

Corrosión. Tipos. Prevención

Corrosion. Types. Prevention



 Francisco Martínez-Pérez¹*

<https://cu-id.com/2177/v32n2e10>

¹Universidad Tecnológica de La Habana-CUJAE, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN: La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica, la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de las características del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos. En el presente trabajo se caracteriza el proceso corrosivo tanto en metales como en cerámicos y materiales poliméricos. Se explican los diferentes tipos de corrosión basado en las tendencias modernas de su clasificación; en cada caso se actualizan las vías principales de ocurrencia. Se explican las formas actuantes para su prevención. Se incluye información sobre la prevención catódica. Finalmente se destacan las consecuencias económicas y sociales de este proceso.

Palabras clave: material, ataque electroquímico, energía interna, propiedades de los metales.

ABSTRACT: Corrosion is defined as the degradation of materials as a consequence of electrochemical attack. In general, it could be understood as the general tendency of materials to search for its most stable form or the one with the least internal energy. The velocity of corrosion will depend on temperature, on the characteristics of the fluid in contact with and on the properties of the material. Nonmetallic materials also suffer corrosion by different mechanisms. In the present work, corrosion processes in metals, ceramic materials and polymers are characterized. Different types of corrosion, based in modern form of its classification, are explained and, in each case, the main ways of occurrence are updated. The acting forms for prevention are also explained, including information on cathode prevention. Finally, the economic and social consequences due to corrosion are shown.

Keywords: Material, Electrochemical Attack, Intern Energy, Properties of the Metals.

INTRODUCCIÓN

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos (Martínez, 2016).

La corrosión puede ser mediante una reacción química (oxirreducción) en la que intervienen tres factores:

- La pieza manufacturada
- El ambiente
- El agua

O por medio de una reacción electroquímica.

Los factores más conocidos son las alteraciones químicas de los metales a causa del aire, como la herrumbre del hierro y el acero o la formación de pátina verde en el cobre y sus aleaciones (bronce, latón).

*Autor para correspondencia: Dr.C. Francisco Martínez Pérez, e-mail: fmartinezperez2013@gmail.com

Recibido: 09/05/2022

Aceptado: 13/03/2023

Sin embargo, la corrosión es un fenómeno mucho más amplio que afecta a todos los materiales (metales, cerámicas, polímeros, etc.) y todos los ambientes (medios acuosos, atmósfera, alta temperatura, etc.).

Es un problema industrial importante, pues puede causar accidentes (ruptura de una pieza) y, además, representa un costo importante, ya que se calcula que cada pocos segundos se disuelven 5 toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros, invisibles en cada pieza pero que, multiplicados por la cantidad de acero que existe en el mundo, constituyen una cantidad importante (García, 2011; 2012).

La corrosión es un campo de las ciencias de materiales que invoca a la vez nociones de química y de física (físico-química).

Lo que provoca la corrosión es un flujo eléctrico masivo generado por las diferencias químicas entre las piezas implicadas. La corrosión es un fenómeno electroquímico. Una corriente de electrones se establece cuando existe una diferencia de potenciales entre un punto y otro. Cuando desde una especie química cede y migran electrones hacia otra especie, se dice que la especie que los emite se comporta como un ánodo y se verifica la oxidación, y aquella que los recibe se comporta como un cátodo y en ella se verifica la reducción.

Para que esto ocurra entre las especies, debe existir un diferencial electroquímico. Si separamos una especie y su semi reacción, se le denominará semi par electroquímico; si juntamos ambos semi pares, se formará un par electroquímico. Cada semi par está asociado a un potencial de reducción (antiguamente se manejaba el concepto de potencial de oxidación). Aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción y, viceversa, aquél que exhiba un potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación (Callister, 2000; Callister y Rethwisch, 2018; 2019; Callister Jr y Rethwisch, 2020). En la Figura 1 puede apreciarse los potenciales de reducción de diferentes elementos metálicos.

El hierro y sus aleaciones

El hierro puro, con bajo contenido de carbono o con baja aleación tiene baja resistencia a la oxidación y a la corrosión y, por lo general, requiere de la aplicación de capas protectoras o protección catódica para mejorar su resistencia aún en atmósferas de condiciones poco corrosivas. Sin embargo, el acero de bajo carbono es pasivo en la presencia de soluciones alcalinas con alto pH. El acero de baja aleación se corroe en soluciones salinas con contenido de cloro.

