

Marcela Vázquez

# La corrosión

*El peor de los villanos cuando dominan los metales*

Universidad Nacional  
de Mar del Plata



# La corrosión

*El peor de los villanos  
cuando dominan los metales*



# La corrosión

*El peor de los villanos  
cuando dominan los metales*

Marcela Vázquez



Vázquez, Marcela

La corrosión: el peor de los villanos cuando dominan los metales /  
Marcela Vázquez. - 1a ed. - Mar del Plata: EUDEM, 2018.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-4440-21-1

1. Corrosión. 2. Metales. I. Título.

CDD 669.14

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723 de Propiedad  
Intelectual.

Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio o método,  
sin autorización previa de los autores.

**ISBN:** 978-987-4440-21-1

*Este libro fue evaluado por el Dr. Gustavo E. Duffo*

Fecha de edición: mayo 2018

© 2018, Marcela Vázquez

© 2018, EUDEM

Editorial de la Universidad Nacional de Mar del Plata  
EUDEM / 3 de febrero 2538 / Mar del Plata / Argentina

**Imagen de tapa:** Marcela Vázquez



Libro  
Universitario  
Argentino

*A mi familia,  
por su apoyo, su paciencia y su crítica constructiva*



## INDICE

<b>Capítulo 1: La semilla de la maldad</b>	9
1.1.¿Qué entendemos por corrosión?	9
1.2 ¡Estamos rodeados! Algunos ejemplos	11
1.2.1 Vamos de paseo en un auto feo	13
1.2.2 Bala perdida	14
1.2.3 Hormigon armado y desarmado	15
1.2.4 Bacteria corrosiva: poderosa la chiquitina	17
1.2.5 Que no se afloje tu tornillo	18
1.2.6 Agua que no has de beber, dejala correr	20
1.2.7 Veo, veo... ¿qué le paso a ese marco de ventana?	21
1.2.8 Mancha estatua. ¡esto no es juego!	22
1.2.9 La estatua de la libertad, presa del óxido	23
1.2.10 No me des la lata	24
<b>Capítulo 2: No todo es lo que parece.</b>	27
2.1 Descubrimos a los que se esconden con una capa invisible	27
2.2 Una receta de tres ingredientes para corroer un metal	29
2.3 La víctima más frecuente: el acero	33
2.4 Una capa invisible protege al acero inoxidable	34
2.5 ¿Por qué el aluminio se fue para arriba?	35
<b>Capítulo 3. Mejor es prevenir que curar</b>	37
3.1 Costos: ¡no hay prepa que los cubra!	37
3.2 Problemas y costos en escala industrial	40
3.3 Cuidemos el planeta: los metales son recursos no-renovables	42
3.4 ¡Un número ahí, por favor! ¿Quién da más?	46
<b>Capítulo 4. Tipos de corrosión</b>	49
4.1 Corrosión: algunas pistas para conocerla más y entenderla mejor	49
4.2 Formas en que se presenta la corrosión	49
4.2.1 Corrosión generalizada	49

4.2.2 Picado	51
4.2.3 Corrosión galvánica	55
4.2.4 Corrosión intergranular	59
4.2.5 Corrosión bajo tensiones	61
4.2.6 Corrosión erosión	63
4.2.7 Dealeado	65
4.2.8 Fragilización por hidrógeno	67
4.2.9 Corrosión microbológica	68
<b>Capítulo 5. Cómo combatir a la corrosión.</b>	<b>71</b>
5.1 La lucha es cruel, y es mucha	71
5.2 La importancia de saber elegir	72
5.3 No hay villano sin superhéroe	74
5.3.1 Si no puedes con el enemigo, únete a él	76
5.3.2 Cambiar de entorno	79
5.3.2.1 Uso de inhibidores de corrosión	79
5.3.2.2 Bajar la agresividad del entorno	82
5.3.3 Recubrimientos: cuando la mejor solución es separarse	85
5.4 Estrategias para no reincidir: un buen plan de mantenimiento	89
<b>Capítulo 6. Grandes fracasos que fueron noticia</b>	<b>91</b>
6.1 Accidentes aéreos	91
6.2 Accidentes en plantas químicas	92
6.3 Accidentes en cañerías enterradas	96
6.4 Accidentes en estructuras viales	97
6.5 Accidentes en estructuras civiles	99
<b>Capítulo 7. Consideraciones finales</b>	<b>101</b>
7.1 Aprender de los errores	101
7.2 El verdadero superhéroe	102
<b>Bibliografía</b>	<b>103</b>

## CAPÍTULO 1

# La semilla de la maldad

### 1.1 ¿QUÉ ENTENDEMOS POR CORROSIÓN?

Seguramente, muchos de nosotros habremos observado alguna vez la formación de manchas de óxido sobre la superficie de una reja o de una lata de conserva. Incluso tal vez hayamos sido tristes testigos del proceso a través del cual se agujerea un guardabarro o el lateral de la heladera, meses después de que un inoportuno rayón hubiera levantado la pintura. Probablemente nos hayamos topado con alguna cuchilla vieja en la que aparecían persistentes manchas negras, por muy rápido que la secáramos después de lavarla. Estos son sólo algunos de los numerosos casos de corrosión que nos rodean y que nos ocuparán en el resto del libro.

Desde que el empleo de metales y aleaciones domina la vida moderna, la corrosión se ha posicionado como uno de los enemigos naturales más perseverantes y silenciosos de las obras materiales del hombre.

Empecemos entonces por desenmascarar al “villano”. ¿Qué es la corrosión? Simplemente un proceso a través del cual un material metálico se deteriora, como resultado de interactuar con el medio que lo rodea. Como diría mi abuelita, parece que el metal se “pudre” y en más de un sentido podría decirse que algo de cierto hay en este uso del lenguaje. Digamos que la putrefacción es la degradación de un tejido vivo que, palabra más, palabra menos, parece empujada por la sentencia bíblica que nos anticipa que polvo somos y en polvo nos convertiremos. Sin tomar literalmente la idea de un dios jugando a ser escultor con

barro, podemos interpretar la idea detrás de este enunciado como una manera de establecer que en la naturaleza hay ciclos. En el caso de los metales, la cuestión del ciclo arranca por darnos cuenta de que los metales forman parte de la naturaleza y de la corteza terrestre. Pero allí se los encuentra como minerales (mayoritariamente como óxidos y ciertas sales). Partiendo de los minerales, hay que llevar adelante procesos metalúrgicos (que son complejos y costosos) para poder recuperar los metales en la forma en los utilizamos en las diversas aplicaciones que la sociedad moderna requiere. Estos procesos de metalurgia extractiva requieren el empleo de grandes cantidades de energía. Pensemos como ejemplo en los altos hornos. Simplificando un poco las cosas, puede decirse que se los emplea para producir hierro, a partir de combinar y hacer reaccionar con oxígeno y carbón a los diversos minerales en los que habitualmente se lo encuentra. En la naturaleza, el hierro aparece formando parte de numerosos minerales, entre los que destacan la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la limonita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), la siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), entre otros. Sin embargo, una vez que en el alto horno se ha recuperado el metal hierro como elemento libre ( $\text{Fe}$ ), la energía que esta especie acumuló durante su producción tiende a ser liberada. Tarde o temprano, el metal regresa a su forma más estable: alguno de los óxidos. El ciclo que se inició con el mineral, a partir del que se extrajo el metal, termina cerrándose cuando el metal se corroe y vuelve a convertirse en óxido.

La corrosión es entonces un proceso químico, a través del cual un metal o una aleación pasa de estar en su estado puro, como elemento, a otro estado en el que muy comúnmente forma parte un óxido. De ahí surge el concepto que los metales se oxidan, lo que puede tomarse

como equivalente a decir que se corroen, aunque no siempre se forme una película de óxido sobre su superficie.

Si pudiéramos ampliar mucho la superficie del metal (como quien hace zoom en una imagen) podríamos “ver” los átomos. De hecho, esto es posible con instrumentos modernos tales como los microscopios de efecto túnel o de fuerzas atómicas. Un átomo es la partícula más pequeña que mantiene las propiedades del elemento. Simplificando un poco las cosas, podemos considerar que un átomo está formado por tres tipos de partículas subatómicas: electrones con carga negativa, protones con carga positiva y neutrones, sin carga. Para que un metal se oxide, es necesario que los átomos que lo constituyen pierdan electrones. Cuando un átomo se desprende de un electrón, se convierte en una especie cargada positivamente, que se denomina catión. Los cationes pueden dispersarse en el entorno o pasar a ser parte de la capa de óxido. Los electrones juegan un papel clave, por lo que la corrosión se clasifica como un proceso electroquímico. Pero como los electrones no pueden acumularse en la superficie del metal, siempre que el metal se oxida es necesario que haya disponible otra especie química que acepte esos electrones; es el agente oxidante. Cuando el material metálico está en contacto con el aire y cierto grado de humedad, generalmente es el oxígeno del aire el que cumple este rol. Al ganar electrones, el oxígeno también sufre una transformación química, como resultado de la cual se convierte en agua.

## **1.2 ¡ESTAMOS RODEADOS! ALGUNOS EJEMPLOS**

Cuando pensamos en metales corroídos (u oxidados), la primera imagen que se nos presenta suele estar asociada

a la aparición de una herrumbre rojiza, típica de la corrosión del hierro y algunos aceros. Claro, estos dos materiales son parientes cercanos: el acero es una aleación, es decir una mezcla en estado sólido, donde el hierro es el principal componente. El carbono es otro integrante infaltable en esta mezcla y ambos pueden estar acompañados por una gran variedad de otros elementos en pequeñas proporciones. El acero es el material metálico de uso más extendido y sus aplicaciones son de lo más variadas. En la mayoría de los casos, es el primer material metálico con el que entramos en contacto al nacer, cuando con una tijera quirúrgica de acero nos cortan el cordón umbilical. Asociamos entonces el acero a la medicina, lo encontramos en todas las industrias, en todos los medios de transporte, en las construcciones civiles y viales, en los electrodomésticos y los utensilios de la cocina, en instrumentos musicales, en armas, en obras de arte, en elementos ornamentales y muchísimas aplicaciones más. Pero hay otros metales y aleaciones que también forman parte de nuestra vida cotidiana.

Por ejemplo, el aluminio y sus aleaciones van ganando terreno en la industria de la construcción, en la industria automotriz y aeronáutica y también están presentes en muchos de los enseres que usamos para cocinar. Este metal tiene muy baja densidad (un cubo de 1 cm de lado pesa sólo 2.700 g), lo que lo hace muy útil en diferentes aplicaciones asociadas a procesos de ingeniería. Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es, desde mediados del siglo XX, el metal que más se utiliza después del acero.

El cobre es otro ejemplo de un metal con el que seguramente entramos en contacto a diario. El cobre y sus aleaciones constituyen una familia de materiales que se

caracteriza por su excelente capacidad para conducir la electricidad. Además, gracias a que son dúctiles y maleables (se les puede dar muchas formas diferentes sin que se quiebren), se han convertido en los materiales más utilizados para fabricar cables eléctricos y otros componentes de tendidos eléctricos y circuitos electrónicos, a través de los que hoy en día nos mantenemos conectados en este mundo moderno. También lo usamos en cañerías y tuberías que transportan agua, en cacerolas, en arte y artesanías, entre otros.

Vamos a describir ahora muy brevemente algunos ejemplos de procesos de corrosión, tratando de abarcar situaciones variadas y diferentes materiales metálicos. El propósito de este paseo es hacernos una idea más concreta de la capacidad de ataque del enemigo que enfrentamos y de la diversidad de las situaciones en que es capaz de mostrarse. Más adelante volveremos sobre casos semejantes y los trataremos con mayor profundidad.

### **1.2.1 VAMOS DE PASEO EN UN AUTO FEO**

Comencemos por un típico caso de corrosión en automóviles. Todo empieza por ejemplo, con un pequeño rayón que descubrimos en el estacionamiento del supermercado. Probablemente alguien no fue muy cuidadoso con su carrito y el impacto dejó su huella en nuestro vehículo. Al poco tiempo aparecen manchitas y luego pequeños agujeritos alrededor de la pintura saltada. Se ha iniciado la corrosión de la carrocería. Este es un ejemplo de corrosión localizada, comúnmente conocido como picado.

