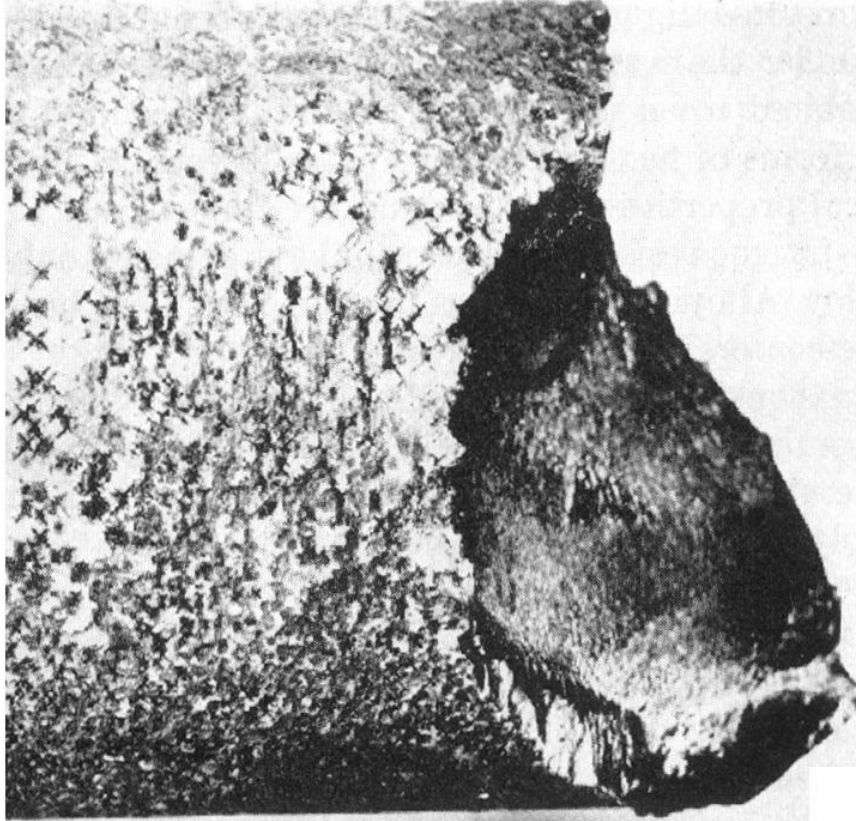
Para el análisis de las causas de ésta se proponen los dos análisis siguientes:

- Metal resistente a la corrosión: Si bien la película protectora (generalmente óxidos) se regenera rápidamente cuando es dañada, esta es generalmente poco resistente y poco dúctil y bajo un estado de tensiones cíclicas o alternadas la tasa a la que la capa se regenera es menor que las rajaduras en ésta (debido a la tensión). Se generan entonces pits debidos a los efectos de la corrosión, que sumados a la tensión cíclica y concentración de tensiones resultan en la rápido formado y propagación de fisuras que culminan con la fractura del metal.

- Metal no resistente a la corrosión: Tanto el efecto de tensiones cíclicas como la corrosión generaran pits desde el estado inicial en el metal. Por lo tanto la tasa de formación y propagación de fisuras será mayor que en el caso anterior y el metal fallará rápidamente. A estos casos se los conoce también como *fatiga por corrosión*.



**Fig. 16** Corrosion fatigue (natural size).



**Fig. 16b Corrosion Fatigue**

### **Corrosión a temperaturas elevadas**

Las formas de corrosión a temperaturas elevadas son las mismas que a bajas temperaturas, puede ser pitting, uniforme, erosión, etc. La mayor diferencia radica en que el incremento de temperatura acelera tanto las reacciones químicas como el proceso de difusión en las fases sólidas, que resultan en un incremento apreciable de las tasa corrosiva.

A su vez si el material debe trabajar tanto a temperaturas elevadas, como a bajas o ambiente, el cambio cíclico de temperatura puede generar rupturas en las laminas protectoras o bien desprendimiento de ésta. Por lo tanto cuando se presente este tipo de situaciones (turbinas, puesta en orbita de vehículos espaciales, etc.) debe analizarse la adherencia de la capa protectora.