Los aceros al carbono aleados con Cr, forman los llamados aceros ferríticos, ya que su estructura es de ferrita, siendo empleados en el petróleo, en la industria del gas y en algunas condiciones de la industria

serie fem estándar

Tabla 18.1 La serie fem estándar

Reacción del electrodo	Potencial de electrodo estándar, V ⁰ (V)
Au ³⁺ + 3e ⁻ → Au	+1.420
O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂ O	+1.229
Pt ²⁺ + 2e ⁻ → Pt	+1.2
Ag ⁺ + e ⁻ → Ag	+0.800
Fe ³⁺ + e ⁻ → Fe ²⁺	+0.771
O ₂ + 2H ₂ O + 4e ⁻ → 4(OH ⁻)	+0.401
Cu ²⁺ + 2e ⁻ → Cu	+0.340
2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂	0.000
Pb ²⁺ + 2e ⁻ → Pb	-0.126
Su ²⁺ + 2e ⁻ → Su	-0.136
Ni ²⁺ + 2e ⁻ → Ni	-0.250
Co ²⁺ + 2e ⁻ → Co	-0.277
Cd ²⁺ + 2e ⁻ → Cd	-0.403
Fe ²⁺ + 2e ⁻ → Fe	-0.440
Cr ³⁺ + 3e ⁻ → Cr	-0.744
Zn ²⁺ + 2e ⁻ → Zn	-0.763
Al ³⁺ + 3e ⁻ → Al	-1.662
Mg ²⁺ + 2e ⁻ → Mg	-2.363
Na ⁺ + e ⁻ → Na	-2.714
K ⁺ + e ⁻ → K	-2.924

Inactividad creciente (catódicos) ↑
↓ Actividad creciente (ánódicos)

FIGURA 1. Potenciales de reducción de diferentes elementos metálicos.

química. Los aceros austeníticos, al Cr-Ni, de estructura austenítica. Dependiendo de su composición, que tiene diversas formas, son empleados en atmósferas industriales químicas y marinas, así como en válvulas y ejes de bombas. Algunos de estos aceros son resistentes al trabajo en la industria alimenticia y en la industria eléctrica en álabes de turbina e intercambiadores de calor (Martínez, 2009; 2016).

Cobre y sus aleaciones

Las aleaciones de cobre tienen baja tendencia a la corrosión. Los ácidos fuertes atacan las aleaciones de cobre; lo cual puede mejorarse con adiciones de elementos de aleación como el amonio. El cobre comercialmente puro (99 %) tiene excelentes condiciones anticorrosivas en suelos. El latón, mezcla de Cu con hasta 40% de Zn, sufre de una reducción significativa de la resistencia inherente a la corrosión del cobre puro. Los broncees son aleaciones de cobre donde el principal elemento de aleación no es el Zn. Los broncees aleados con Al tienen una mayor resistencia a la corrosión que los latones, principalmente ante ácidos orgánicos. Los broncees más resistentes a la corrosión son las aleaciones de Cu con diferentes contenido de Ni y adiciones de otros elementos como el Si y el Mn, son empleados en la industria alimenticia y química, en condiciones marinas y en utensilios de cocina (Askeland, 1998; Askeland et al., 2017).

Aluminio y sus aleaciones

Las aleaciones de Al deben su resistencia al ataque del medio, debido a la rápida formación de una capa de óxido. Son muy empleadas en casas, en puertas y ventanas; también en cocina y en la industria química. En condiciones de pH neutro las aleaciones de Al pueden sufrir ataque ante la presencia de cloruros o el propio Cl. Algunos elementos de aleación adicionados a las aleaciones de Al (Zn, Mg, Mn Cu) afectan

TABLA 1. Factores que facilitan los procesos corrosivos

Factores que facilitan los corrosivos	
1.	Concentradores de esfuerzos
2.	Cambios bruscos de sección
3.	Unión de materiales diferentes
4.	Fases diferentes en un mismo material
5.	Mala calidad superficial
6.	Lugares de deposición
7.	Carencia de aeración en determinados lugares
8.	Uniones con concentradores de esfuerzos
9.	Regímenes de turbulencia
10.	Medio ambiente
11.	No correcta selección de materiales
12.	Falta de mantenimiento en tiempo y forma

sensiblemente la resistencia a la corrosión de las aleaciones de Al.

