



 XDOC.MX

# Corrosión

María Teresa Cortés M. / Pablo Ortiz H.



**ODDC:MX**

## > Corrosión

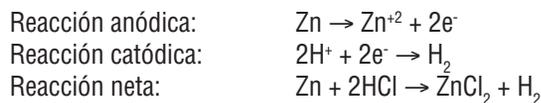
María Teresa Cortés M. / Pablo Ortiz H.

La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Si bien existen varias definiciones, es común describir la corrosión como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora y que incluso puede afectar la integridad física de los objetos o estructuras. La industria de la corrosión, si por ello entendemos todos los recursos destinados a estudiarla y prevenirla, mueve anualmente miles de millones de dólares. Este fenómeno tiene implicaciones industriales muy importantes; la degradación de los materiales provoca interrupciones en actividades fabriles, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobrediseños costosos. Se estima que los gastos atribuidos a los daños por corrosión representan entre el 3 y el 5 por ciento del producto interno bruto de los países industrializados; solamente hablando del acero, de cada diez toneladas fabricadas por año se pierden dos y media por corrosión [1]. Por esta razón, cada día se desarrollan nuevos recubrimientos, se mejoran los diseños de las estructuras, se crean nuevos materiales, se sintetizan mejores inhibidores, se optimizan los sistemas de monitoreo. Todo esto en un esfuerzo permanente por minimizar el impacto negativo de la corrosión.

### Naturaleza electroquímica de la corrosión

La corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica que cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para que se forme una celda electroquímica, o celda de corrosión, se requiere la presencia de un material que cede electrones en contacto con otro que los acepta, y de un medio conductor de iones. El material que pierde electrones se conoce como *ánodo* y es el que experimenta la reacción de oxidación, mientras que el material que acepta los electrones se reduce y se le llama *cátodo*; el medio en el que se encuentran el ánodo y el cátodo y que permite el flujo de iones se conoce como electrolito. La oxidación, a pesar de la etimología de la palabra, no necesariamente involucra el oxígeno; la definición química es una pérdida de electrones.

El mecanismo de la corrosión puede ilustrarse a través de un material metálico inmerso en una solución de HCl –ácido clorhídrico–. En el caso del zinc, los átomos metálicos Zn ceden electrones convirtiéndose en cationes ( $Zn^{++}$ ) mientras que los iones  $H^+$  aceptan estos electrones formando moléculas de  $H_2$  (figura 1). Las reacciones involucradas son la disolución del zinc para formar  $ZnCl_2$  y la producción de gas  $H_2$  [2].



Todos los metales presentan una tendencia a perder electrones –oxidarse– cuantificada a través de su potencial de oxidación. Entre más alto sea este potencial se dice que el metal es más noble –se oxida con mayor dificultad–. La tabulación de la resistencia de los materiales metálicos a la corrosión se conoce como serie galvánica. Las series galvánicas son particulares al medio corrosivo –por ejemplo, hay series galvánicas en solución salina, en solución ácida, etc.–, y son de gran utilidad a la hora de seleccionar un material para una aplicación específica.

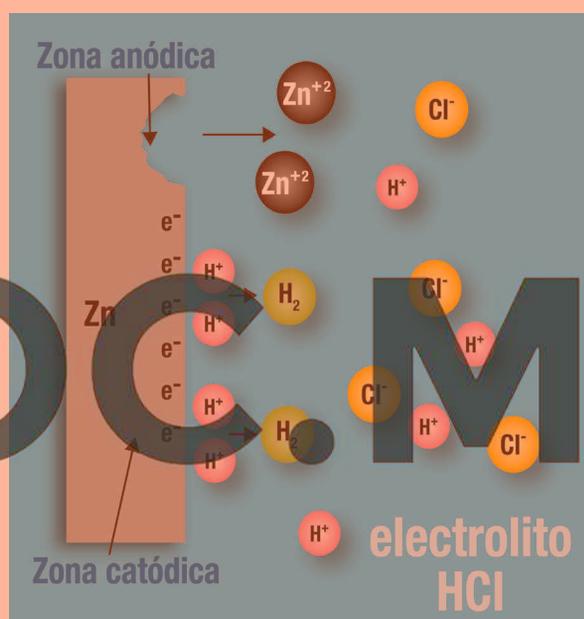


Figura 1. Esquema de la corrosión de un metal, Zn, que se oxida a  $Zn^{+2}$  mientras que sus electrones reaccionan con el  $H^+$  del medio produciendo  $H_2$

La corrosión se suele clasificar de acuerdo a la forma en que se manifiesta, es decir, a la apariencia del material corroído (figura 2). La corrosión uniforme es la más común y la que genera mayores pérdidas de material. Sin embargo, al ser de tipo superficial es también la más fácil de controlar y por tanto la que menos accidentes provoca. Por otro lado, la corrosión por picaduras es un fenómeno localizado que se manifiesta por anomalías que crecen rápidamente hacia el interior del material y que pueden generar daños catastróficos.