### **CORROSIVOS**

Hasta ahora hemos hablado de las causas de la corrosión, como clasificarla y en que formas se presenta. Sin embargo un factor fundamental es el medio en el que el material se encuentra inmerso, pues dependiendo de las características de éste el efecto de corrosión actuará en mayor o menor medida.

Los medios corrosivos pueden clasificarse en:

- Corrosión atmosférica
- Corrosión by soils (corrosión por tierra: debida a elementos orgánicos en ella)
- Corrosión por agua
- Corrosión por ácidos
- Corrosión por Sales,

Corrosión por halógenos, por compuestos sulfúricos, por comidas, por gases, por metales líquidos, etc.[1],[5]

De la extensa lista de ambientes, sólo se analizan los más destacados con respecto a aeronáutica.

### Corrosión atmosférica

Si bien la composición básica de los componentes atmosféricos es prácticamente constante algunos constituyentes pueden variar en pequeñas cantidades afectando las propiedades corrosivas del medio. Por lo tanto la rapidez de corrosión variará según la atmósfera. Éste factor es muy importante en la fase de diseño de la aeronave.

Los elementos corrosivos que se encuentran usualmente en la atmósfera son:

- Oxígeno ( $O_2$ )
  - Agua ( $H_2O$ )
  - Dióxido de carbono ( $CO_2$ )
- La proporción de oxígeno se mantiene prácticamente constante en todas las atmósferas. Es un elemento no metálico que tiende a combinarse rápidamente con las estructuras metálicas.
  - La humedad ( $H_2O$ ) se encuentra desde bajas cantidades en zonas áridas o desérticas hasta elevadas como por ejemplo en los trópicos.
  - El  $CO_2$  si bien no se encuentra presente en grandes cantidades puede variar según condiciones climáticas y regiones.

Dentro de estos tres factores, el más crítico es el agua. La tasa de corrosión se ve incrementada según la humedad presente pues el  $H_2O$  actúa como un eficiente electrolito. Dependiendo de cada metal se determina un nivel crítico de humedad a partir del cual la tasa de corrosión aumenta rápidamente.

Vale aclarar que si bien el agua es un parámetro crítico, la lluvia, aunque incrementa la humedad relativa del medio actúa generalmente de forma benéfica pues limpia los corrosivos contaminantes y productos de la corrosión de la estructura.

Se encuentra por otra parte que los elementos que se encuentran parcialmente estacionados (hangares mal ambientados) sufren un mayor ataque. Esto es probablemente causa de que no obtienen los beneficios de la lluvia y evitan el beneficio del viento que actúa evaporando la humedad.

Basado en el tipo de contaminantes en el aire las atmósferas pueden ser clasificadas en: industrial, marina, y rural. También puede expresarse a la atmósfera mediante clasificaciones meteorológicas como por ejemplo: árida, tropical, polar, etc. O bien combinadas.

### Atmósferas industriales

Estas son sin duda las más críticas. Se caracterizan por la presencia de pequeñas partículas de basura (metálica, etc.), hollín, y compuestos de sulfuro que emanan de la combustión, como por ejemplo dióxido de azufre o ácido sulfúrico. También pueden estar presentes otros tipos de contaminantes químicos debidos a industrias, aunque estos suelen estar presentes en áreas localizadas.

Si bien los compuestos de sulfuro están presentes en forma reducida, estos aumentan rápidamente la tasa de corrosión.

### Atmósferas marinas

La corrosión en ambientes marinos se atribuye primariamente a la presencia de clorhídricos en el aire. Muy dañinos para el aluminio han sido detectados hasta alturas entre 96km y 112km en océano abierto.

En zonas cercanas a la costa tanto como en el océano abierto, la mayor o menor presencia de elementos corrosivos provenientes del agua dependen directamente del viento. Este genera ondas de partículas que son levantadas hasta grandes alturas.

Otros elementos corrosivos son las sales. Si bien no son la causa directa de la deterioración del metal, su naturaleza higroscópica les otorga la posibilidad de actuar como electrolitos si se adhieren a la estructura de la aeronave. En consecuencia cada vez que una aeronave que se encuentre sometida a este tipo de ambiente debe ser limpiada periódicamente.