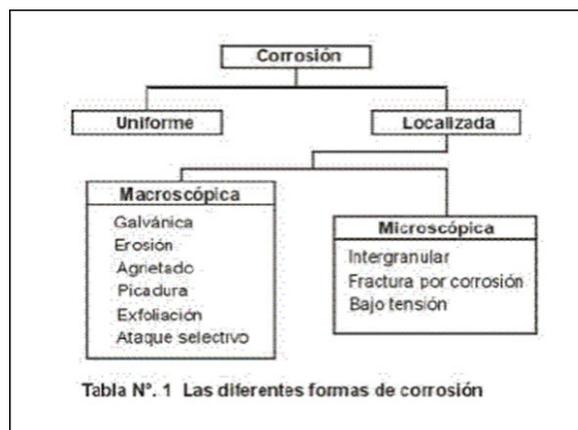
Materiales cerámicos

Los materiales cerámicos tienen una amplia y gran diversidad de aplicaciones en el mundo. Ello se debe a la variedad de estructuras y propiedades que se obtienen de sus diferentes composiciones químicas y procesos de obtención. Tienen aplicación en las industrias eléctrica y electrónica, en los procesos siderúrgicos, en la industria química, en la obtención de vidrios y materiales cerámicos, entre otras. Por lo general poseen resistencia a la corrosión.

Por lo general, la corrosión de estos materiales ocurre mediante una simple disolución química y no por procesos electroquímicos como en los metales. Los materiales refractarios deben resistir además de las altas temperaturas, el ataque de escorias, sales y vidrios fundidos, a veces durante largos periodos de tiempo (Askeland, 1998; Askeland et al., 2017).

Polímeros

Los materiales poliméricos también experimentan deterioro en el contacto con el medio ambiente. Para referirse a estas degradaciones se emplea el término degradación en vez de corrosión, ya que los procesos son distintos. La degradación polimérica es un proceso físico químico. En esta degradación tienen lugar gran variedad de procesos adversos. Se deterioran por hinchamiento y disolución. Ocurren rupturas de sus enlaces covalentes por energía térmica, por reacciones químicas y por efecto de radiación. Muchos polímeros, en presencia de un soluto como la gasolina, absorben dentro de él moléculas del soluto que ocupan posiciones dentro de las moléculas del polímero, separándolas, dilatándolas e hinchándolas. Este proceso es tanto mayor cuanto más parecida es la estructura del soluto y el polímero. En ello también influye la temperatura. Los polímeros son más

**FIGURA 2.** Clasificación de una forma de corrosión.

resistentes a la corrosión que los metales en presencia de soluciones ácidas y básicas (Ashby, 1999; Ashby y Jones, 2011).

DESARROLLO DEL TEMA

Tipos de corrosión. Prevención

La fuerza conductora de todo proceso de corrosión, como en la mayoría de los procesos metalúrgicos, es la disminución de la energía libre del sistema, el alcance de una estructura más estable (Tomashov, 1965; 1971). Existen diversas formas de clasificar los tipos de corrosión. En la Figura 2 pueden apreciarse una de las más comunes (Jones, 1992; Ashby y Jones, 2011; Jones y Ashby, 2012).

El ataque uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química, siendo necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura, para controlarla. La corrosión uniforme es la forma más fácil de medir, por lo que las fallas inesperadas pueden ser evitadas simplemente por inspección regular.

Corrosión homogénea. El material se desgasta en forma pareja, adelgazando cada vez más (Zn en solución de ácido sulfúrico diluida, Cu y sus aleaciones en medios acuosos. Es fácil de prevenir y controlar. Es una oxidación típica de los metales a temperaturas elevadas. Requiere de alta energía de activación. Ocurre en menor magnitud a temperatura ambiente (Dominguez et al., 1987).

Corrosión heterogénea. Es la que más abunda. Es más dañina y difícil de controlar, se caracteriza por la presencia de zonas anódicas y catódicas. Se hace intensa en determinadas zonas (Dominguez et al., 1987),

Diversos factores contribuyen a los procesos corrosivos. En la Tabla 1 veamos varios de ellos.

Analícemos los diferentes tipos de corrosión, así como la prevención de los mismos.

Corrosión galvánica

La corrosión galvánica se presenta, cuando dos metales diferentes en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora. En este caso, existe una diferencia en potencial eléctrico entre los metales diferentes y sirve como fuerza directriz para el paso de la corriente eléctrica a través del agente corrosivo, de tal forma que el flujo de corriente corroe uno de los metales del par formado. También puede ser por corrosión por celdas de concentración (ocurre por diferencia de potencial en estructuras o por diferencia de concentración de iones metálicos o por la presencia de un medio oxidante).

Mientras más grande es la diferencia de potencial entre los metales, mayor es la probabilidad de que se presente la corrosión galvánica debiéndose notar que este tipo de corrosión sólo causa deterioro en uno de los metales, mientras que el otro metal del par casi no sufre daño. El metal que se corroe recibe el nombre de metal activo, mientras que el que no sufre daño se le denomina metal más noble.