A veces la descubrimos durante el lavado, debajo de alguna moldura o en la parte interna del guardabarro. Ni siquiera algunas partes cromadas, como pueden ser los aros de algún faro, una manija o caño de escape, están a salvo de la aparición de óxido.

La situación empeora si centramos nuestra atención en ciudades próximas a la influencia del ambiente marino. La sal del mar es arrastrada por la bruma y los vientos y todos los procesos de corrosión se aceleran. También agravan las cosas los ambientes muy húmedos, con temperaturas altas o las áreas industriales donde prevalece la lluvia ácida.

Claro que la industria automotriz invierte enormes cantidades de recursos en combatir estos problemas y ha desarrollado complejos procesos de pintado para proteger las carrocerías. Se han hecho grandes avances, pero la situación continua dándole dolores de cabeza al propietario del vehículo.

### **1.2.2 BALA PERDIDA**

La industria de armamentos también es presa fácil de la corrosión, dada la gran cantidad de insumos metálicos que emplea. Veamos un caso antiguo, a modo de ejemplo ilustrativo.

A principios del siglo XIX la India era todavía parte del Imperio Británico. Durante esta ocupación que se prolongó durante muchas décadas, la corrosión de las municiones fue uno de los peores enemigos del ejército británico. Los cartuchos explotaban por si solos, muchas veces en el peor momento (aún dentro del arma). Al ser examinados

minuciosamente, se observaban pequeñas fisuras en los cartuchos, que resultaban de procesos de corrosión.

Luego de un intenso trabajo detectivesco, se descubrió que existía una relación entre la velocidad a la que aparecían y crecían las fisuras y la época del año. La frecuencia del problema aumentaba en los meses del monzón, cuando la humedad y la temperatura son altas. Sin embargo, las fisuras no se hubieran iniciado de no haberse guardado la munición en establos, donde el aire estaba saturado de amoníaco, proveniente de la evaporación de la orina de ratas y el estiércol del ganado.

Este un ejemplo típico de una forma de degradación que se denomina *corrosión bajo tensiones*. Se combinan aquí tensiones que quedaron latentes en el material y que fueron originadas durante el proceso que le dio su forma final (en este caso durante la fabricación de la munición) con la presencia de agentes particularmente agresivos, como los compuestos derivados del amoníaco.

### **1.2.3 HORMIGON ARMADO Y DESARMADO**

El hormigón armado es el material más ampliamente empleado en obras civiles y viales con las que se construyen las ciudades y vías de comunicación que las conectan entre sí. El hormigón, también llamado concreto, es una mezcla de cemento, arena, granza y agua. El hormigón armado contiene barras de acero como refuerzo, que aunque no las veamos son las que le dan sustento a las estructuras. Al no estar a la vista, suelen minimizarse las graves consecuencias asociadas a su deterioro. Así, los problemas de corrosión en la industria de la construcción son mucho más frecuentes de lo que imaginamos.

En los casos más comunes las barras de refuerzo se recubren de una capa de óxido rojizo, sobre una superficie bastante extensa. Se trata de un ejemplo de *corrosión generalizada*.

Cuando leemos en el diario que se cayó un balcón de un edificio de la costa atlántica, tomamos conciencia de que la corrosión en el hormigón armado es un problema. No sólo afecta a edificios y puentes, sino que también compromete la seguridad de las personas que los utilizan y de terceros. En el caso de viviendas, la evidencia de problemas de corrosión (manchas de óxido, agrietamientos y desprendimiento de material) provoca adicionalmente la desvalorización del inmueble. Y cuando la corrosión está definitivamente establecida aumentan los costos de mantenimiento.

La corrosión de las armaduras del hormigón armado se manifiesta con particular severidad en las ciudades próximas a la costa del mar. En estas localidades, la durabilidad de las estructuras de hormigón armado es motivo de constante preocupación y suelen existir reglamentaciones municipales que regulan la necesidad de inspecciones periódicas. En la mayoría de los casos, los problemas de corrosión se originan por una combinación de defectos en la ejecución de la obra y en su diseño, empleo de materiales inapropiados y falta de mantenimiento. Inclusive, es muy frecuente observar signos tempranos de deterioro en estructuras que ya han sido reparadas, indicando que reaparece la corrosión de las armaduras al poco tiempo de haber sido efectuada una reparación inadecuada.

### 1.2.4 BACTERIA CORROSIVA: PODEROSA LA CHIQUITINA

Las bacterias son microorganismos que pueden encontrarse en gran cantidad, en muchos medios naturales tales como suelos, agua de mar, agua estancada, aguas servidas y otros. Existen muchísimos tipos de bacterias diferentes en cada uno de estos sistemas y algunos de ellas son participantes estelares en los procesos de corrosión.

Un caso bien documentado, es el de un gasoducto que transportaba gas natural que el 9 de agosto de 2000 estalló en llamas en Nuevo México (EE.UU.). Un gasoducto es una enorme tubería de acero, por las que el gas circula a alta presión, y que sirve para transportarlo desde el lugar de origen hasta su destino. Normalmente, se los entierra en zanjas a aproximadamente 1 metro de profundidad y excepcionalmente, los tendidos van sobre la superficie. En el accidente de Nuevo México, 12 miembros de la misma familia que acampaban en las proximidades murieron como resultado de la explosión. La causa fue un importante problema de corrosión en la pared del gasoducto, que avanzó hasta perforarlo.

El análisis del suelo mostró un alto contenido de bacterias. Las bacterias aparecen muchas veces asociadas a casos severos de corrosión, tanto en estructuras enterradas como sumergidas. Muchas bacterias, producen ácidos como resultado de su proceso respiratorio. Las bacterias sulfato-reductoras, son particularmente agresivas, ya que generan ácido sulfhídrico y este compuesto es especialmente dañino para la mayoría de los aceros. A este tipo de corrosión se lo conoce como *corrosión microbiológica* o corrosión inducida por microorganismos.

### **1.2.5 QUE NO SE AFLOJE TU TORNILLO**

En el mundo moderno, la expectativa de vida de los seres humanos se va alargando progresivamente, lo que nos enfrenta a algunos problemas típicos de una comunidad que envejece. En este contexto, la ciencia de los materiales ofrece un importante aporte a través del diseño de materiales que se pueden usar para fabricar implantes y emplearse así para mejorar la salud y la calidad de vida de quien los necesita. La demanda de materiales que pueden servir para fabricar implantes tiene un perfil con características muy específicas, entre las cuales la resistencia frente a la corrosión es una de las más importantes.

Los implantes con materiales metálicos, ya sean transitorios o permanentes, son ampliamente empleados en cirugías ortopédicas y odontológicas. La implantación de un perno en el consultorio odontológico o el reemplazo total o parcial de cadera que recomienda un traumatólogo, son procedimientos quirúrgicos que se realizan cada vez con mayor frecuencia y menores riesgos. Sin embargo, el cuerpo humano y los fluidos fisiológicos (sangre, plasma, saliva) constituyen un entorno altamente agresivo para los materiales metálicos. Así, es necesario que los materiales elegidos para la fabricación de implantes presenten un riesgo de degradación tan reducido como sea posible.

El deterioro de estos implantes es un proceso altamente indeseable. No sólo puede dañarlo y poner en riesgo su función, sino que a la vez, puede liberar productos de corrosión que son capaces de ocasionar una reacción adversa en el tejido que los rodea. La liberación de productos metálicos es preocupante, ya que los cationes de los metales más usados para este fin son potencialmente

tóxicos (titanio, aluminio, vanadio, cobalto, cromo y níquel). Los productos de corrosión conteniendo estas especies pueden acumularse en órganos tales como hígado, bazo y nodos del sistema linfático en pacientes implantados. Los procesos de corrosión pueden incluir casos de corrosión generalizada, afectando uniformemente a toda la superficie metálica, o bien casos de corrosión en sitios puntuales y pueden ocasionar una reacción adversa que determine el rechazo al implante. Es muy frecuente que los implantes metálicos estén sometidos a cargas mecánicas (como en implante de cadera), lo que puede agravar o acelerar la corrosión. El avance del proceso puede conducir así a respuestas inflamatorias en los tejidos adyacentes, a una falla prematura del implante y a la liberación acelerada de partículas potencialmente perjudiciales para el organismo.

La mayor parte de las aleaciones que se usan en implantes permanentes tienen en común la formación de una película que, actuando como barrera, disminuye su velocidad de corrosión. Esta película impide, en algún grado, el transporte de iones metálicos y de electrones a través de ella, por lo que debe además ser estable y resistir esfuerzos mecánicos. La estabilidad de esta película protectora es central para el exitoso desempeño de un material apropiado para la fabricación de implantes.

Algunos implantes son biodegradables y se elaboran a partir de magnesio, para aplicaciones en traumatología o en cirugía cardiovascular. En estos casos, lo deseable es que el implante se disuelva, es decir se corroa íntegramente.

### **1.2.6 AGUA QUE NO HAS DE BEBER, DÉJALA CORRER**

El agua es un elemento clave a la hora de garantizar un medio ambiente sano y un grado de nutrientes adecuados. Sin embargo, la calidad del agua, su disponibilidad en abundancia y su distribución saludable es todavía un problema hasta ahora sin resolver en muchos países. En particular, las redes de distribución de agua, con una pureza adecuada y con propiedades higiénicas controladas, constituyen una contribución esencial a la salud y la nutrición de la población.

La distribución de agua requiere de tuberías, tanques, bombas, juntas y diversos accesorios de plomería. La selección del conjunto de materiales empleados en estos sistemas es también una cuestión importante, que repercute en la calidad del agua y en sus propiedades. Existen reglamentos que establecen los límites dentro de los cuales se deben mantener los contenidos de ciertos iones metálicos en el agua, por ejemplo en el caso de plomo, cobre, hierro, níquel, zinc, cadmio y aluminio, entre otros. La cantidad de iones metálicos presentes en el agua potable depende del material con el que haya estado en contacto, como pueden ser el acero, acero galvanizado, cobre, latón, bronce, acero inoxidable y materiales plásticos. También los sólidos disueltos y la presencia de microorganismos influyen sobre la calidad del agua. Además, en muchos casos, el grado de acidez del agua no sólo determina la probabilidad de que ocurran fallas originadas por problemas de corrosión, sino que también afecta el nivel de compuestos metálicos presentes en el agua como resultado de procesos corrosivos. Con base en estas consideraciones, uno podría concluir que lo mejor es utilizar materiales plásticos para las cañerías de distribución

de agua y para los tanques de almacenamiento. Sin embargo, tampoco los materiales plásticos son inmunes a sufrir procesos de degradación, y además pueden facilitar la formación de biopelículas o consorcios bacterianos, causando problemas asociados a cuestiones sanitarias que tienen menos probabilidades de ocurrir con materiales metálicos.

### **1.2.7 VEO, VEO... ¿QUÉ LE PASO A ESE MARCO DE VENTANA?**

En la arquitectura moderna, hay una fuerte tendencia a reemplazar la carpintería tradicional de madera por la de aluminio. Las ventajas son muchas y pueden incluir al precio, la facilidad en la colocación, la variedad de colores, menor mantenimiento y algunas más. Las desventajas son pocas, pero la corrosión es una de ellas.

Suele presentarse con el aspecto de filamentos que van creciendo desde el interior al exterior del perfil. Generalmente se debe a una mala preparación de la superficie en algunas de las etapas en que se industrializa y se le da forma al aluminio. También puede aparecer como consecuencia de la porosidad del recubrimiento que se le realiza para darle color o de su falta de adherencia. Por el aspecto que presentan los defectos que aparecen y que se pueden distinguir a ojo desnudo, se la conoce como *corrosión filiforme*.