El agua dulce que puede provenir de lagos, ríos, pozos, manantiales, variará su capacidad corrosiva dependiendo específicamente de donde este localizado el sector marino. Con esto nos referimos a ciertos factores predominantes a tener en cuenta, como son la acidez y los vientos. Además de la acidez debida a los desechos industriales (si los hay), debe tenerse en cuenta que tanto la descomposición animal, como vegetal incrementa la acidez del agua.

### Atmósferas rurales

Estas son las menos corrosivas de la clasificación realizada. El efecto corrosivo depende principalmente de los efectos discutidos anteriormente como por ejemplo humedad relativa en el aire y el movimiento de este mismo (viento).

Como ejemplo obsérvese la fotografía 17.a y 17.b en la que puede verse el larguero principal del ala de la aeronave Fieseler Storch (Cigüeña) de la segunda guerra mundial. Véase como la aleación de aluminio de características similares a las del 2024 T3 es



atacada por la corrosión debida a la humedad ambiente por haber estado almacenado un periodo extenso de tiempo sin uso.

Si se observa en forma detenida, además de la corrosión presente en el alma del larguero puede verse como se propaga la corrosión por el contorno inferior del larguero (platabanda inferior).

En la foto fig. 17.c. vemos como ha quedado el recubrimiento del borde de ataque.