La corrosión galvánica a menudo puede ser reconocida por el incremento del ataque junto a la unión de los metales. Este tipo puede ser controlado por el uso de aislamientos o restringiendo el uso de uniones de metales cuando ellos forman diferencias de potencial muy grande en el medio ambiente en el que se encuentran. Otro método para reducir la corrosión galvánica, es evitar la presencia de grandes áreas de metal noble con respecto a las de metal activo. La protección contra la corrosión galvánica por contacto es no escoger materiales metálicos diferentes para un mismo equipo. Si lo anterior fuese necesario, escoger materiales con potencial cercano. Intercalar juntas aislantes. Recubrir el metal más activo hasta una distancia óptima.

También son medidas adecuadas el evitar la presencia de ranuras o huecos. Evitar uniones roscadas en materiales diferentes. Añadir al medio ambiente sustancias consumidoras de oxígeno como el sulfato sódico o la hidracina (Schweitzer, 2010). Emplear recubrimientos. En los fluidos, evitar las zonas muertas o sea el estancamiento de fluido donde se puedan almacenar productos de corrosión. En la [Figura 3](#) se muestra una imagen de corrosión galvánica.

Corrosión por picadura (pitting)

La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente no atacada y las picaduras pueden tener varias formas. La forma de una picadura es a menudo responsable de su propio avance, es decir, una picadura puede ser considerada como una grieta o hendidura formada por sí misma. Los agujeros son, por lo general, de pequeño diámetro y profundos aislados o unidos en



FIGURA 3. Corrosión galvánica.

superficies rugosas y preferentemente en tuberías o equipos. Es de las formas de corrosión más difundidas en El Caribe.

La corrosión por picadura se desarrolla solo en presencia de aniones agresivos e iones cloro. La agresión tiende a variar logarítmicamente con la concentración del cloro. En este proceso, una vez que la perforación comienza a crecer, las condiciones creadas son tales que continúa el crecimiento de la perforación. El crecimiento también depende de la composición del material. Se encuentra más frecuentemente en intercambiadores de calor, tuberías y fondos de tanques donde hayas remanentes de productos de limpieza.

Las causas de la aparición de este tipo de corrosión son (Denny A. Jones, 1996).

- La presencia de inclusiones metálicas o de aleaciones de varias fases donde una es de potencial muy diferente a las otras.
- Depósitos de corrosión que dificultan el acceso de oxígeno a esas zonas, lo que provoca la aparición de celdas de concentración.
- Ruptura de capas pasivas por presencia de aniones halógenos Cl⁻, Br⁻, I⁻, y otros como ClO⁻, ClO⁴⁻; siendo el más peligroso el Cl⁻. Este tipo de corrosión es más común en materiales pasivos (Fe, aceros de baja aleación, aceros inoxidable, Al y sus aleaciones).

Las medidas para prevenir este tipo de corrosión son:

Realizar una correcta selección del material a emplear.

No emplear metales pasivos en medios con iones Cl⁻, ni halógenos, ni en agua de mar.

Emplear Cu o aleaciones tales como el cuproníquel o metal monel.

En la [Figura 4](#) puede apreciarse este tipo de corrosión.

Corrosión intergranular o intercrystalina

Para entender este tipo de ataque es necesario considerar que cuando un metal fundido se cuela en un molde, su solidificación comenzó con la formación de



FIGURA 4. Corrosión por picadura.

núcleos al azar, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce con el nombre de granos o cristales. El arreglo atómico y los espaciamentos entre las capas de los granos, son los mismos en todos los cristales de un metal dado; sin embargo, debido a la nucleación al azar, los planos de los átomos en las cercanías de los granos no presentan buena coherencia y el espacio entre ellos, con elevado desorden, recibe el nombre de límite de grano.

La corrosión generalmente ocurre, porque el agente corrosivo ataca preferencialmente el límite de grano o una zona adyacente a él, que ha perdido un elemento necesario para tener una resistencia a la corrosión adecuada. El fenómeno de límite de grano que causa la corrosión inter cristalina, es sensible al calor por lo que la corrosión de este tipo, es un subproducto de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos y puede ser corregido por otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada (Cary, 1988; 1989; 2004; Cooke, 2003; Palencia, 2011). El caso más común es la corrosión en aceros inoxidables no estabilizados.

Las medidas para prevenir este tipo de corrosión son el homogenizar al máximo los materiales empleados. Esto se logra usando aceros inoxidables austeníticos estabilizados con Ti o Mo y tratados térmicamente mediante calentamientos a 950-1050^o C y enfriamiento en agua. Usar aceros con muy bajo contenido de carbono.

En la Figura 5 puede apreciarse la corrosión intergranular.