### **1.2.8 MANCHA ESTATUA. ¡ESTO NO ES JUEGO!**

Las esculturas son obras de arte de las que podemos disfrutar en los museos, pero que también forman parte del paisaje urbano, embelleciendo plazas, paseos y fuentes. Son objetos ornamentales que nos transmiten la sensibilidad de un artista y que contribuyen a hacer más lindas nuestras ciudades. Si bien las hay de madera, granito o piedra, muchas de ellas son o están recubiertas por algún metal. Y resulta que tampoco las obras de arte quedan exentas de ser atacadas por procesos de corrosión. Para empeorar las cosas, los expertos en conservación de arte aseguran que la velocidad del deterioro, por causas naturales, de monumentos históricos antiquísimos nunca fue tan notable como hasta principios del siglo XX.

Una causa que lo justifica es que el aire que respiramos no es el mismo que había antes de que los motores de autos, camiones y colectivos contaminaran nuestro entorno, así como lo hacen las chimeneas de algunas fábricas. Estos contaminantes son generalmente de naturaleza ácida, y arrastrados por la lluvia, aceleran el deterioro por corrosión de las esculturas metálicas.

Y este fenómeno es particularmente notable en ambientes marinos. Las esculturas y las piezas de aleaciones de base cobre sufren de la "enfermedad del bronce", que es un proceso altamente peligroso generado por la existencia de cloruros y humedad en la atmósfera. De modo que tampoco el patrimonio cultural está a salvo de la corrosión.

### 1.2.9 LA ESTATUA DE LA LIBERTAD, PRESA DEL ÓXIDO

Y si hablamos de estatuas famosas, un claro ejemplo es la Estatua de la Libertad, que se encuentra en la ciudad de Nueva York, al sur de la isla de Manhattan en Estados Unidos. Inaugurada el 28 de octubre de 1886, fue un regalo de Francia a los estadounidenses, en conmemoración del centenario de la Declaración de Independencia de los Estados Unidos. Es un icono mundialmente famoso, tanto de la ciudad como de los Estados Unidos en conjunto.

Como se hacía periódicamente, a principios de la década de 1980 se examinó el estado de la Estatua de la Libertad y se encontró que estaba muy deteriorada. Más de un siglo de exposición a la intemperie y la visita de millones de viajeros, habían provocado severos daños por corrosión.

La estatua tiene un armazón interno de acero y una cubierta de cobre. Cuando dos metales disímiles entran en contacto eléctrico se produce un proceso semejante al que ocurriría si provocamos un cortocircuito en una pila. Como resultado de este proceso, uno de los metales se corroe muy rápidamente. Esta es una forma de corrosión muy característica que se denomina corrosión galvánica. En el caso de la estatua, el riesgo de ataque se había previsto durante la etapa de diseño. Entonces, siguiendo las recomendaciones, las uniones entre ambos metales se habían aislado con materiales de la familia de los asbestos. Sin embargo, con el paso del tiempo y por la agresividad propia del ambiente marino, estos materiales aislantes se degradaron y cobre y acero entraron en contacto, disparando el proceso de corrosión. En 1986 la estructura interna se reemplazó por otra de acero inoxidable y los sellos aislantes se realizaron con materiales plásticos del tipo del teflón.

### 1.2.10 NO ME DES LA LATA

Las cocinas domésticas y las industriales también son lugares donde la presencia de metales es abundante y con ella los ejemplos de procesos corrosivos. Imaginemos la siguiente escena. Llegamos tarde a casa, estamos cansados. Es fin de mes y la heladera está casi vacía. Habrá que recurrir a alguna lata de conserva salvadora. Pero algo más iba a salir mal: la última lata de tuco está hinchada y la cena quedará entonces reducida a fideos con aceite.

La hojalata que contiene a los alimentos envasados está constituida por una capa de estaño que recubre a la lata que esta hecha de una aleación de base hierro. Si la capa de estaño se daña, volvemos a tener una situación propicia para que se dispare la corrosión galvánica. El hierro se oxidará y como no hay oxígeno, será el agua quien se acepte los electrones que el hierro libera. El agua entonces producirá hidrógeno gaseoso, y al generarse un gas, aumentará la presión interna, originado el hinchamiento que vimos. Estos procesos pueden deteriorar el gusto y la calidad del alimento conservado. Además, como una lata puede hincharse también como resultado de la presencia de toxinas botulínicas, en general se recomienda tener precauciones con alimentos enlatados o conservados y no consumir el contenido de latas hinchadas

Las reacciones de corrosión que afectan al envase también deterioran la calidad del producto envasado, que incorpora iones metálicos, particularmente estaño, hierro y plomo.

Otro ejemplo interesante relacionando la corrosión con la cocina fue objeto de un trabajo realizado por investigadores de Burkina Faso, que es un país de África occidental.

Se examinó la composición metálica de las ollas producidas en ese país a partir de aleaciones de aluminio reciclado y ampliamente utilizadas por la población rural. Se encontró que el material consistía en 32% de hierro y 10% de cobre. Además, contenía considerables cantidades de otros metales pesados (10% de zinc, 2,5% de plomo, y 0.12% cadmio). Esta composición de metales es muy poco convencional y como resultado del estudio se encontró que provenía del reciclado de restos que contenían aluminio: chatarra de piezas de automóviles, latas de bebida, tubos, y otros. Así, resulta que la pared de la olla se corroe fácilmente por reacción con los alimentos durante la cocción. Como consecuencia, ciertas especies metálicas se mezclan con los alimentos y perjudican la salud de los seres humanos que los consumen. Por tanto, es importante resaltar que sólo las aleaciones de aluminio puro resisten a la corrosión y son apropiadas para ser utilizadas en la fabricación de enseres de cocina.



## CAPÍTULO 2

# No todo es lo que parece

### 2.1 DESCUBRIMOS A LOS QUE SE ESCONDEN CON UNA CAPA INVISIBLE.

Llegado este punto, deberíamos estar convencidos de que los ejemplos de metales que se oxidan son más que abundantes. También deberíamos haber tomado conciencia de que la corrosión se manifiesta de muchas formas distintas a nuestro alrededor. Entonces, este es un buen momento para analizar la situación desde otro punto de vista y preguntarnos si todos los materiales metálicos tienen la misma facilidad para corroerse.

La respuesta es simple: ¡claro que no! Al pensar en corrosión nos vino a la mente la imagen de la herrumbre rojiza propia de hierro y aceros. Si ahora buscamos un ejemplo en el sentido contrario, lo más probable es que nuestra primera imagen de un metal que no se oxida sea un anillo o una medallita de oro.

En el ámbito de la corrosión, a los metales que son como el oro y que difícilmente se corroen, se los conoce como metales nobles. Sólo se atacan cuando entran en contacto con agentes químicos muy específicos, a temperaturas elevadas, en altas concentraciones, o que son particularmente agresivos. Más metales de esta familia son el platino, el iridio y el paladio, entre otros. Estos metales se encuentran en la naturaleza en su forma elemental, es decir que no se requieren complejos procesos metalúrgicos para extraerlos de su mena o del mineral que los contiene. Sin embargo, son también muy poco abundantes en la corteza

terrestre, lo que hace que su precio sea elevado. Se los conoce también como metales preciosos, y son frecuentemente empleados en joyería y orfebrería, justamente por su capacidad de permanecer prácticamente inalterados con el paso de tiempo.

Hay varias formas de saber qué metal o aleación se va a corroer con mayor facilidad. Una primera aproximación puede obtenerse a partir de una lista o ranking de materiales que se denomina **serie galvánica**, como la que se muestra en la Tabla 1. Si bien está pensada para metales sumergidos en agua salada, puede usarse como un primer indicador, aún si los metales están en contacto con otros entornos. Esta serie es una especie de escala, que ordena a los metales ubicando arriba a los que tienen más facilidad para oxidarse (los metales más activos) y abajo a los metales más nobles. La Tabla 1 muestra un ejemplo breve.

Cuando ponemos dos metales en contacto, la tabla nos sirve también para estimar cuál de ellos se atacará primero. Por ejemplo, si colocamos una pieza de hierro o acero en contacto con magnesio en agua salada, como el magnesio es más activo que el hierro, se oxidará primero el magnesio y después, sólo cuando aquel se agote, se atacará el hierro. Esta también es la base de una de las formas más conocidas de enfrentarse a la corrosión. Mientras haya magnesio en contacto con el hierro, éste no se verá afectado por la corrosión. Así, los metales más activos (los ubicados más arriba en la tabla) protegen a los menos activos (que están más abajo en la tabla). Este es fundamento de un método conocido como *protección catódica por ánodo de sacrificio*, del que nos ocuparemos cuando llegue la hora de conocer a los superhéroes que se atreven a hacerle frente a nuestro villano.

**Tabla 1:**  
Serie galvánica típica para metales sumergidos en agua de mar

<b>más activo</b>
magnesio y aleaciones de magnesio
zinc
aluminio y aleaciones de aluminio
acero galvanizado (acero recubierto de zinc)
hierro de fundición
acero
plomo
estaño
cobre
acero inoxidable 304 (activo)
latón (cobre + cinc)
bronce (cobre + estaño)
acero inoxidable 304 (pasivo)
plata
oro
platino
<b>más noble</b>

## 2.2 UNA RECETA DE TRES INGREDIENTES PARA CORROER UN METAL

Sabemos ahora identificar a los metales y aleaciones que son más susceptibles de sufrir corrosión. Pero sólo con el metal no alcanza. El proceso es más un poco más complejo y requiere de la participación de tres actores para poder iniciarse y avanzar:

- 1) Se necesita, por supuesto, el metal. Si está en la parte superior de la Tabla 1, tanto mejor. Tomemos

entonces como ejemplo el zinc. Si queremos un ejemplo más concreto, una chapa galvanizada de un techo (donde hay acero pero recubierto con zinc). Para que el zinc se corra, los átomos neutros que lo componen deben perder electrones, abandonar su forma elemental y convertirse en especies con carga neta (iones). Para conseguir una configuración que minimice su energía y los haga más estables, los átomos pueden perder uno o más electrones dependiendo de cómo están acomodados los electrones en el átomo neutro. Como al perder electrones los iones quedan con carga positiva, a la especie que se forma se la denomina catión. Empleando el lenguaje simbólico de la química, esta etapa se representaría de la siguiente manera:

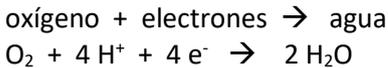
átomo  $\rightarrow$  catión + electrones

Por ejemplo:  $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-}$

A este proceso se lo conoce como oxidación. Por razones históricas, esta denominación se debe a que en los primeros casos investigados el catión no estaba aislado, sino que la reacción conducía a la formación de un óxido (en el ejemplo sería óxido de zinc, ZnO).

- 2) Como los electrones no pueden acumularse en la estructura del metal, se necesita una sustancia que sea capaz de captar esos electrones liberados: el segundo ingrediente de nuestra receta. En los ejemplos más comunes, el metal está en contacto con aire o con algún medio líquido que contiene

aire disuelto. En estos casos, es el oxígeno presente en el aire quien cumple la función de captar los electrones y como resultado del proceso se convierte en agua. Recurriendo nuevamente a los símbolos químicos, el proceso quedaría representado así:



Esta etapa, en la que una especie química acepta electrones, se denomina reducción. Este nombre también tiene raíces históricas, ya que en los procesos metalúrgicos (donde se extrae un metal a partir de un mineral) la captación de electrones está asociada a la disminución (o reducción) en el contenido de oxígeno en el mineral. Este concepto luego se extendió a todos los procesos donde una de las sustancias que reacciona, acepta electrones.

- 3) Pero un metal y un entorno aireado tampoco son suficientes para que el proceso de corrosión avance. Así como los electrones no pueden acumularse en el metal, tampoco los cationes puede acumularse en la interfase entre el metal y medio aireado por lo que se necesita un tercer ingrediente, que es por cierto abundante y barato: ¡agua! El agua tiene la capacidad de disolver los iones que se generan, permitiendo que se alejen del sitio en que se forman. La presencia de agua hace posible que los iones se muevan y así se cierra también el circuito de cargas positivas, que se producen en la oxidación y se consumen en la reducción. Y a no pensar que

se necesitan grandes cantidades de agua, basta una pizca de humedad en el ambiente para que la lista de ingredientes necesarios para esta receta esté completa.