Fig. 17a

Fig. 17b

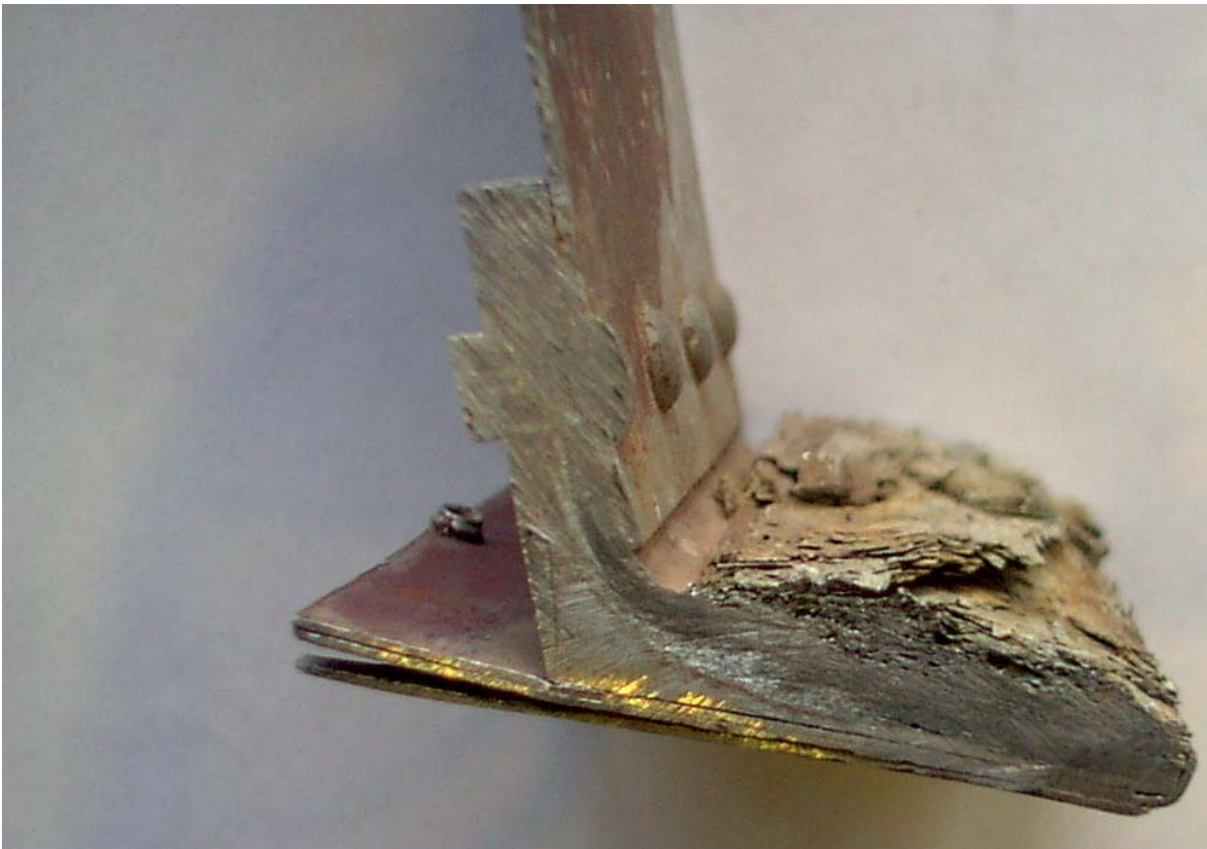




Fig. 17c



Fig. 17d

## **PROTECCION A LA CORROSION**

La corrosión es inevitable y por lo tanto la elección de un método de protección eficiente y acorde a la situación dará como resultado mayor vida útil del metal reduciendo los costos de mantenimiento. En aeronáutica el tipo de protección más utilizado es el pintado de la aeronave y el clading.

Una técnica ya explicada para proteger al metal es el pasivado, en el que se le genera al metal una delgada capa adherente y no porosa de productos de corrosión reduciendo la tasa de esta. A continuación explicamos otros métodos.

Dentro de los tipos de protección a la corrosión podemos encontrar:

- Protección galvánica → Protección Catódica  
→ Protección anódica
- Recubrimientos → Metálicos  
→ Inorgánicos y Orgánicos

- Inhibidores y pasivadores
- Pasivado de metales (Películas delgada adherentes y no porosas).

### Protección Galvánica

Se basa en la inducción de un potencial a la superficie a proteger con el fin de disminuir la diferencia de potencial entre el metal a corroerse y el que se reduce a la menor posible. Esto reduce la corriente y por lo tanto la tasa de corrosión.

Podemos dividir a esta técnica en dos clases:

- Protección anódica
- Protección catódica

Como sus nombres lo indican la diferencia entre ambas esta en el potencial aplicado es decir, si el metal se hace más anódico o más catódico. La técnica más utilizada es la catódica y es la que analizaremos.

### Protección catódica

Fue introducida por primera vez en forma práctica por Sir Humphry Davy en 1824 cuando abordó el control de la corrosión para el recubrimiento anti - radar de cobre utilizado en los navíos de guerra de la segunda guerra mundial mediante una corriente generada por la corrosión galvánica del Zinc.

Mediante la aplicación de una corriente externa sobre el metal a proteger la corrosión es reducida “virtualmente” a cero y la superficie del metal puede mantenerse en un ambiente corrosivo sin practica deterioración por un tiempo indefinido. Esto la convierte en una de las técnicas más importantes en la protección de la corrosión.

El mecanismo es el siguiente: dada una celda en la que un metal se corroe (ánodo) a costas de un metal que se reduce (cátodo) debido a la diferencia de potencial entre ambos y teniendo presente que a medida que el ánodo se corroe tiende a un potencial más catódico (la diferencia de potencial se reduce). Se utiliza una corriente externa (por ejemplo con un ánodo auxiliar) para llevar al ánodo a proteger a un potencial aproximadamente igual al del cátodo, es decir se “emula” que el metal se encuentra corroído. Por lo tanto se llega a un estado equipotencial en el que la corriente no fluye y por lo tanto el ánodo a proteger “no se corroe” (disminuye extremadamente su tasa de corrosión).

Se la llama protección catódica porque lo que se hace es llevar el potencial anódico del metal que va a ser corroer a un potencial más bajo o catódico.

### Recubrimientos

Tienen como objetivo cubrir al metal que será afectado mediante una capa protectora que separa química y mecánicamente al metal del medio al que será expuesto.

Podemos clasificarlos en tres categorías:

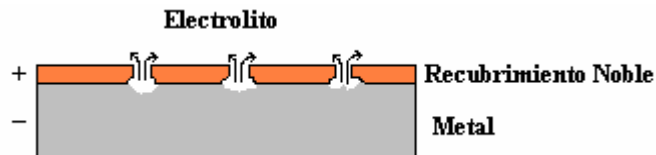
- Metálicos
- Inorgánicos
- Orgánicos

En aeronáutica los tipos más comunes son las pinturas (orgánico) y el clading (metálico). Los recubrimientos inorgánicos [1],[5] son poco utilizados en la industria aeronáutica y por lo tanto no los analizaremos.