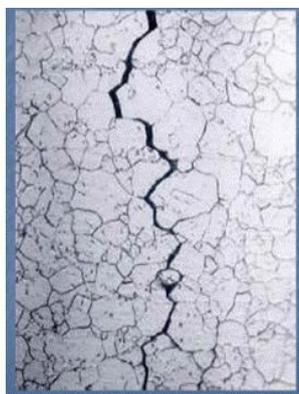


FIGURA 5. Corrosión intergranular.

Corrosión por exfoliación y disolución selectiva

La corrosión por exfoliación es una corrosión subsuperficial que comienza sobre una superficie limpia, pero se esparce debajo de ella y difiere de la corrosión por picadura en que el ataque tiene una apariencia laminar. Capas completas de material son corroídas y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y en ocasiones ampollado de la superficie.

Al final del ataque, una muestra tiene la apariencia de un mazo de barajas en el cual algunas de las cartas han sido extraídas. Este mecanismo es bien conocido en las aleaciones de aluminio y se combate utilizando aleaciones y tratamientos térmicos.

La corrosión por disolución selectiva se produce al efectuarse la remoción de uno de los elementos de una aleación siendo el ejemplo más común la eliminación del zinc en aleaciones de cobre-zinc, conocido con el nombre de dezincificación. Este fenómeno corrosivo produce un metal poroso que tiene propiedades mecánicas muy pobres y obviamente el remedio a este caso es el empleo de aleaciones que no sean susceptibles a este proceso.

El caso de la exfoliación se previene solo mediante la selección adecuada de la aleación y el tratamiento térmico conveniente. En el caso del dezincificación hay que tener en cuenta:

- La agresividad del ambiente, eliminando al máximo la presencia de oxígeno, estableciendo una protección catódica.
- Usar aleaciones donde el cinc aparezca como elemento de aleación en un 15-20%.
- Añadir pequeñas cantidades de Sn, As, Sb y P.

En la Figura 6 puede observarse un ejemplo de exfoliación.



FIGURA 6. Exfoliación en planta de tratamiento de aguas.

Corrosión con influencia de factores mecánicos

Corrosión por erosión

Cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste mecánico, este recibe el nombre de corrosión por erosión.

La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión, es a menudo difícil de establecer y varía grandemente de una situación a otra, y el mecanismo

de la erosión generalmente se atribuye a la remoción de películas superficiales protectoras, como por ejemplo, películas de óxido formadas por el aire, o bien, productos adherentes de la corrosión.

La corrosión por erosión, generalmente tiene la apariencia de picaduras poco profundas de fondo terso, y el ataque puede presentar también una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal, tal y como se muestra en la [Figura 7](#).

La corrosión por erosión prospera en condiciones de alta velocidad, turbulencia, choque, etc., y frecuentemente se observa en impulsores de bombas, agitadores y en codos y cambios de dirección de tuberías. Los líquidos con suspensión conteniendo partículas sólidas duras pueden igualmente causar este tipo de problema.

La superficie se caracteriza por muescas o estrías y en forma, generalmente, direccionales. Los tiempos de fallo son relativamente cortos y son susceptibles en metales blandos como el cobre. Son producidos por gases calientes con alta velocidad y por sólidos en suspensión en corrientes de líquido así como por sistemas orgánicos en movimiento. La corrosión por erosión puede ser evitada por cambios de diseño o por selección de materiales más resistentes.

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

Cavitación

Es una forma especial de la corrosión-erosión, que tiene lugar por la formación por condensación de burbujas de vapor en un líquido cerca de la superficie metálica. Se presenta en tuberías, propelas, impelentes y otras superficies donde los regímenes turbulentos con zonas de altas velocidades y bajas presiones dan lugar a este fenómeno. Para elementos de acero al C tiene lugar para velocidades $\geq 4,5$ m/s.

Las burbujas chocan contra la superficie y provocan ruido y martilleo que destruye la superficie localmente. Se forman picaduras en forma de panal de abejas. Si la superficie es rugosa el fenómeno se favorece.

Las medidas preventivas contra este tipo de corrosión son:

- Emplear aleaciones resistentes desde el punto de vista mecánico y aleaciones con capas protectoras fuertes y adherentes como aceros al Cr-Ni, bronce al Al y metal monel.
- Evitar el empleo de hierros fundidos corrientes

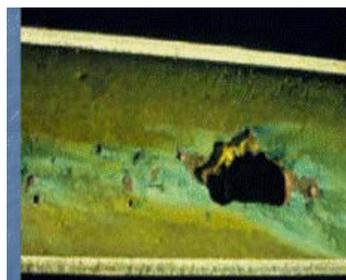


FIGURA 7. Corrosión por erosión.