En resumen nuestra receta necesita

- Un metal ubicado en los dos tercios superiores de la Tabla 1 (por ejemplo Zn)
- Una especie que acepte los electrones (por ejemplo el oxígeno que está en el aire)
- Un medio líquido que pueda disolver iones (por ejemplo agua)

Como en cualquier receta de cocina con pocos ingredientes, todos son importantes. En el caso de la corrosión, los tres son imprescindibles y si falta cualquiera de ellos, el metal no se atacará. En efecto, los métodos de protección que presentaremos cuando desenmascaremos a los superhéroes de esta historia, se basan en impedir la acción de alguno de estos tres participantes.

Por ejemplo, si el medio líquido es aceite en vez de agua, los iones no podrán disolverse. Como bien saben en muchos talleres mecánicos, los metales se conservan libres de óxido por más tiempo, si se los embadurna con una capa de aceite o grasa.

Con un principio parecido funcionan algunos recubrimientos anticorrosivos. Una película de pintura sobre un metal puede actuar como una barrera física, impidiendo el contacto directo entre el metal y el oxígeno. Claro que para que sea eficiente, hay que tener cuidado con las imperfecciones, defectos o poros, ya que el oxígeno es

un gas y las pequeñas moléculas pueden atravesar cualquier resquicio que hayan quedado sin recubrir.

### 2.3 LA VÍCTIMA MÁS FRECUENTE: EL ACERO

El acero es una aleación (es decir una mezcla en estado sólido) donde los principales componentes son hierro y carbono. El contenido de carbono puede variar entre alrededor de 0,05% y normalmente hasta menos de un 2% en peso. Muchas veces otros elementos de aleación específicos, tales como el cromo o el níquel, se suman a la mezcla para obtener alguna propiedad determinada. Existen muchos tipos de aceros y también muchas maneras de agruparlos y clasificarlos (por su composición, su dureza, su ductilidad, su resistencia a la abrasión o alguna otra propiedad). En términos generales, podemos mencionar las siguientes categorías: **aceros al carbono, aceros aleados, aceros ultra-resistentes de baja aleación y aceros inoxidables.**

La gran mayoría de todos los aceros con los que tenemos contacto en nuestra vida cotidiana son aceros al carbono. Además de carbono, estos contienen menos de 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Muchísimos productos diferentes son fabricados con aceros al carbono: componentes industriales, carrocerías de autos, el acero de refuerzo que se emplea en la construcción, cascos de buques, resortes de somieres, rejas y hasta horquillas para el cabello.

Los aceros aleados contienen una pequeña proporción de ciertos elementos que participan de la composición de la aleación (aleantes minoritarios) como vanadio y molibdeno entre otros, además de más cantidad de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono. Se

los utiliza, por ejemplo, para fabricar engranajes y ejes de motores, patines o herramientas de corte.

Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados por que contienen menores cantidades de los elementos más caros. Sin embargo son muy resistentes porque se los somete a un tratamiento especial, no tanto por su composición química.

Los aceros inoxidable contienen no menos de un 10% de cromo, además de níquel y otros elementos de aleación, que les confieren la propiedad que los identifica: su gran resistencia a la oxidación, aún en ambientes húmedos, ácidos y químicamente agresivos. Debido a que su superficie es brillante se los emplea muchas veces con fines decorativos en arquitectura, objetos de arte y bijouterie. Se los utiliza mucho para las tuberías y tanques de refinерías de petróleo, en plantas químicas y de alimentos, para los fuselajes de los aviones o para instrumental quirúrgico. Y ciertamente está presente en todas nuestras cocinas, ya que ollas y mesadas suelen ser de acero inoxidable, dado que no daña ni contamina los alimentos y puede limpiarse con facilidad.

## **2.4 UNA CAPA INVISIBLE PROTEGE AL ACERO INOXIDABLE**

¿Se preocupará mucho un ama de casa obsesiva de la limpieza al enterarse que todas sus ollas de acero brillante están en realidad completamente oxidadas? Pues así es. Todos los tipos de acero se oxidan fácilmente. Sin embargo, existe una diferencia sustancial entre el óxido que se forma sobre el acero al carbono y el que se forma sobre el acero inoxidable. Sobre el acero al carbono aparece esa capa de herrumbre rojiza que nos resulta tan familiar. Es una capa

gruesa, porosa, rugosa, coloreada y que se desprende fácilmente. En cambio, la película de óxido que se forma naturalmente sobre los aceros inoxidable al contacto con aire, es transparente y por lo tanto ¡invisible! Además es compacta, muy delgada y muy adherente, no se salta ni se despegas con tanta facilidad como lo hace la herrumbre. Esta capa transparente, está formada principalmente por óxidos de cromo y también contiene óxidos de hierro y de níquel en menor proporción. Cuando está limpia y adecuadamente formada, es inerte en la mayoría de los entornos. Cumple casi el papel de una barrera, impidiendo que otros agente agresivos entren en contacto con la aleación subyacente. Cuando una capa de óxido tiene estas propiedades, se la conoce como capa pasiva o pasivante, por lo que en este estado se dice que el acero inoxidable esta “pasivo”. En los aceros inoxidable, esta película es muy durable y se forma por sí sola cuando la aleación entra en contacto con aire u otro ambiente oxidante, tales como agua aireada o sustancias ácidas. Si como resultado del uso la película se dañara, puede autorepararse rápida y automáticamente. Para tranquilidad del ama de casa, si se pegó la comida, la olla puede limpiarse tranquilamente frotándola con una esponja de acero o de bronce y la película pasiva se regenerará sola.

## **2.5 ¿POR QUÉ EL ALUMINIO SE FUE PARA ARRIBA?**

Es posible que la posición que ocupa el aluminio en la Tabla 1 haya despertado la curiosidad de algún lector. Parece que se trata de un material muy susceptible de sufrir corrosión, sin embargo lo vemos a diario en cerramientos arquitectónicos o en ollas y sartenes y no luce corroído.

Igual que en el caso del acero inoxidable, el óxido de aluminio forma una capa pasiva con las muy convenientes propiedades de ser delgada, adherente, compacta, aislante y translúcida. No es tan transparente como la del acero inoxidable, por eso y por que es más blando, el aluminio no brilla tanto como aquel.

Sin embargo, cabe aclarar aquí que el aluminio que se industrializa como perfiles para diferentes aplicaciones, ha sido sometido a un tratamiento especial que se conoce como anodizado. Consiste en aplicar una corriente continua de baja tensión, que promueve la oxidación artificial del aluminio. Se mejoran así las propiedades de la capa pasiva que se forma naturalmente y se la hace más uniforme, homogénea e impermeable. Así cumple mejor su función de proteger al metal base, otorgándole al material tratado mayor dureza superficial, una mejor aislación eléctrica así como mayor resistencia a la abrasión, al desgaste y a la corrosión. Durante este tratamiento, también es frecuente agregar algunas sales que le dan color a la película de óxidos que se forma en la superficie.

## CAPÍTULO 3

# Mejor es prevenir que curar

### 3.1 COSTOS: ¡NO HAY PREPAGA QUE LOS CUBRA!

El psicoanálisis y corrosión tienen algo en común: el primer paso hacia el éxito en el tratamiento es reconocer que existe un problema, y el segundo... tener dinero para afrontar los costos asociados.

Específicamente en el caso de los procesos corrosivos, una vez identificado el villano, y ya dispuestos a combatir al enemigo, es importante contar con el presupuesto adecuado. Ninguna lucha es gratis.

Pero en muchas ocasiones, el primer escollo a salvar es reconocer que enfrentamos a un enemigo y disponernos a darle combate. El grado de conciencia que cada uno de nosotros tiene respecto a cómo y en qué medida los problemas de corrosión afectan nuestra vida cotidiana no es igual para todos. Dependiendo de la actividad que desarrollemos, algunos de nosotros estaremos más atentos o más entrenados para reconocerlo que otros.

Aunque no siempre los percibamos, los daños por corrosión han sido la fuente de serios problemas sociales. Las fallas que se producen en los sistemas de transporte de gas, agua y electricidad, en las cañerías por donde circulan fluidos para calefacción o refrigeración o en componentes que afectan las comunicaciones, son todos ejemplos de sucesos que impactan negativamente sobre la calidad de vida de grandes segmentos de la población, afectando a barrios, ciudades o países enteros.

En ocasiones, cuando el daño es particularmente severo o sus consecuencias son muy impactantes, podemos

encontrar casos de corrosión que aparecen publicados en los medios masivos de comunicación. Estas situaciones habitualmente reflejan una falla grave. Por ejemplo, podemos encontrarnos con que un puente sobre alguna autopista ha colapsado por ataque corrosivo del acero de refuerzo en el hormigón armado o porque se han atacado los tensores o los medios de sujeción si se trata de un puente colgante. Otro caso que suele ser noticia es el derrumbe de balcones en voladizo, también consecuencia frecuente de problemas de corrosión en el acero de construcción. Podemos enterarnos por los diarios del colapso de alguna torre de transmisión que produce cortes en el suministro eléctrico, o sobrecargas en la red de transporte de energía. También puede llegarnos a través del noticiero un derrame de crudo producido por una fisura en un oleoducto. Vemos también con más frecuencia de la que nos gustaría un accidente en un parque de diversiones o en los juegos de una plaza, producido por una falla en los materiales. Y la lista podría continuar ya que son muchos los problemas graves originados por el fenómeno de la corrosión.

Los efectos de la corrosión en nuestra vida diaria pueden subdividirse entre los que se consideran directos y los que son indirectos.

- Los efectos directos son aquellos que afectan la vida útil de nuestros bienes y que pueden perjudicar su servicio o condiciones de operación, a veces en tal grado que en un caso extremo nos vemos obligados a sustituirlos por bienes nuevos.
- Los costos indirectos de la corrosión incluyen algunos aspectos económicos, pero también costos asociados a problemáticas ecológicas y sociales.

Para marcar la diferencia con un ejemplo sencillo, pensemos en la puerta de un auto que haya sufrido un ataque corrosivo. Llegado el punto en que decidamos reemplazarla, el costo directo incluirá el valor de una puerta nueva y la mano de obra del taller de chapa y pintura. Los costos indirectos están asociados a los que demanden la adopción de una forma diferente de transporte (taxi, ómnibus u otro). También habrá ciertos perjuicios sobre nuestra calidad de vida, dado que una forma alternativa de transporte seguramente influirá negativamente sobre nuestro presupuesto o bien nos insumirá más tiempo (que restará al que empleamos para el ocio, el descanso, la familia o para realizar actividades recreativas). Es posible que debamos modificar algunos hábitos, como podría ser la visita semanal al hipermercado, debiendo optar por las compras en el almacén del barrio que pueden hacernos gastar más u obligarnos a usar más dinero en efectivo. Y no podemos olvidar el daño al medioambiente, asociado a la chatarra generada por la puerta deteriorada que terminará arrumbada en algún desarmadero de autos. Muchas veces, son los costos indirectos a los que se considera básicamente responsables de la creciente toma de conciencia del problema de la corrosión.

Los costos indirectos pueden llegar a ser bastante más altos que los directos, particularmente cuando una falla se hace pública y perjudica la imagen comercial de una empresa importante o cuando conlleva daños ambientales. Por ejemplo, el 18 de noviembre de 2002, el buque petrolero "Prestige" navegó con una grieta de 40 metros en su casco y como resultado, entre 12.000 y 15.000 toneladas de combustible fueron vertidos al mar. Finalmente el buque se partió en dos, a 133 millas del cabo Fisterra (al NO de España), y se hundió con 77.000 toneladas de fueloil en sus

tanques. Transportaba un combustible del tipo pesado, por su alto contenido en azufre. Su hundimiento provocó un enorme desastre ecológico, ya que se calcula que unas 64.000 toneladas de combustible fueron derramadas al mar, afectando a unos 900 km de costa en el norte de España y sudoeste de Francia con sucesivas mareas negras. La aparición de fisuras en el casco hizo emerger el crudo a la superficie y provocó la aparición de nuevas grietas por efecto de la presión. Si bien se realizó un importante y costoso operativo de limpieza y recuperación, se causó un daño irreparable al ecosistema marino. La presencia continua de este tema en la prensa en los días que siguieron al accidente tuvo un fuerte impacto en la opinión pública.