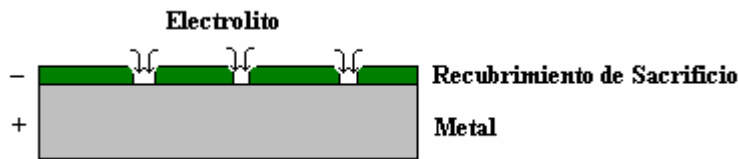
### Recubrimientos Metálicos

Como su nombre lo indica este tipo de recubrimiento es a base de elementos metálicos. Puede ser dividido a su vez en dos tipos, noble y de sacrificio. Debe destacarse que todos los recubrimientos comercializados son porosos en un cierto grado.

- A) *Recubrimientos Nobles*: Estos se caracterizan por ser catódicos respecto al metal que se protege en las series galvánicas. Por ello la película metálica no se deteriora con el tiempo, sin embargo debido a que no es perfectamente continua el metal se corroerá donde hayan poros presentes. Por lo tanto la película debe ser adherida de forma que se generen la menor cantidad de poros posibles.



- B) *Recubrimientos de sacrificio*: En este caso el recubrimiento es anódico respecto al metal. Se evita la deterioración del metal a costas de una película protectora que se corroe con el tiempo y va perdiendo su capacidad protectora.



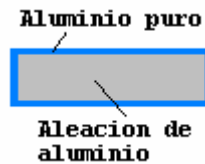
Los poros tanto en A) como en B) son generalmente sellados con lacas orgánicas.

Respecto a aeronáutica, el recubrimiento más utilizado se conoce con el nombre de AlClad (Al: Aluminio Clad: Clading: técnica de “pegado”)

### Alclad

Si bien el aluminio puro es un excelente metal anticorrosivo sus propiedades mecánicas son pobres. Por lo tanto no es un material adecuado para el diseño estructural y debe ser aleado con otros metales con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas. A su vez las aleaciones de aluminio se caracterizan por presentar menor resistencia a la corrosión y debe ser protegido.

La técnica de clading en aluminio consiste en aplicar a la aleación de aluminio un *recubrimiento metálico* de **aluminio puro** sobre toda su superficie lográndose optimas prestaciones mecánicas y resistencia a la corrosión.



Otro recubrimiento que puede ser utilizado es la aleación 1%Mn – Al que es la aleación de aluminio más resistente a la corrosión.

Si se analizan las series galvánicas se encuentra que ambos recubrimientos (99% Al, y 1%Mn-Al) actúan como *recubrimiento de sacrificio* y por lo tanto deberá ser controlado.

### Recubrimientos Orgánicos

En esta categoría se encuentran las pinturas (utilizadas ampliamente en aeronáutica), las lacas y barnices.

#### Pinturas

Definimos como pintura a una mezcla de partículas de pigmento insoluble suspendidas en un vehículo orgánico continuo.

El objetivo principal de las pinturas en su gran mayoría es el de proteger a los metales de la corrosión atmosférica. En los Estados Unidos se estima que el gasto anual entre pinturas y lacas es aproximadamente de diez mil millones de dólares, siendo la mitad destinada a la protección contra la corrosión.

Los pigmentos usualmente consisten en óxidos metálicos (TiO<sub>2</sub>, Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) o compuestos como ZnCrO<sub>4</sub>, PbCo<sub>3</sub>, BaSo<sub>4</sub>, “clays”, etc. Mientras que el vehículo puede ser un aceite natural tal que al ser expuesto al aire se oxida y polimeriza en un sólido (proceso que puede acelerarse mediante el uso de catalizadores). Sin embargo actualmente es común el uso de resinas sintéticas. Caracterizadas por una mejor resistencia a la penetración de agua, como por ejemplo las resinas vinilester o las resinas – epoxy que poseen una mejor adherencia a las superficies metálicas.

#### Barnices y lacas

Los barnices consisten generalmente de una mezcla de aceite, resinas disueltas y thinner. Mientras que las lacas consisten en resinas disueltas en thinner y algunas veces poseen pigmentos a la vez.