Existen otros tipos de corrosión y la figura 2 esquematiza algunos de ellos. El desarrollo de un mecanismo de

terminado se relaciona con la naturaleza del ambiente corrosivo y con las características composicionales y microestructurales del material [1]. Todos estos factores, incluyendo la selección de los materiales, deberán ser tenidos en cuenta al diseñar el método de protección del sistema.

Por ejemplo, la corrosión *galvánica* se presenta por el contacto entre dos metales con potenciales de oxidación diferentes. El material menos noble –con menor potencial de oxidación– tenderá a corroerse. Esto lo vemos muy a menudo en algunos tornillos que remachan estructuras bastante más nobles que ellos. Por otro lado, la corrosión *intergranular* está directamente relacionada con la microestructura del material. Los metales o aleaciones están formados por granos; en este tipo de corrosión se presenta un ataque localizado en las fronteras de grano y está generalmente asociado a impurezas que tienden a acumularse en dichas fronteras.

### Métodos de protección contra la corrosión



Figura 2. Algunos de los tipos de corrosión más comunes por influencia del medio, la estructura y composición del metal [1]

La batalla contra la corrosión de los materiales se desarrolla en el campo de la termodinámica, y por eso es una batalla que está perdida. El hombre solamente puede prolongar la vida útil de sus herramientas y estructuras, puede aliarse con la cinética y hacer creer que existen los aceros inoxidable, las pinturas anticorrosivas y los inhibidores de corrosión. Para entender las dificultades implícitas y lo efímero que resulta cualquier método de protección contra la corrosión es necesario conocer primero el grado de estabilidad del material que se pretende proteger.

La figura 3 muestra las energías de oxidación de varios materiales y elementos a 273°K (0°C) y bajo una atmósfera de oxígeno. En términos prácticos el orden de es-

tabilidad expuesto en la tabla se mantiene para las condiciones presentes en la superficie del planeta. De este modo, si nos fijamos en los metales, el único elemento estable es el oro mientras que todos los demás tenderán a oxidarse. El cobre y la plata reaccionan con el aire, pero lo hacen de manera moderada y lenta, y por eso su obtención en altos niveles de pureza es una tarea relativamente sencilla. Es esta característica la que explica que estos hayan sido los primeros metales en ser descubiertos y trabajados. El hierro en cambio no estaba disponible en la naturaleza –a excepción de aquel milagrosamente caído del cielo en los meteoritos–, y el hombre tuvo que extraerlo de los minerales, estos sí, abundantes y estables. Hornos especiales que garantizaban altas temperaturas permitieron la reducción de los óxidos de hierro. Sin embargo, la naturaleza ha demostrado desde hace tres mil años que la energía invertida en los procesos de obtención del hierro o el acero, se degrada rápidamente con la consecuencia de que los objetos fabricados retornan inexorablemente a sus minerales originales. El hierro es el elemento de la primera Revolución Industrial y sigue siendo el que mayor trascendencia tiene en el sector productivo de la sociedad. La corrosión es pues un fenómeno ligado históricamente a los materiales ferrosos, y es protegiéndolos o reemplazándolos, que el hombre ha logrado reducir su impacto económico.

Desde un punto de vista técnico los problemas de la corrosión se pueden enfrentar utilizando materiales de gran resistencia. El oro y el cobre lo son pero su costo y su baja tenacidad los hacen inadecuados para muchas aplicaciones industriales. La combinación del cobre con el estaño o con el zinc, aleaciones llamadas *bronce* y *latón* respectivamente, tienen mejor desempeño mecánico y mantienen una buena resistencia frente a la oxidación por lo que su diversificación ha sido mucho más importante. Pero es el aluminio el material más utilizado después del acero. Es liviano y de elevada resistencia a la corrosión y ha incursionado en el sector de los transportes y de la construcción, entre otros. El titanio por su parte es uno de los materiales más completos: es dos veces menos denso que el hierro y su resistencia mecánica y química son excelentes. Debido a su alto costo sus aplicaciones se limitan a sectores muy especializados como la industria aeroespacial, el sector biomédico –donde se destaca en la fabricación de prótesis–, y en aplicaciones submarinas gracias a su altísima resistencia frente a la corrosión del agua de mar.