### **3.2 PROBLEMAS Y COSTOS EN ESCALA INDUSTRIAL**

Entre todos los problemas que pueden estar originados en procesos de corrosión, los que ocurren en las plantas industriales (como las de generación de energía eléctrica o de procesos químicos o metalúrgicos) ocupan los primeros puestos en la lista de problemas graves. Una falla puede hacer que sea necesaria una inhabilitación parcial o total de estas plantas (lo que se llama una parada de planta no programada). En estos casos, las consecuencias indirectas son muchas y los efectos económicos son importantes. Algunas de ellas se asocian con el material, pieza o cañería afectada:

- Reemplazo de la parte corroída.
- Análisis de falla y rediseño para prevenir la repetición del caso

- Mantenimiento preventivo de la pieza de reemplazo
- Necesidad de parar el equipo, la línea de producción o incluso de la planta completa, debido a las fallas por corrosión
- Eventual contaminación de un producto final o de algún intermediario del proceso productivo

Siguiendo con los costos indirectos, también los efectos sociales pueden ser severos:

- El lucro cesante: se denomina así al conjunto de costos asociados a mantener una planta que no está operativa (hay que pagar los salarios pero no hay producción para vender), así como los problemas de mercado que pueden generar la falta de abastecimiento a los clientes y las potenciales ventas perdidas, junto con el mercado que ganará un competidor para cubrir la demanda no satisfecha.
- Pueden ocurrir accidentes que pongan en riesgo la integridad física de operarios y personal de planta, por ejemplo cuando la falla puede ser responsable de incendios, explosiones o colapso de andamios u otras construcciones. Si hay involucradas fugas de productos tóxicos, el accidente puede quedar circunscripto a la planta en cuestión o afectar también el entorno, dependiendo del caso concreto.
- Puede verse comprometida la salud del usuario final del producto que se procesa. Tal es el caso cuando hay posible contaminación debido a pérdidas en equipos o tuberías corroídos, así como también el

propio producto de corrosión puede actuar como contaminante.

- Se hace un mal uso de los recursos naturales, como los metales y combustibles empleados para manufacturar la pieza que terminará siendo chatarra.
- Como el material corroído no presenta buena apariencia, el producto final puede perder valor comercial.
- Es posible que se vea afectada la imagen comercial de la marca.

Por supuesto, todos los efectos que hemos denominado “sociales” también tienen que ver con la economía. Es por eso que hay muchas razones para buscar alternativas para controlar la corrosión. Así las cosas, cuando se hace la evaluación económica de proyectos donde el riesgo de corrosión no puede ser desconocido, hay que considerar un horizonte de tiempo extenso para tomar decisiones acertadas. Es frecuente que al realizar el análisis económico de proyectos nuevos se cometa el error de comparar solamente el costo inicial de los componentes metálicos involucrados, sin tomar en consideración ni contrastar el total su vida útil.

### **3.3 CUIDEMOS EL PLANETA: LOS METALES SON RECURSOS NO-RENOVABLES**

Como sociedad, enfrentamos el desafío por disminuir las emisiones de dióxido de carbono y hacer un uso más eficiente de los recursos naturales. Los metales son una parte importante de los recursos no renovables que

encontramos en la corteza terrestre. Los metales y los minerales de los que provienen son el ejemplo de un recurso limitado, por lo tanto la necesidad de adoptar una economía de reciclaje se está haciendo cada vez más imperiosa. Además, la obtención de los metales también tiene un impacto potencialmente negativo asociado a los procesos de minería, extracción y refinación. Al mismo tiempo, una vez que la parte o pieza llegó al fin de su vida útil y es necesario desecharla, algunos metales tienen implicaciones preocupantes para la salud.

Como se ha establecido repetidamente, la corrosión destruye a los metales al convertirlos en óxidos, u otro tipo de productos. Así las cosas, la corrosión va en detrimento del suministro global de metales, al atacar estructuras o partes que están en servicio, de modo tal que su reemplazo consume una porción de la reserva mundial de los recursos naturales de que dispone el planeta. Para defender el medioambiente, es importante cuidar las reservas de metales, no solamente para conservar a los minerales, sino también para reducir la cantidad de desperdicios sólidos que se acumulan en sitios de relleno o en centros de reciclado. En el mismo sentido, extender la vida útil en servicio de un producto metálico nos evita tener que manufacturarlo nuevamente, de manera que se ahorra energía y se contribuye a disminuir las emisiones gaseosas nocivas.

La naturaleza nos ofrece una amplia variedad de “materias primas”. Los minerales constituyen el mayor conjunto de estos recursos y de ellos es posible aislar un total de más de sesenta elementos metálicos diferentes. La tecnología moderna es totalmente dependiente de cuatro de ellos: 1) el hierro, que con pequeñas cantidades agregadas de otros metales forma los diferentes aceros; 2)

el aluminio, que es utilizado ampliamente en el transporte; 3) el plomo, que se emplea para las baterías que nos permiten almacenar energía; y 4) el cobre, que posibilita que se transmita la corriente eléctrica del sitio donde se genera hasta el lugar donde el usuario la consume y también dentro de los dispositivos electrónicos. Poco menos importantes pueden ser considerados otros cuatro elementos metálicos: el cromo y níquel, que junto con el hierro constituyen el acero inoxidable; el zinc que ayuda a combatir la corrosión de diversos metales y finalmente el estaño, que es esencial en la industria electrónica moderna.

En vista de su relevancia e impacto en la vida moderna, la reserva mundial de metales debe ser evaluada considerando que hay dos aspectos importantes que es necesario tener en cuenta: cuánto nos queda y dónde se encuentra.

La primera cuestión, evidentemente se relaciona con la cantidad de los minerales (yacimientos o menas) de los que proviene cada metal que actualmente existe en la naturaleza. Aunque no es tarea fácil, existen diversos estudios en los que se ha intentado evaluar las reservas. Algunas estimaciones globales se ofrecen en la Tabla 2. Los valores muestran claramente que las reservas son limitadas. Cabe aclarar que los que se muestran son valores estimados, que se van modificando en cuanto se descubren nuevos yacimientos, a medida que va cambiando la demanda así como también al intensificarse los esfuerzos por disponer de procesos de reciclado más eficientes. En tanto se apliquen métodos más eficientes de protección contra la corrosión se podrá también contribuir a conservar estos recursos naturales.

**Tabla 2**  
Años de reservas estimados en 1975, 1995 y 2005  
para diferentes metales

<b>Metal</b>	<b>Años de reservas estimados en 1975</b>	<b>Años de reserva estimados en 1995</b>	<b>Años de reserva estimados en 2005</b>
Aluminio	185	162	> 100
Hierro	110	77	55
Níquel	100	43	40
Cobre	45	22	28,7
Zinc	23	16	20

La segunda cuestión relacionada con las reservas mundiales es la ubicación geográfica de ciertos yacimientos o menas de elementos metálicos. Las naciones más industrializadas (los Estados Unidos, Europa occidental y Japón) importan entre el 90 y el 100 % de sus requerimientos totales de cromo, cobalto, manganeso así como metales de la familia del platino. Estos metales se denominan con frecuencia “materiales críticos”. Para que estas naciones sean autosuficientes, se trabaja permanentemente en el desarrollo de nuevos materiales y aleaciones resistentes a la corrosión que contengan sustitutos de cobalto y cromo. Por ejemplo, en 2006 China anunció su plan de concentrar reservas de varios metales incluyendo uranio, cobre, aluminio, manganeso y otros, considerados valiosos para dicho país. Los metales y los minerales de los que provienen deben pensarse entonces como recursos geopolíticos estratégicos.

Sin embargo, existen otras reservas de metales además de las que están localizadas en yacimientos geológicos. Existe un grupo menos estudiado de reservas que se denomina “antropogénico”. Estas incluyen el

conjunto de metales que está actualmente en uso o en proceso de descarte. El descarte puede tener asociado una etapa de reciclaje o bien puede quedar simplemente abandonado en la naturaleza. Por ejemplo, existen grandes extensiones de cables submarinos actualmente en desuso que no se han recuperado ni reciclado. Se los considera reservas “hibernantes” porque son potencialmente reutilizables pero su recuperación no es económicamente viable en este momento.

Es importante entonces conocer en su conjunto las reservas disponibles de metales y utilizar esta información para generar escenarios que regulen el uso, el descarte y la reutilización de los metales.

### **3.4 ¡UN NÚMERO AHÍ, POR FAVOR! ¿QUIÉN DA MÁS?**

El panorama que enfrentamos al pensar en los costos es muy complejo, ya que hay que considerar de alguna manera a los múltiples y diversos factores que intervienen en la definición del problema. Pero en última instancia, cuando se trata de costos, es necesario poner números para que el cuadro de situación esté completo. Claro que aquí las cifras son tan grandes que la mayoría de nosotros no llega a hacerse una idea concreta de su magnitud.

Por otro lado, hay pocos análisis de costos cuyos resultados sean públicos, pero con algunos ejemplos será suficiente.

Los últimos estudios conocidos llevados a cabo sobre el impacto económico de la corrosión muestran resultados alarmantes. Entre 1999 y 2001, los costos totales directos por año que pudieron asociarse a problemas de corrosión en los Estados Unidos alcanzaron a aproximadamente 276

mil millones de dólares, algo así como 3,1% del Producto Bruto Interno (PBI) de ese país. De la misma manera, en Perú, se ha hecho público que en el año 2000 las pérdidas por corrosión representaron 8% del PBI, es decir, aproximadamente 1.200 millones de dólares. En España, solamente el costo de la corrosión del acero supone el 2,2% del PBI (más de 25.000 millones de euros) mientras que el costo de la corrosión de todos los materiales metálicos en conjunto, supera los 48.000 millones de euros. En Venezuela la corrosión del acero representa una pérdida el 4% del PBI. Estimaciones efectuadas en otros países industrializados dieron resultados muy parecidos (1,8-4,2% del PBI). Sin embargo, pocos estados promueven inversiones en investigación científica y desarrollos tecnológicos relacionados con la protección contra la corrosión.

Desde una perspectiva globalizada, el costo de la corrosión de los metales se estima en torno al 6% del PBI mundial (un 3% de costos directos y otro 3% de costos indirectos).

Para determinar el impacto de la corrosión con otros parámetros, podemos partir de valores de consumo promedio anual. En un país como Venezuela, con gran presencia de industria consumidora de acero (como lo es la industria petrolera), el consumo promedio *per cápita* anual de acero al carbono es de 122 kg, lo cual representa un consumo nacional anual de 2.900.000 toneladas. De este total, la corrosión destruye un 25%, o sea 725.000 toneladas anuales. ¡Eso equivale a 9 kg de acero que se oxidan por segundo!

Las cifras son alarmantes y muestran claramente lo necesario e importante que es estudiar este fenómeno en mayor profundidad.



## **CAPÍTULO 4**

# **Tipos de corrosión**

### **4.1 CORROSION: ALGUNAS PISTAS PARA CONOCERLA MÁS Y ENTENDERLA MEJOR**

Nuestro villano es un maestro en el arte de disfrazarse. Se puede presentar de muchas maneras diferentes, por eso es importante conocerlas para poder detectarlo y así controlarlo a tiempo.

Vamos a mostrar a continuación algunas de estas muchas formas en que puede aparecer la corrosión. Sin la intención de abarcar todas las posibilidades ni de describirlas en profundidad o con rigor académico, discutiremos los rasgos distintivos de aquellas que son más habituales.