### Requerimientos de la pintura para una buena protección (criterios de selección)

- *Proveer una buena barrera al aire y agua:* hoy en día las pinturas son permeables en cierto grado al agua y oxígeno. Algunos vehículos son menos permeables que otros. La mejor forma de evitar este proceso de corrosión por difusión es el de aplicar capas múltiples de forma de incrementar la cantidad de pigmentos.
- *Inhibidores contra la corrosión:* los pigmentos incorporados en el “prime coat” (cobertura inmediatamente adyacente al metal) son críticos pues son estos los que actúan como capa pasivante entre el metal, la pintura, y el agua que atraviese las capas superiores. No muchos pigmentos comerciales cumplen con esta función. Los más destacados son el  $Pb_3O_4$  (plomo rojo) y el cromato de Zinc ( $ZnCrO_4$ ), los cuales cumplen efectivamente esta función.
- *Proveer una larga vida a bajo costo:* A la hora de seleccionar la pintura hay que tener en cuenta no solo el precio de la pintura sino la durabilidad de ésta pues si la pintura es de bajo costo y baja durabilidad el gasto puede tornarse elevado debido al gasto de mantenimiento (despintado, repintado del avión, más el costo laboral).
- La experiencia ha demostrado que uno de los factores más importantes en la vida de la pintura es la adecuada preparación de la superficie metálica (generalmente más importante que la calidad de la pintura): abarca el limpiado de toda suciedad, aceites y grasas de la superficie como el removido completo de todo producto de corrosión.
- El “prime coat” debe ser aplicado sobre la superficie metálica seca con el objetivo de obtener una buena adherencia. Si es necesario, previa aplicación de la primer capa puede realizarse un tratamiento de superficie (capas de fosfato o wash primer) que mejora la adherencia de la primer capa al metal y provee una buena resistencia a la rajadura de la primer capa.

### Wash Primer

El wash primer WP1 fue creado durante la segunda guerra mundial con el objetivo de facilitar el pintado del aluminio. Este al igual que la capa de fosfato sirve como tratamiento de superficie y tiene la ventaja de proveer en una operación en lugar de dos un tratamiento con fosfato.

### Pintado del aluminio

Debido a la baja porosidad del aluminio las pinturas no se adhieren bien a su superficie. Por este motivo a diferencia de otros metales se le debe hacer indispensablemente un previo tratamiento de superficie mediante el uso de Wash primer o de fosfato, siendo el primero más efectivo y por lo tanto más utilizado.

La primer capa de pintura debe contener en general cromato de zinc como pigmento inhibidor (el plomo rojo genera acciones galvánicas con el Al) pues las pinturas ricas en Zinc ( $ZnO$ ) tienen una muy buena adherencia a la superficie.



## **METODOS DE PREVENCIÓN Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

Hemos examinado que la corrosión depende en gran medida de las condiciones ambiente que rodean a la aeronave. En cualquier caso es importante tener en cuenta que el control de la corrosión es una inspección periódica que el manual de la aeronave contemplará dentro de un periodo de tiempo. No obstante es la experiencia quien determina fundamentalmente el periodo de inspección.

Existen cuatro métodos fundamentales para detectar la corrosión:

- Inspección Visual
- Inspección por Tintas penetrantes
- Inspección por Ultrasonido
- Inspección por Rayos X

Los tres últimos serán analizados en temas posteriores. Respecto a la inspección visual es conveniente planificar un recorrido estándar y observar con linterna y lupa. Téngase presente que el polbillo blanco o gris en las chapas o alrededor de los remaches son signos de corrosión del Aluminio y magnesio. Las ampollas en pinturas son puntos donde probablemente haya corrosión por debajo.

Una vez detectada debe clasificarse el daño (algunos manuales proporcionan pautas para clasificarlo) a efectos de analizar la continuidad de la pieza.