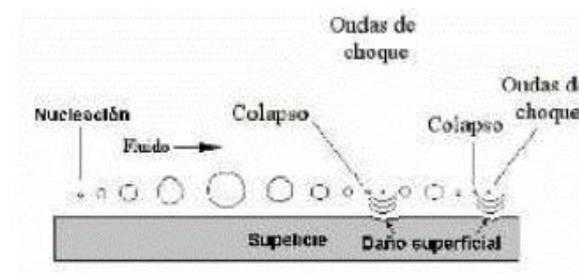


FIGURA 8. Proceso de cavitación.



FIGURA 9. Daño por cavitación.

- Operar los rotores e impelentes a máxima carga de presión posible para evitar la formación de burbujas
- Evitar la turbulencia
- Tratar de eliminar los sólidos en suspensión
- Emplear pasivadores (cromatos y dicromatos) y la protección catódica.
- Recubrir las superficies con gomas porcelanas y resinas especiales.

En las [Figuras 8](#) y [9](#) pueden observarse el desarrollo del proceso y un daño provocado.

Corrosión bajo tensión

La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, dará como resultado en algunos casos, la fractura de una aleación metálica. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque, pero afortunadamente el número de combinaciones aleación - corrosivo que causan este problema, son relativamente pocas. Sin embargo, hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios.

Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, tratamiento térmicos, o bien, pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo. Las fracturas pueden seguir caminos inter cristalinos o transcrystalina que a menudo presentan una tendencia a la ramificación.

Algunas de las características de la corrosión de fractura por tensión, son las siguientes:

- Se requiere de un esfuerzo por tensión.
- Influyen las condiciones metalúrgicas de la aleación.
- Dependen del medio ambiente.
- Influye el periodo de tiempo de exposición.

Para combatir la corrosión de fracturas por tensión, es necesario garantizar la resistencia al esfuerzo aplicado, aliviar las tensiones mediante tratamiento térmico o seleccionar un material más resistente.

En la [Figura 10](#) puede apreciarse un ejemplo de corrosión bajo tensión.

Corrosión bajo fatiga

La corrosión por fatiga, es una forma especial del tipo de corrosión de fractura por tensión y se presenta en ausencia de medios corrosivos, debido a esfuerzos cíclicos repetidos. Estas fallas son muy comunes en estructuras sometidas a vibración continua. Se incrementa naturalmente con la presencia de un medio agresivo, de tal forma que el esfuerzo necesario para producir la corrosión por fatiga, se reduce en algunas ocasiones hasta la mitad del necesario, para producir la falla en aire seco.

Esta corrosión tiene lugar en materiales metálicos sometidos en forma simultánea a la acción de esfuerzos de tracción en un medio corrosivo específico. Se incluyen en este comportamiento los fallos de fragilidad por hidrógeno. En este tipo de corrosión, la superficie sufre poco y el daño (grietas) es interior y puede originarse tanto en forma intergranular como transgranular.

En el caso de la corrosión por fatiga, como caso particular ocurre cuando los esfuerzos actuante son alternativos, lo que puede ocasionar el fallo del material, aun cuando el esfuerzo actuante sea mucho menor que el admisible. En este caso la corrosión es inter cristalina y con ramificaciones. Se presenta en aceros al carbono, en agua de mar, vapor de agua y en presencia de productos de combustión. Se observa en propelas, tubos de calderas, tuberías de vapor, pistones y cables.

En este tipo de corrosión el método más efectivo de protección es la catódica. Son también válidos los métodos de protección de la corrosión inter cristalina y el eliminar mediante tratamiento térmico las tensiones internas del material; así como usar



FIGURA 10. Corrosión bajo tensión.

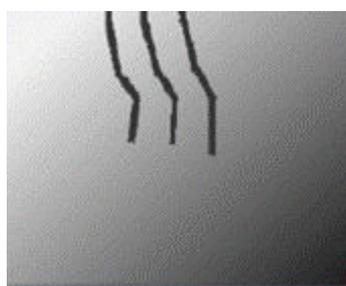


FIGURA 11. Corrosión por fatiga.

inhibidores como el extracto de quebracho, la hidracina, el sulfito de sodio y las soluciones de fosfato. Son también métodos efectivos.

- Disminuir la concentración de iones Cl-
- Emplear inhibidores como el dicromato de sodio
- Emplear la protección catódica como con Zn, Cd o recubrimientos
- Reducir las vibraciones y los esfuerzos cíclicos
- Generar en la superficie esfuerzos de compresión por métodos diferentes.

En la [Figura 11](#) puede apreciarse un ejemplo de corrosión por fatiga.