### **4.2 FORMAS EN QUE SE PRESENTA LA CORROSIÓN**

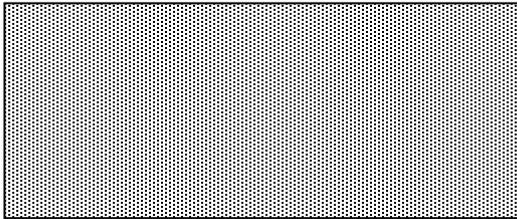
#### **4.2.1 CORROSIÓN GENERALIZADA**

ABRAN CANCHA...

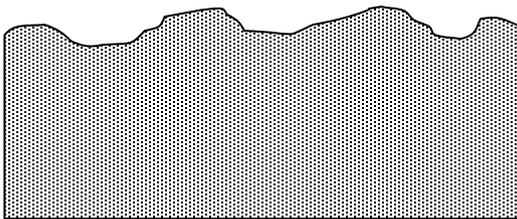
Se trata de los casos en que la corrosión se produce de manera pareja y uniforme, atacando prácticamente toda la superficie por igual. El metal se oxida de forma bastante homogénea y regular a lo largo de la mayor parte de la superficie, en la interfase entre el metal y el medio que lo rodea. El material pierde una delgada capa superficial, cuyo espesor estará determinado por la velocidad con que se produce el ataque y también por el tiempo durante el que haya sido expuesto al medio agresivo.

Si lo medimos en términos de la cantidad de masa que el material pierde como resultado del proceso corrosivo, esta forma de ataque es la que gana el concurso. La masa neta perdida es mucha. Sin embargo, la corrosión uniforme o generalizada no es la que más preocupa a los diseñadores ni a los usuarios que se enfrentan al problema. Como la velocidad de avance puede calcularse con bastante precisión, es frecuente sobredimensionar las piezas para compensar el material que se sabe que se va perder.

**Antes**



**Después**



Este tipo de corrosión se caracteriza, en cambio, por producir un deterioro estético considerable, que puede ser más o menos importante dependiendo de la aplicación específica de la pieza o parte metálica de que se trate.

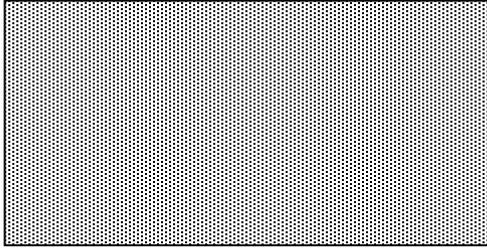
Esta forma de corrosión es bastante común en los metales que están expuestos a la atmósfera, particularmente en ambientes industriales o zonas próximas a la costa del mar. También aparece con frecuencia cuando el ambiente es suelo, hormigón y aguas estancadas o salitrosas. En la lista de los metales que la sufren podemos incluir al hierro y aceros (con su característica capa de herrumbre rojiza o negra que podemos ver en rejas o en acero de construcción que ha quedado a la intemperie), al cobre (que se recubre fácilmente de una patina verdosa que es muy vistosa en las estatuas y monumentos) y a la plata (y su particular ennegrecimiento, pesadilla de cualquiera que esté dispuesto a hacer brillar la platería que heredó de la abuela).

#### **4.2.2 PICADO**

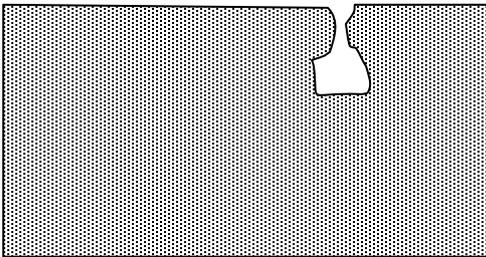
TODOS TENEMOS ALGÚN DEFECTO...

Se trata de un tipo de ataque que se caracteriza por estar localizado en un área bien delimitada y generalmente pequeña. En el caso de una cañería, por poner un ejemplo, lo que comienza con una mancha apenas perceptible, del tamaño de la cabeza de un alfiler, puede desembocar bastante rápido en una perforación de la pared del caño. Las regiones vecinas al punto de ataque suelen permanecer intactas, aunque en algunas ocasiones las picaduras aparecen muy próximas unas de otras y dan la apariencia de una superficie rugosa.

**Antes**



**Después**



Esta es una forma muy peligrosa de corrosión, porque el ataque afecta un sector pequeño, pero avanza implacablemente y en profundidad. La cantidad de masa que el material pierde puede ser insignificante, pero aun así las consecuencias son severas. Si se trata de una caldera o de un recipiente que contiene un gas a presión, por ejemplo, puede llegar a perforar completamente la pared, produciendo daños catastróficos. Lo mismo si la picadura ocurre en la pared de un tubo o cañería. Los casos más frecuentes de esta forma de corrosión se dan, típicamente, en partes metálicas sumergidas en agua de mar.

No es para nada fácil anticipar el lugar específico en que se va a producir una picadura. Tampoco es trivial detectarlas. La corrosión por picado puede ir acompañada

de cierto grado de corrosión generalizada y la acumulación de productos de corrosión en la superficie puede enmascarar el inicio de la picadura.

Los materiales más susceptibles a sufrir este tipo de ataque son aquellos protegidos por una película pasiva. Si por alguna razón, esta película tiene algún defecto, se inestabiliza o se disuelve localmente, allí es donde aparece la picadura. Muchas veces, el picado se inicia en los puntos del metal o aleación donde existen heterogeneidades en la superficie, que pueden estar asociadas a la composición, a la estructura metalográfica o a la cristalina o a la presencia de imperfecciones en el acabado superficial. La aparición de picado también está claramente relacionada con la composición del medio con el que el material se encuentre en contacto. Por ejemplo, los iones cloruro presentes en el agua de mar y el ambiente marino son especialmente agresivos, y con mucha frecuencia se los puede identificar como uno de los principales factores que determinan la aparición de picado en diversos materiales metálicos tales como aceros y aluminio, entre otros.

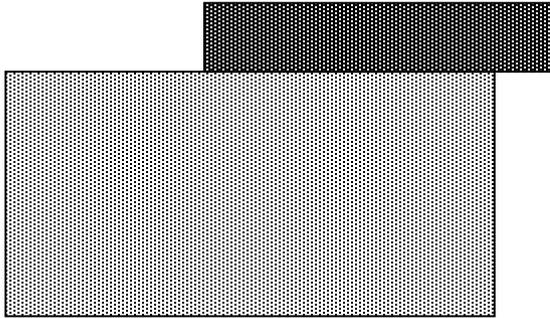
A pesar de su excelente resistencia a la corrosión generalizada, los aceros inoxidable son particularmente vulnerables al ataque por picado. Hay aceros inoxidable especiales a los que se les incorpora níquel, molibdeno u otros elementos de aleación para volverlos más resistentes, pero ningún acero inoxidable es completamente inmune en todas las condiciones de servicio posibles.

La corrosión por rendijas es otra forma de corrosión localizada que está muy emparentada con el picado. Será fácil ver las diferencias y similitudes a partir de un ejemplo. Supongamos que una plancha de acero inoxidable se mantiene en su lugar por medio de un remache, como en el tambor de un lavarropa. Nos damos cuenta de que la

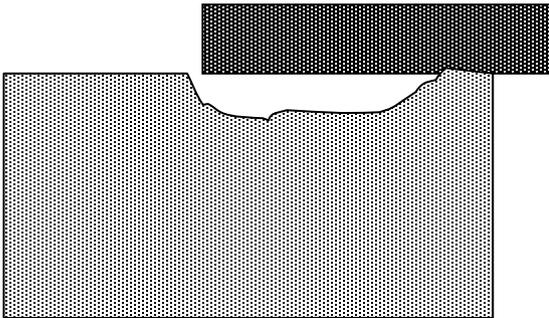
corrosión ha tenido lugar por debajo de la cabeza del remache. Ocurre que en la unión de los dos metales se ha creado una grieta (o una rendija) que ha permitido que dentro de ella el agua se acumule y se estanque. Ese líquido retenido tendrá una composición diferente de aquel que ocupa el resto del tambor. Habrá menos oxígeno disuelto y menor renovación, por lo que los agentes agresivos (como los componentes de la lavandina y los detergentes) se irán acumulando. Esta es la situación que dispara la corrosión por rendijas (también conocida como crevice), y es muy semejante a la que se produce en el fondo de una picadura, donde también hay un líquido estancado que se va concentrando paulatinamente en los agentes agresivos, acelerando el avance del proceso corrosivo.

La corrosión por rendijas ocurre entonces cuando hay un pequeño espacio abierto (grieta o hendidura) entre dos metales o entre un metal y un no metal. Así, un caso de corrosión por rendijas puede ser el resultado de un diseño defectuoso o bien puede ser accidental. Los casos atribuibles al diseño incluyen toda clase de uniones (juntas, bridas, pernos, roscas, remaches, y otros) así como situaciones que conllevan a la acumulación de depósitos o crecimientos de colonias de microorganismos, que generen zonas de acceso restringido y que dificulten la renovación del medio líquido. Una causa accidental normalmente está asociada a la aparición de alguna grieta o fisura provocada por una falla del material, un defecto de fabricación o una sollicitación mecánica extrema.

**Antes**



**Después**



### 4.2.3 CORROSIÓN GALVÁNICA

TE DIJE QUE NO TE JUNTES CON ESE...

La corrosión galvánica es una de las que más frecuentemente podemos encontrar. Es una forma de corrosión acelerada que aparece cuando se ponen en contacto eléctrico dos metales distintos y la unión queda inmersa en un medio conductor de iones (por ejemplo: agua!). Inclusive, puede darse cuando hay contacto con

dos piezas del mismo material pero en distinto estado: por ejemplo cuando se reemplaza un codo en una cañería, la parte vieja estará seguramente pasiva, con una capa protectora consolidada y el codo de repuesto puede en cambio estar brillante y bien pulido (y por tanto activo). Se puede generar entonces un par galvánico (o cupla), entre acero pasivo y acero activo.

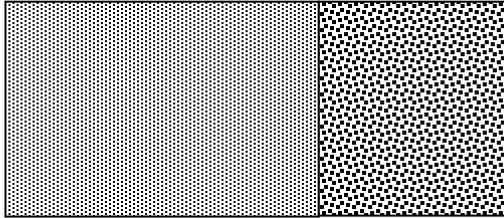
Si volvemos a mirar la Tabla 1, podemos asegurar que cuanto más alejados entre sí estén los dos materiales que entran en contacto, más probable y más severo será el ataque del metal más activo. Sin embargo, no hay que perder de vista que esa lista es válida en agua de mar y pequeños cambios en la composición del medio pueden tener efectos importantes sobre al avance de la corrosión. Si el medio no es agua de mar, hay que consultar la tabla apropiada. Además, las relaciones entre las áreas y la geometría de las piezas o partes involucradas también juegan un rol significativo en este tipo de ataque.

Esta forma de corrosión puede ser uniforme o localizarse en la unión entre ambos materiales metálicos, dependiendo de las condiciones. La corrosión galvánica puede ser particularmente grave cuando las películas pasivas no se forman o bien son eliminadas por la erosión que produce un líquido en movimiento.

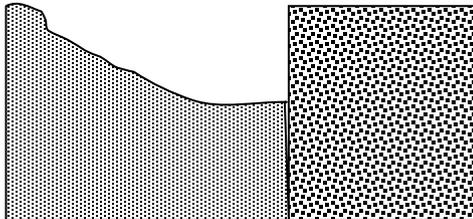
La corrosión galvánica suele convertirse en un problema recurrente en aquellas aplicaciones que requieren del uso de numerosos materiales diferentes. Por ejemplo en la industria naval se utilizan diversos tipos de metales y aleaciones como son acero en el casco, bronce en las hélices, acero inoxidable en los ejes del motor, aluminio en los mástiles y cobre en el cableado eléctrico. En estos casos, es imprescindible asegurar que ningún metal esté en

contacto con otro distinto, aislándolos entre sí de manera adecuada.