Analizaremos algunos lugares del avión sensibles a la corrosión a tener en cuenta tanto para el diseño como para el mantenimiento:

- La corrosión intergranular es un tipo de corrosión muy difícil de detectar a simple vista. Aleaciones como el 2024 son susceptibles a ésta. La garantía frente a este tipo de corrosión se encuentra en controles precisos del material de fabricación de aeronaves y control de tratamientos térmicos y soldaduras.
- El servicio a temperaturas elevadas es como se dijo factor influyente en la tasa corrosiva.
- La corrosión por contacto o fricción es muy común en todas las juntas, uniones con pernos y remaches de la estructura de la aeronave susceptibles a la corrosión. Puede presentarse usualmente como manchas oscuras alrededor de la cabeza de los remaches. Para retardarlo se utilizan interposición de juntas, sellantes, compuestos o lubricantes en juntas. Otras veces no hay otra solución más que sustituir las piezas.
- El contacto entre materiales diferentes es muy común en aeronáutica, por ejemplo entre el acero y las aleaciones ligeras (pernos de acero en estructuras de Al). Todos estos contactos deben impedirse por interposición de juntas o películas protectoras.
- Las corrientes eléctricas que producen el equipo eléctrico de abordaje mal aislado puede originar corrosión galvánica de las zonas contiguas al equipo. Las chispas producen

ácido nítrico si hay humedad en el ambiente, de aquí que los espacios eléctricos confinados deben airearse convenientemente.

- La batería es una región clave. Estas son a base de ácido o de níquel-cadmio, y convierten la energía eléctrica en energía química que queda almacenada para posterior reconversión a energía eléctrica. Estas transformaciones tienen desprendimiento de vapores corrosivos, por lo tanto los compartimientos de baterías de ácido deben ser resistentes a vapores de ácido mientras que las de níquel-cadmio a vapores alcalinos.
- Zonas de lavabos y acondicionamiento de comidas. Estas zonas son críticas debido a la acumulación de agua y deshechos.
- La presencia de agua en zonas interiores a las superficies sustentadoras del avión termina por originar corrosión. La mejor forma de eliminar la humedad de un avión es volarlo. Una noche fría del avión a la intemperie y de fuerte condensación puede generar grandes cantidades de agua.
- El combustible de aviación absorbe agua con los ciclos de cambio de temperatura. La presencia de agua en los depósitos de combustible es un factor de riesgo sobre todo en aviones con motores turbina.
- Zona del motor:
  - *La zona de salida o escape* de gases es muy propensa a la corrosión debido a los productos de combustión como el azufre y otros agentes. A su vez se ve favorecida por la alta temperatura de los gases (téngase presente en tubos de escape, toberas de salida, carenas adyacentes a esas áreas).
  - *En zonas de admisión* de aire de motores turbina el aire entra a gran velocidad junto con numerosas partículas abrasivas que tienden a eliminar las películas protectoras del borde de ataque (**corrosión por erosión**).
  - Motores alternativos. La bancada del motor es crítica, pues el motor eléctrico de puesta en marcha cierra el circuito normalmente a través de la bancada del motor.
- El tren de aterrizaje y los alojamientos son los más atacados. Deben estar preparados para abrasión, impacto de pequeñas piedras, agua, hielo acumulado durante muchas horas de vuelo a elevada altitud, barro, etc. *Es la zona más propensa a la corrosión.* Las ruedas de avión están construida con aleaciones de magnesio, mientras que los pernos de sujeción son de acero, es decir estamos ante un par galvánico de primer orden.
- La limpieza de la aeronave se realiza con maquinas de agua – vapor a presión, o a mano.  
El lavado de una aeronave es el primer paso para controlar la corrosión. Los productos de limpieza que se emplean tanto a mano o a maquina difieren normalmente.

Para finalizar, téngase presente que las aeronaves se proyectan con el objetivo de reducir peso a costas de llevar la mayor carga paga y el menor combustible posible.



Todo ello obliga a mantener el peso estructural al mínimo de manera que cada centímetro cuadrado del material soporte su carga máxima de trabajo. La corrosión convierte al material en un compuesto distinto que será incapaz de soportar la carga que previamente tenía asignada.

**BIBLIOGRAFIA:**

- [1] “Corrosión and corrosión control” Hebert H. Uhlig
- [2] “Science Materials” Richards
- [3] “Mechanism and theory of corrosión, corrosión testing and corrosión control” American Society Monograph series
- [4] Flin – Trojan
- [5] “Corrosión Handbook” H. Uhlig
- [6] “Las aeronaves y sus materiales” Antonio Esteban Oñate
- [7] “Apuntes de Pinturas de Cátedra Materiales II” Biblioteca
- [8] “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales” William F. Smith (segunda edición)