Principios de la protección catódica

Teniendo en cuenta la serie electroquímica de los metales, un metal tendrá carácter anódico con relación a otro, si se encuentra por encima de él en esta serie. Así, por ejemplo, el hierro será anódico respecto al cobre y catódico respecto al zinc. El metal que actúa como ánodo se sacrifica a favor del que actúa de cátodo, por eso a este sistema se le conoce como protección catódica por ánodo de sacrificio ([Domínguez et al., 1987](#)).

Aunque la mayoría de los ánodos se fabrican por colada o por gravedad, algunos ánodos se fabrican por colada continua o extrusión. El método de colada produce la apariencia y estructura física del ánodo y, por tanto, su comercialización y desempeño. Desde el

punto de vista del desempeño, el ánodo debe ser colado para que el metal solidifique sin segregaciones de constituyentes de aleación. Tampoco debe tener inclusiones de materia extraña, sopladuras ni rechupes. Si esto último ocurre, entonces aumentará el riesgo de que el ánodo tienda a pasivarse o desintegrarse físicamente. Debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, es decir, no debe desarrollar películas pasivantes u obstructoras con los productos de corrosión y tener una fuerte sobretensión de hidrógeno.

Desde el punto de vista técnico y económico, un ánodo tiene que reunir una serie de propiedades esenciales como las siguientes:

- Tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura (en el caso del acero a -0,8 V).
- El ánodo deberá corroerse uniformemente.
- El material debe tener un elevado rendimiento eléctrico en A/h kg.
- El metal será de fácil adquisición y deberá poder fundirse en diferentes formas y tamaños.
- El metal deberá tener un costo razonable, de modo que unido con otras características electroquímicas se pueda conseguir la protección a un costo razonable por amperio/año.

La norma A.S.T.M.- B6-46 y la especificación norteamericana U.S. Mil-A 18001 H definen la composición para ánodos de aleación de zinc, magnesio y aluminio.

Aspectos socio económicos de la corrosión

Las primeras estimaciones de los costos de la corrosión, así como las más recientes, coinciden en señalar que éstos corresponden a aproximadamente el 4% del PBI de un país (Treseeder, 1980; 2002).

La corrosión es un fenómeno que puede afectar prácticamente a cualquier material y cuando ésta no es prevenida o controlada puede reducir significativamente la vida útil o la eficiencia de componentes, equipos, estructuras e instalaciones.

Las pérdidas económicas derivadas de la corrosión pueden clasificarse en directas e indirectas. Las pérdidas directas se relacionan con los costos necesarios para la reposición de estructuras, equipos, maquinaria o componentes que pueden quedar inservibles por efecto de la corrosión.

Respecto a pérdidas indirectas, se pueden nombrar las siguientes: pérdidas por interrupciones, pérdidas de productos, pérdidas por contaminación de productos, pérdidas de rendimiento, pérdidas por sobredimensionamiento, pérdidas por accidentes.

Se estima que la relación entre los gastos directos e indirectos se sitúa entre 1/6 y 1/10. Además se estima que entre el 10 y el 12% de la producción mundial de

acero se pierde completamente cada año a causa de la corrosión.

Aspectos humanos y sociales

Dentro de estos aspectos pueden mencionarse:

- a. La seguridad, ya que fallas violentas pueden producir incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos, así como pérdidas de vidas humanas.
- b. Condiciones insalubres por ejemplo, contaminaciones debido a productos del equipo corroído o bien un producto de la corrosión misma.
- c. Agotamiento de los recursos naturales, tanto en metales como en combustibles usados para su manufactura.
- d. Apariencia, ya que los materiales corroídos generalmente son desagradables a la vista.

CONCLUSIONES

La corrosión es un proceso electroquímico que tiene como fuerza motriz, como en todo proceso metalúrgico, la búsqueda de la disminución de la energía libre del sistema.

Todos los materiales sufren de procesos de corrosión; solo en los polímeros el proceso recibe el nombre de degradación ya que se lleva a cabo por mecanismos diferentes.

Existen diversos procesos de corrosión, clasificados en uniformes (homogénea) y localizados (heterogénea), en esta última se pueden presentar casos en que influyen factores mecánicos. En todos los casos se brindaron medidas para su prevención.

La corrosión ocasiona importantes consecuencias económicas y sociales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHBY, M.: *Engineering Materials 2*, Ed. Butterworth Heinemann, Oxford, 1999, ISBN: 0-7506-4019-7.
- ASHBY, M.F.; JONES, D.R.H.: *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*, Ed. Elsevier, vol. 1, 2011, ISBN: 0-08-096665-9.
- ASKELAND, D.R.: *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ed. International Thomson Editores, vol. 3, México, D F, 1998, ISBN: 970-686-361-3.
- ASKELAND, D.R.; FULAY, P.; WRIGHT, W.J.: *Ciencia e ingeniería de materiales*, Ed. CENGAGE learning, 2017, ISBN: 607-526-062-5.
- CALLISTER JR, W.D.; RETHWISCH, D.G.: *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*, Ed. John Wiley & Sons, 2020, ISBN: 1-119-72367-1.