No obstante, la figura 3 indica que la estabilidad del aluminio y el titanio ante el oxígeno es varias veces menor

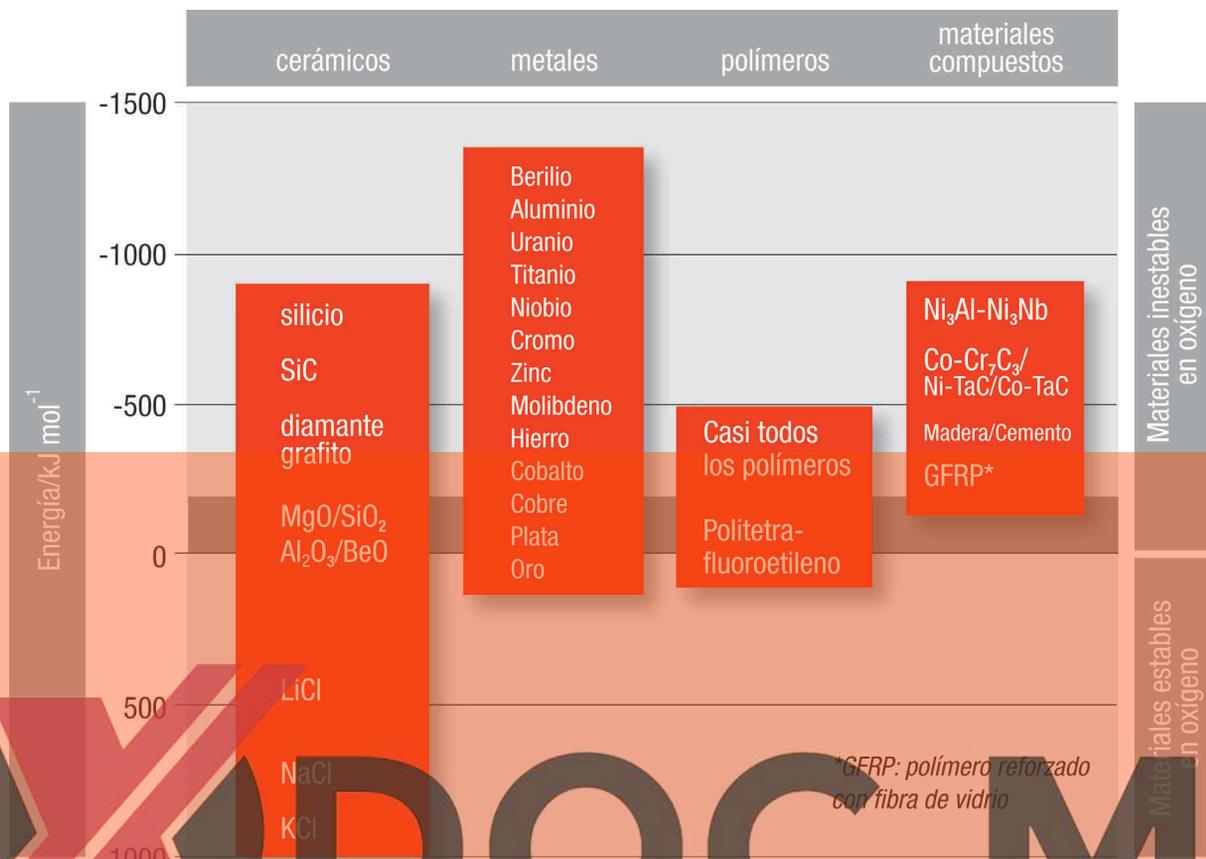


Figura 3. Energías de oxidación de diferentes metales y materiales compuestos a 273 K y bajo atmósfera de oxígeno [3]. Energías más pequeñas indican mayor tendencia del material al reaccionar con el oxígeno