**Antes**



**Después**



Aún a pesar de todos los recaudos, las embarcaciones suelen ser presa frecuente de la corrosión galvánica. De hecho, el primer caso bien documentado que hace referencia a este tipo de corrosión se da en el ámbito naval. La corrosión galvánica fue una pesadilla para la armada británica del siglo XVIII. Tanto es así que en el año 1761, los británicos realizaron un experimento en su fragata HMS “Alarm” para intentar paliar los efectos que producía la adherencia de cierta clase de moluscos (conocidos también

como gusanos de la madera) sobre los cascos de madera de la flota. El molusco parecía imparable y obligaba a realizar constantes reparaciones, con enormes costos para la armada. El experimento consistió en cubrir toda la obra viva del barco con planchas de cobre. Esto cumplía varios propósitos: impedir la entrada del gusano y mejorar el deslizamiento del casco. Como el cobre tiene un acabado más liso que el de la madera, se producía menos fricción, al tiempo que se impedían las incrustaciones de moluscos por su carácter altamente tóxico. Dos años más tarde se varó la embarcación para comprobar los resultados del experimento. El gusano no había penetrado en la madera, pero la cubierta metálica se había desprendido del casco en muchos sectores porque los clavos de hierro que fijaban las planchas de cobre a la madera se habían corroído en gran medida. Claramente tenemos aquí dos metales diferentes (el del clavo y el de las planchas) en contacto eléctrico entre sí e inmersos en medio muy conductor, como es el agua de mar. Un examen más detallado reveló que algunos de los clavos habían sufrido un ataque menor porque parte del papel encerado con que venían forradas las planchas de cobre no había sido retirado por completo. El olvido o la distracción de algún operario hicieron posible que existiera un material aislante como la cera, entre los dos metales, capaz de prevenir el acoplamiento galvánico entre cobre y acero. El informe posterior dejó establecido que el cobre y el hierro, sumergidos en agua de mar, no podían estar en contacto directo ya que el cobre hacía que el hierro se corroiera.

#### **4.2.4 CORROSIÓN INTERGRANULAR**

##### **PROBLEMAS EN LA FRONTERA...**

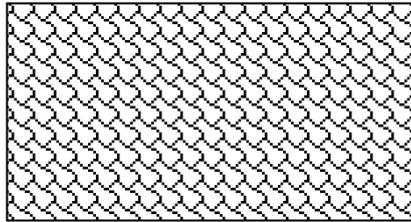
La mayoría de los materiales metálicos de aplicación industrial son aleaciones compuestas por diferentes tipos de átomos. Estos átomos deben acomodarse de manera muy específica en la estructura sólida del material. A nivel microscópico, existen pequeñas regiones donde se da determinado ordenamiento regular, con una cierta orientación en el espacio. Cada una de estas regiones se denomina grano, de modo que a una escala muy pequeña, la aleación esta constituida por un conglomerado de granos. Estos granos pueden tener tamaños y formas diversas, dependiendo del caso particular, pero basta decir que son visibles si se usa un microscopio óptico de 20 a 200 aumentos. Los límites entre los granos tienen algunas características distintivas, entre ellas mayor energía acumulada, un arreglo diferente de ciertos elementos de aleación minoritarios y en muchos casos, una mayor susceptibilidad a sufrir corrosión.

La corrosión intergranular es, entonces, un tipo de ataque selectivo localizado en los bordes de grano, dado que estos son ligeramente más reactivos que la matriz. La causa del ataque intergranular puede relacionarse con el hecho de que en los límites de grano existe una mayor concentración de impurezas y una menor concentración de los elementos que confieren pasividad. Si el ataque progresa, pueden llegar a desprenderse granos completos.

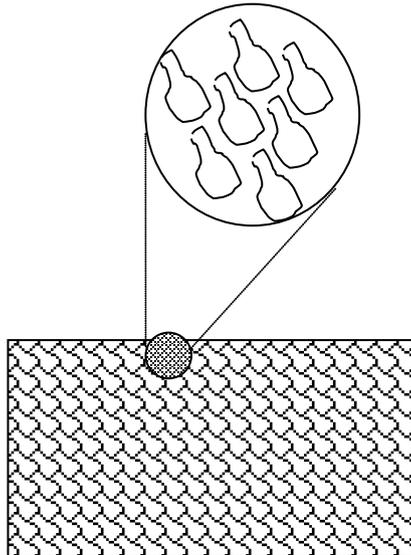
En aleaciones de níquel y aceros inoxidables, es común agregar cromo como elemento de aleación, ya que el cromo mejora la resistencia a la corrosión. En aceros, el contenido en cromo debe mantenerse alrededor 12% como mínimo para asegurar la pasividad y la estabilidad de la

capa superficial que protege a los aceros y los vuelve inoxidables. Pero durante un proceso de soldadura o por causa de un tratamiento térmico inadecuado se favorece la formación de carburo de cromo, que se deposita en los bordes de grano. Así, en las proximidades de la región intergranular se ha consumido el cromo libre, de modo que esa región queda desprotegida y resulta menos resistente a la corrosión en comparación con el resto del material.

**Antes**



**Después**



#### **4.2.5 CORROSIÓN BAJO TENSIÓN**

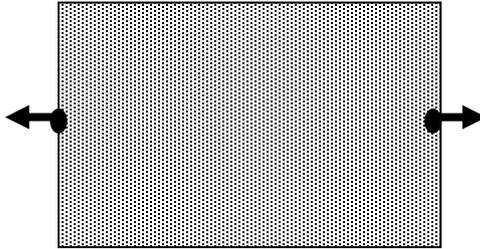
UN FISIOTERAPEUTA AHÍ, POR FAVOR...

La corrosión bajo tensiones ocurre en algunos materiales metálicos bajo la influencia combinada de un entorno corrosivo y un esfuerzo de tensión (cargas externamente aplicadas o tensiones internas). Se trata de un mecanismo progresivo que termina provocando una fractura en el material metálico y que resulta en la característica aparición de fisuras muy ramificadas.

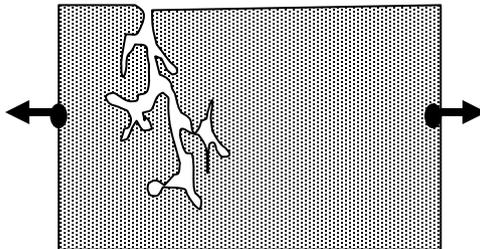
Es apropiado aquí hacer mención a la sinergia, es decir a la necesidad de que confluyan dos o más factores para producir determinado resultado. Por un lado, participan factores asociados a la situación de cargas mecánicas a las que se encuentra sometida la pieza, como así también asociados a la composición química del medio que lo rodea. Ninguno de estos factores presente de manera individual, o incluso alternada, sería capaz de producir el mismo efecto.

Las tensiones requeridas pueden ser el resultado de las cargas o esfuerzos a los que es sometido el material como resultado de la función que cumple (por ejemplo los tensores de un puente colgante que soportan su peso). También pueden tener su origen en tensiones residuales, que han permanecido en el material producto del proceso durante el cual se le da la forma final, o bien durante el montaje. Un tratamiento térmico adecuado puede reducir o aliviar parcialmente las tensiones residuales. Si las tensiones son cíclicas, el proceso suele denominarse corrosión-fatiga.

**Antes**



**Después**



La mayoría de las veces, una falla debida a corrosión bajo tensiones es imprevisible y puede aparecer tras pocas horas o luego de meses o años de servicios satisfactorios. Se encuentra, frecuentemente, en ausencia de cualquier otro tipo de ataque corrosivo. Prácticamente todas las aleaciones pueden sufrir este tipo de ataque si se combinan un medio ambiente específico y con un conjunto de condiciones externas. Dos ejemplos de materiales que típicamente están sujetos a corrosión bajo tensión (si se dan las condiciones necesarias) son el acero inoxidable en medios que contengan iones cloruro y los latones en contacto con medios ricos en amoníaco.

#### 4.2.6 CORROSIÓN EROSIÓN

CADA VEZ QUE ME BAÑO SE TAPA EL CAÑO...

Ocurre cuando la corrosión está acompañada por un proceso de desgaste mecánico (o abrasivo), normalmente debido a que existe un movimiento relativo entre el material metálico y el medio corrosivo. Tal sería el caso de una cañería dentro de las que circula un fluido agresivo a alta velocidad. En estos casos, la capa pasiva está continuamente sometida a efectos corrosivos y de desgaste en forma simultánea, de modo que la continua eliminación de esta capa protectora acelera la corrosión.

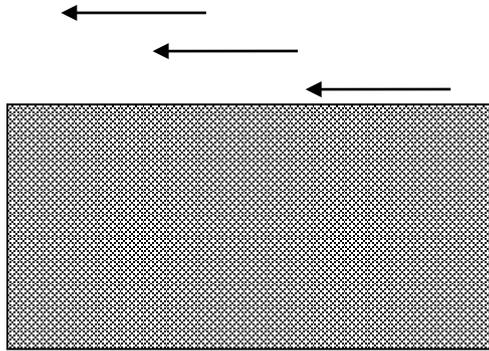
Los materiales relativamente más blandos son los que más fácilmente sufren erosión- corrosión, como por ejemplo las aleaciones de cobre, de aluminio y de plomo. En estos materiales, la capa pasiva es gruesa, blanda y poco adherente y por eso ellos sufren con más severidad este tipo de ataque. En contraste, los aceros inoxidable y las aleaciones de titanio son casi inmunes.

El efecto es más importante cuando en el medio líquido hay sólidos en suspensión, como por ejemplo arena. También empeora la situación cuando el flujo es turbulento (altas velocidades de flujo con vórtices o remolinos), por eso cualquier imperfección en la pared de una cañería, o un cordón de soldadura, así como problemas de diseño o ejecución e incluso la rugosidad producida por la presencia de picado puede agravar la situación.

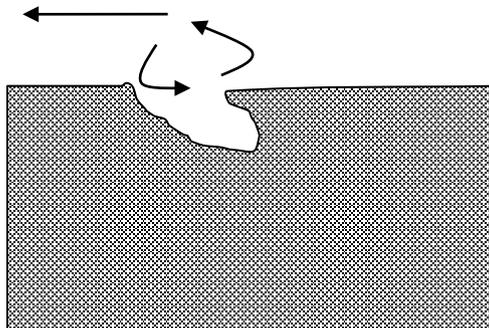
Cada material tiene asociada una velocidad de flujo crítica, por encima de la cual se vuelve particularmente susceptible a esta forma de ataque. Cuando se presenta, es posible reconocerlo a simple vista, ya que se forman depresiones con forma de herradura, orientadas en la dirección en que se mueve el fluido. Cuando hablamos de fluidos, es común

pensar en líquidos, pero en este caso puede tratarse también de un fluido gaseoso o incluso con más de una fase, como un líquido con burbujas de gas. Casi todos los materiales en contacto con un fluido en movimiento sufrirán algún grado de erosión corrosión. La situación es casi inevitable en ductos y tuberías, particularmente si hay codos, bridas, cordones de soldadura u otro tipo de uniones que cambien la dirección de flujo o que generen turbulencia.

**Antes**



**Después**



Cuando la condición de servicio involucra la formación e implosión de burbujas de aire o cavidades llenas de vapor, suele hablarse de *cavitación*, como una forma especial de erosión-corrosión.

El impacto y la implosión de las burbujas de gas deterioran rápidamente la capa pasiva. Algunos cálculos sencillos de hidrodinámica muestran que la implosión de una burbuja puede generar ondas de choque con una presión cientos de veces mayor que la presión atmosférica. Este tipo de corrosión es muy frecuente en piezas sometidas a cambios bruscos de presión como impulsores de bomba, propulsores de barco, y otros.

#### **4.2.7 DEALEADO**

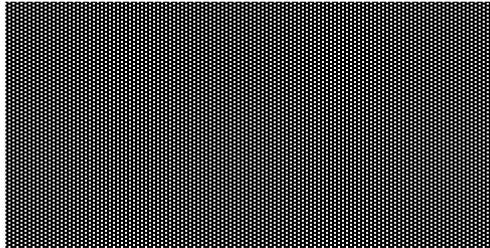
CUANDO UN AMIGO SE VA...