- CALLISTER, W.D.: *Materials Science and Engineering*, Ed. John Wiley and Son Inc., New York, USA, 2000, ISBN: 0-471-32013-7.
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G.: *Materials science and engineering: an introduction*, Ed. John Wiley and Son Inc., vol. 9, New York, USA, 2018.
- CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D.G.: *Ciencia e ingeniería de materiales*, Ed. Reverté, 2019, ISBN: 84-291-9549-1.
- CARY, H.B.: *Modern Welding Technology Second Edition*, Ed. Prentice-Hall, Inc., 1988, ISBN: 0-13-599283-4.
- CARY, H.B.: *Modern Welding Technology*, Ed. Prentice-Hall, Inc, USA, 1989, ISBN: 0-13-241803-7.
- CARY, H.B.: "Modern Welding Technology 5/e", *Industrial Robot: An International Journal*, 2004, ISSN: 0143-991X.
- COOKE, F.L.: "Plant maintenance strategy: evidence from four British manufacturing firms", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2003, ISSN: 1355-2511.
- DENNY A. JONES: *Principles and Prevention of Corrosion*, Ed. Prentice-Hall, Inc, Second Edition ed., USA, 1996, ISBN: 0-13-359993-0.
- DOMÍNGUEZ, J.A.; CASTRO, D.M.; MATOS, R.; HING, R.: *Introducción a la corrosión y protección de metales*, Ediciones ENPES ed., La Habana, Cuba, 25-29 p., 1987.
- GARCÍA, P.O.: *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial. Principios fundamentales*, Ed. Ediciones de la U, 2011, ISBN: 958-762-316-9.
- GARCÍA, P.O.: *Gestión moderna del mantenimiento industrial*, Bogotá, Colombia, 2012, ISBN: 078-958-762-051-1.
- JONES, D.: *Principles and prevention of corrosion*, Ed. Macmillan Publishing Company, USA, 568 p., 1992.
- JONES, D.R.H.; ASHBY, M.F.R.: *Engineering materials 2: an introduction to microstructures and processing*, Ed. Butterworth-Heinemann, 2012, ISBN: 0-08-096669-1.
- MARTÍNEZ, F.: *Temas importantes en el Mantenimiento. Ingeniería de Superficies, Corrosión, Materiales de Construcción, Aceros inoxidables*, Ed. Monografía: Universidad Tecnológica de La Habana-CUJAE, vol. monografía, La Habana, Cuba, 2016, ISBN: 978-959-261-526-7.
- MARTÍNEZ, P.F.: *Tribología Integral*, Ed. Editorial Noriega, Dewey: 621.89 ed., México, 2009, ISBN: 978-607-05-0271-2.
- PALENCIA, G.O.: *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial. Principios fundamentales*, Ed. Ediciones de la U, 2011, ISBN: 958-762-316-9.
- SCHWEITZER, P.A.: *Fundamentals of corrosion: mechanisms, causes, and preventative methods*, Ed. Taylor and Francis Group, vol. Chapter 3, Forms of metallic corrosion, New York, USA, Ppublisher: CRC press, 2010.
- TOMASHOV, N.D.: *Theory of corrosion and protection of metals*, New York, USA, 672 p., The MacMillan Company, 60 fifth Avenue, New York, 10011, 1965.
- TOMASHOV, N.D.: *Theory of corrosion and protection of metals*, Ed. Edición Revolucionaria, Edición Revolucionaria ed., La Habana, Cuba, Publisher: Instituto del Libro, 1971.
- TRESEDER, R.S.: *NACE Corrosion Engineer's Handbook*, Ed. National Association of Corrosion Engineers, USA, iv+ 233, 19 x 12 cm, 1980.
- TRESEDER, R.S.: *Nace Corrosion Engineer's Handbook*, Ed. Nace International, Third Edition ed., USA, 2002, ISBN: 1-57590-139-0.

Francisco Martínez Pérez, Dr.C., Profesor Titular, Centro de Estudios de Ingeniería de Mantenimiento, Universidad Tecnológica de La Habana-CUJAE, La Habana, Cuba, Tel.: 78335577, e-mail: fmartinezperez2013@gmail.com ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-8947-7870>

The author of this work declare no conflict of interests.

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher

This article is under license [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)