que la del hierro. ¿Cómo puede afirmarse entonces que son más resistentes a la corrosión? La respuesta es que la tendencia de estos elementos a formar óxidos es tan grande que ellos se desarrollan instantáneamente en la superficie formando capas muy delgadas que sellan literalmente el material. A diferencia de los óxidos de hierro, los de aluminio y titanio están firmemente cohesionados a la pieza, no son porosos y prácticamente no se fracturan: este comportamiento garantiza uno de los sistemas espontáneos de protección más eficientes contra la corrosión. Es este mismo mecanismo el que ha permitido obtener aceros especiales de gran resistencia química. En efecto, mediante adiciones de cromo superiores a un 12 por ciento en peso, se fabrican los llamados aceros inoxidables: el cromo migra a la superficie para combinarse con el oxígeno formando una fina capa protectora ultradelgada que no se detecta a simple vista. Las aplicaciones de estos aceros son muy variadas y sin duda son los materiales metálicos con los que el hombre ha logrado, hasta el momento, el mejor balance entre costo, propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión.

La protección superficial de los materiales también se puede alcanzar artificialmente mediante la aplicación de recubrimientos. La deposición de capas metálicas o el uso de pinturas anticorrosivas, son métodos que prolongan la integridad de los aceros corrientes e incluso la de materiales más resistentes. Es importante destacar el enorme desarrollo en el campo de los recubrimientos orgánicos y la amplia gama de productos disponibles con propiedades y capacidades de protección muy específicas (figura 4). Los recubrimientos actúan como una barrera frente a la difusión de los agentes oxidantes, aislando el metal y evitando su acumulación sobre la superficie. Sin embargo, las pinturas se degradan, también sufren procesos de oxidación y es usual que requieran, quizás con más frecuencia que otros métodos, planes de inspección y mantenimiento.

Cualquier esquema de protección contra la corrosión debe interferir, o modificar, el funcionamiento de la celda electroquímica descrita en la primera parte de este documento. Los métodos mencionados anteriormente lo hacen básicamente evitando la formación de un elec-



**Figura 4.**  
 Probeta metálica sobre la cual se realiza la evaluación de un recubrimiento anticorrosivo de acuerdo a normas estandarizadas  
<http://www.corrosion.ksc.nasa.gov>

trolito sobre el material. En sistemas cerrados donde el ambiente corrosivo no se renueva, o lo hace muy lentamente, se han empleado inhibidores químicos, productos que se disuelven en el medio, lo modifican y reducen las velocidades de corrosión. Otros métodos interfieren directamente con la distribución de cargas en el material.

La protección catódica por ejemplo, se refiere al empleo de una corriente proveniente de una fuente externa que se opone a la corriente de corrosión en las áreas anódicas de la estructura metálica sumergida en un medio conductor. En este caso toda la estructura se comporta como una zona catódica y los electrones no provienen del metal –lo que causaría la corrosión– sino de la fuente externa. Sólo los sistemas enterrados o inmersos pueden ser protegidos de esta manera gracias a la existencia de un medio más o menos conductor, requisito para lograr la distribución homogénea de los potenciales.

### Algunos casos famosos

Es fundamental documentar todos aquellos casos de daños por corrosión no previstos que de algún modo se consideren especiales. Los científicos e ingenieros consultan frecuentemente estos archivos buscando aprender de las experiencias previas de forma tal que los costos de investigación y los riesgos en futuros proyectos puedan ser minimizados. A continuación se describirán algunos ejemplos.

### El accidente de Aloha

El 28 de abril de 1988 un boeing 737 de la aerolínea hawaiana Aloha con diecinueve años de uso, sufrió la ruptura de gran parte de su fuselaje a 24.000 pies de

altura (figura 5) [1]. En un hecho sin precedentes, el piloto logró aterrizar en una isla evitando una catástrofe de proporciones mayúsculas. La investigación demostró que los productos de corrosión generados en los remaches que unen las láminas del fuselaje provocaron la ruptura de los mismos. El daño se genera en este caso por la filtración y estancamiento de agua entre las juntas –corrosión por hendiduras–. El accidente de Aloha y los resultados de la investigación marcaron un punto de inflexión en la historia de la industria aeronáutica, tanto desde el punto de vista del diseño como de los planes de mantenimiento de las aeronaves.

### Mareas negras

Amoco Cádiz, Exxon Valdez, Braer, Erika, Prestige, son sólo una parte de una extensa y negra lista de petroleros hundidos. Los vertimientos de crudo de varios de ellos han tenido un impacto ambiental devastador, desestabilizando ecosistemas que han tardado decenas de años en recuperarse. Si bien algunas de estas catástrofes se deben a errores humanos, la mayoría están relacionadas con el ataque de la corrosión en los cascos y con programas de mantenimiento deficientes. En 1999 la tragedia del Erika ocasionó la contaminación de 400 kilómetros de playas en la costa Bretona. Tres años más tarde el Prestige vierte 15 mil toneladas de crudo en el mar Cantábrico y se hunde con otras 60 mil en sus depósitos (figura 6). Estos dos últimos accidentes han provocado cambios radicales en la legislación europea de transporte marítimo. Algunas de las medidas restringen directamente la circulación de los viejos buques monocasco y establecen una normatividad conducente a reemplazar la totalidad de la flota por petroleros de doble casco. Se han exigido métodos de protección contra la corrosión más eficaces y, en el caso de los nuevos buques, materiales más resistentes. Vale la pena destacar el impulso importante que estos accidentes han dado al desarrollo de nuevas y más eficientes tecnologías de inspección.



**Figura 5.**  
 Foto del accidente de un boeing 737 de la aerolínea Aloha como consecuencia de la corrosión en su fuselaje [4]  
<http://www.corrosion-doctors.org>



**Figura 6.**  
Derrame del Prestige en la costa Gallega.  
Foto Lavandeira jr.  
<http://www.sz.eur-frankfurt-o.de/homepages/lectorate/spanisch>

### Conclusión

El estudio de la corrosión y de los métodos para su prevención requiere de esfuerzos multidisciplinarios. El “factor corrosión” es fundamental en el proceso de selección de materiales y diseño de las estructuras. Son múltiples los sistemas de protección existentes y la experiencia ha demostrado que muchas veces la solución óptima se alcanza integrando varios de ellos.

### Grupos de investigación en corrosión en Colombia

Corporación para la Investigación de la Corrosión, CIC, Guatiguará. Sede de la Universidad Industrial de Santander, Piedecuesta, Santander.  
<http://corrosion.uis.edu.co>

Grupo de Investigación en Corrosión, GIC  
Facultad de Ingeniería, Universidad Industrial de Santander,  
Sede Guatiguará, Piedecuesta, Santander.  
<http://uis.edu.co>

Instituto Colombiano del Petróleo, ICP  
Piedecuesta, Santander.  
<http://www.icp.ecopetrol.com.co/>

Grupo de Protección y Corrosión  
de la Universidad de Antioquia  
Medellín, Antioquia.  
<http://jaibana.udea.edu.co/grupos/corrosion/>

Grupo de Superficie Electroquímica y Corrosión, GSEC,  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.  
Tunja, Boyacá.  
[www.uptc.edu.co/gsec](http://www.uptc.edu.co/gsec)

## > Referencias

- [1] H. H. Uhlig. *Uhlig's Corrosion Handbook* 2<sup>da</sup> ed. (ed. R. W. Revie) (John Wiley & Sons, Londres, 2000).
- [2] M. G. Fontana & N. D. Greene. *Corrosion Engineering* (McGraw-Hill, Nueva York, 1967).
- [3] M. F. Ashby & D.R.H. Jones. *Engineering Materials* (Butterworth-Heinemann, Boston, 2000).
- [4] Corrosion Doctors. *Galvanic Table* <http://www.corrosion-doctors.org/Aircraft/galvseriable.htm> (Kingston Technical Software Co., 2004).

## > Enlaces recomendados

<http://www.corrosion-doctors.org/>  
<http://www.corrosioncost.com/>

## > Reseña de los autores

**María Teresa Cortés M.**  
[marcorte@uniandes.edu.co](mailto:marcorte@uniandes.edu.co)

Química de la Universidad Industrial de Santander y doctora en Ciencias Químicas, Universidad del País Vasco. Actualmente ejerce como profesora asistente del Departamento de Química de la Universidad de los Andes. Sus áreas de interés son la síntesis y caracterización electroquímica de películas de polímeros conductores conjugados.

**Pablo Ortiz H.**  
[pabloortiz@cable.net.co](mailto:pabloortiz@cable.net.co)

Ingeniero Químico, Universidad Nacional, DEA en ciencia de materiales de la Escuela Nacional Superior de Química de Toulouse, y doctor en Ingeniería Industrial, Universidad de Navarra. Actualmente ejerce como investigador en la Corporación para la Investigación de la Corrosión.