El dealeado, o disolución selectiva, comprende la remoción preferencial de un elemento de aleación por procesos de la corrosión. Un ejemplo común es el que se conoce como dezincificación del latón. El latón es una aleación donde el cobre es el elemento mayoritario y el zinc uno de los principales aleantes. Cuando el latón entra en contacto con un medio corrosivo, sufre dealeado: el zinc se disuelve mayoritariamente, lo que deja a la aleación convertida en una estructura de cobre, debilitada y porosa. La pérdida selectiva del zinc puede proceder de manera uniforme o localizada.

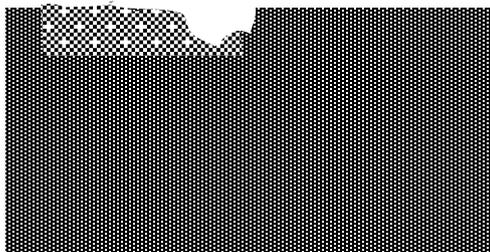
Otro ejemplo es la disolución preferencial de hierro en la fundición gris, que deja atrás un esqueleto frágil de carbono. Este proceso se conoce también como corrosión gráfitica o grafitización. La fundición gris debe su nombre al aspecto que tiene su superficie al romperse. Contiene en

general más de 2% de carbono y más de 1% de silicio, además de manganeso, fósforo y azufre y es uno de los materiales ferrosos más extensamente empleados. Durante la corrosión gráfica de la fundición, la red porosa del grafito que compone 4-5% de la masa total de la aleación, se impregna con los productos de corrosión insolubles. En consecuencia, el material conserva su aspecto y forma pero es estructuralmente más débil. Para identificar la corrosión gráfica puede rasparse la superficie con un cuchillo para revelar el hierro que está debajo. Cuando la corrosión gráfica está muy extendida, la única solución es reemplazar el elemento dañado.

**Antes**



**Después**



#### 4.2.8 FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO

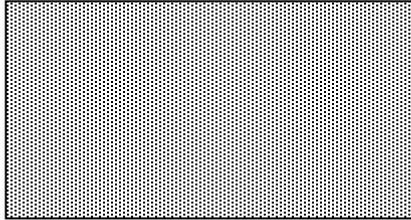
EL QUE SE METE DONDE NO LO LLAMAN...

La fragilización por hidrógeno de un metal o aleación implica la incorporación de átomos de hidrógeno en el material, lo que reduce drásticamente su ductilidad y su resistencia mecánica, causando fallas y grietas catastróficas aun cuando los esfuerzos mecánicos estén por debajo del límite de los que puede soportar ese material. El hidrógeno atómico se produce cuando un ion hidrógeno (un protón,  $H^+$ ), acepta los electrones del metal que se oxida. Normalmente, los átomos de hidrógeno deberían aparearse para convertirse en moléculas de hidrógeno ( $H_2$ ). Estas moléculas debieran desprenderse del material como burbujas de hidrógeno gaseoso sin causar ningún daño. Sin embargo, algunos metales son muy propensos a permitir que los átomos de hidrógeno penetren en la estructura, antes de convertirse en una molécula. El pequeño tamaño del átomo de hidrógeno juega claramente a favor de esta incursión. Una vez dentro del metal, los átomos de hidrógeno pueden hacer todo tipo de travesuras que resultan en lo que se conoce como daño por hidrógeno.

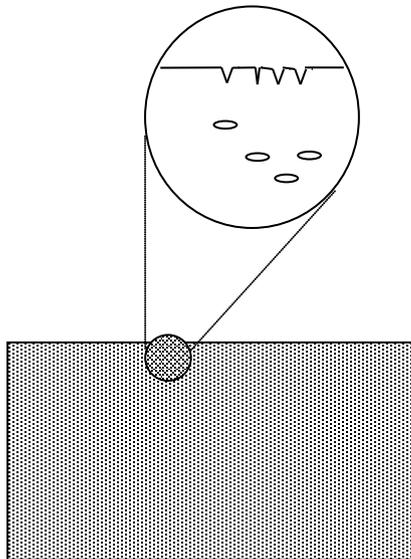
Las fuentes de hidrógeno que causan esta fragilización pueden relacionarse con los procesos de la fabricación de acero, con el procesamiento de las piezas, con procesos de soldadura, y lógicamente con el almacenamiento o la contención de gas de hidrógeno. En ciertos casos, el hidrógeno puede aparecer inclusive como un subproducto de la corrosión generalizada. Particularmente en la industria nuclear, el hidrógeno puede ser también añadido durante la refrigeración del reactor, para eliminar el oxígeno de los sistemas de enfriamiento. Esta forma de corrosión no afecta a todos los materiales

metálicos por igual. Los más vulnerables son aceros de alta resistencia, aleaciones de titanio y aleaciones de aluminio.

**Antes**



**Después**



#### **4.2.9 CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA**

¡MALDITO MICROBIO!

Se trata de una forma de corrosión a la que se le ha venido dando creciente importancia en las últimas décadas.

Se la conoce también corrosión inducida microbiológicamente o por sus siglas en inglés: MIC. En estos casos el elemento distintivo es ciertamente la participación de microorganismos, al que se identifica como el factor capaz de iniciar, promover o acelerar un proceso de corrosión.

Este tipo de corrosión afecta industrias como la eléctrica, petrolera, nuclear, del papel y alimentos, entre otras. Se ha estimado que el 20 o 30% de las fallas en tuberías de transporte de hidrocarburos, están relacionadas con problemas de corrosión microbiológica, afectando la parte interna y externa de los conductos.

La simple presencia de microorganismos en un sistema no necesariamente indica que causen problemas de corrosión, ya que algunas poblaciones bacterianas que son problemáticas en un sistema específico, pueden ser no tener efecto alguno en otro sistema diferente.

Los microorganismos pueden generar productos metabólicos que produzcan un ambiente particularmente agresivo. Los procesos metabólicos de los microorganismos están relacionados con reacciones químicas que permiten la generación de energía, a través de la asimilación de nutrientes que se encuentran en el medio circundante. Dichos procesos pueden tener diferentes consecuencias, entre las que se puede mencionar la destrucción de las películas protectoras superficiales, la generación de ambientes que son localmente muy ácidos, la formación de depósitos, y otros.

El factor clave para la alteración de las condiciones de la superficie metálica y con esto, un incremento en la velocidad de corrosión, es la formación de una biopelícula. Una biopelícula es un conglomerado microbiano compuesto por bacterias, algas y otros microorganismos que está

constituido de una matriz gelatinosa de material polimérico extracelular (MPE) con un elevado contenido de agua (aproximadamente del 80 al 95% de la masa). Esta película biológica modifica las condiciones de la interfase metal/entorno, donde las reacciones que se producen entre los metabolitos microbianos y la superficie metálica pueden ocurrir por debajo o por dentro de la estructura de la biopelícula.

## CAPÍTULO 5

# Cómo combatir a la corrosión

### 5.1 LA LUCHA ES CRUEL, Y ES MUCHA

El campo de batalla dentro del que se desarrolla la lucha contra la corrosión de los materiales metálicos está comprendido en un área de la ciencia donde se pueden aplicar herramientas de la termodinámica, que nos permiten asegurar sin margen de error alguno, que se trata de una guerra que está perdida. En el contexto de las leyes de la termodinámica, la corrosión es un enemigo imbatible. Los metales se corroen porque los óxidos son su forma natural más estable. Esto no tiene remedio, ni puede revertirse.

Sin embargo, los daños originados por la corrosión pueden retrasarse en el tiempo y reducirse drásticamente y, a veces, incluso evitarse casi por completo. Para ello, es necesario definir métodos de protección y control que sean confiables y económicamente viables.

No parece previsible que nuevos descubrimientos o grandes avances científicos puedan eludir las leyes electroquímicas a fin de eliminar la corrosión para mejorar la ecuación económica. Sin embargo, un mejor aprovechamiento de los conocimientos disponibles podrá, sin dudas, derivar en una utilización más racional de los materiales metálicos y representar una reducción en los costos totales.

Veamos con un poco más de detalle, algunos aspectos clave, asociados a cada una de estas alternativas para luchar contra la corrosión.

## 5.2 LA IMPORTANCIA DE SABER ELEGIR

Teniendo en cuenta que la corrosión es un proceso electroquímico, una forma simple de evitar problemas es utilizar materiales químicamente resistentes. Es más, si no son metálicos, no habrá posibilidad de que circulen los electrones y no habrá corrosión posible. Materiales de la familia de los plásticos, cerámicos, vidrios, gomas, y cementos entran dentro de esta categoría. Sin embargo, en la generalidad de los casos no reúnen otras propiedades — diferentes a la resistencia a la corrosión— y no son capaces de congregar el conjunto de condiciones que garantice el buen funcionamiento en el ambiente de servicio al que estará sometida la pieza final. Además, todos los tipos de materiales son susceptibles de degradarse en el tiempo de alguna manera.

A la hora de diseñar y construir una pieza, parte o cualquier tipo de elemento metálico, el profesional a cargo de la planificación deberá efectuar una selección de materiales entre las múltiples alternativas posibles. Habrá que considerar numerosos aspectos, como pueden ser las propiedades mecánicas del material, resistencia a la corrosión, disponibilidad y precio, facilidad de trabajarlo para llevarlo a la forma final, posibilidad de mantenimiento y de reciclado si corresponde, y varias más. Entre ellas, el control de la corrosión es sólo uno de los muchos factores que intervienen en la decisión. La mayoría de las veces, la selección final se hace teniendo en cuenta cuál es el material más económico que además satisfaga aceptablemente las demás condiciones. Si la decisión final recae en un material metálico, será el momento de tener en cuenta su resistencia a la corrosión. La resistencia a la corrosión del material seleccionado debe ser acorde a la

duración prevista para el conjunto, ya que de nada sirve invertir en algún componente que luego supere ampliamente la vida útil del equipo completo. El objetivo en último término, consiste en seleccionar el material más económico compatible con las demandas y especificaciones de la aplicación en particular, tanto para la pieza como para el conjunto.

Una vez seleccionado el material también se puede contribuir a conseguir cierto control sobre la corrosión con un diseño adecuado. El diseño debe minimizar los riesgos teniendo en cuenta las condiciones de operación y el entorno y debe además permitir un mantenimiento planificado.

Como en muchos otros ámbitos, cuando se busca minimizar la incidencia de procesos corrosivos, la etapa de diseño es de fundamental importancia. Esto es así para cada componente individual y para el montaje o armado total del conjunto. Dentro de las posibilidades del caso en particular deberá evitarse o minimizarse la formación de huecos o cavidades en los cuales pueda quedar atrapado algún fluido y debe impedirse el contacto directo de metales diferentes (para no formar pares galvánicos). También es de suma importancia que el diseño permita un acceso fácil, tal que se puedan realizar inspecciones visuales y sea posible cumplir con las etapas de mantenimiento que se hayan planificado.

Tan importante como el diseño es el control en la calidad de la ejecución. No es infrecuente que una situación donde se ha dedicado tiempo y esfuerzo a generar planos detallados termine mal como resultado de alguna torpeza, descuido o desidia durante la etapa de producción o montaje. Un control de calidad final es muchas veces

indispensable para que estos errores no pasen sin ser percibidos y puedan corregirse a tiempo.

### **5.3 NO HAY VILLANO SIN SUPERHÉROE**

Como se mostró en el capítulo 2, una receta infalible para tener un proceso de corrosión que avance a paso firme tiene tres ingredientes: 1) el metal que corroa, 2) la sustancia que acepte los electrones y 3) el medio conductor que permita la circulación de las cargas.

Los métodos diseñados para combatir la corrosión se basan en sabotear alguno de los tres.

En términos metafóricos, podríamos decir que el primer superhéroe se ocupa de defender al metal, el segundo intenta dominar a las sustancias en el entorno mientras que el tercero sería algo así como el alter-ego de un policía de tránsito, pues se interpone entre el metal y el medio impidiendo que circulen los electrones.

Otra forma de pensar en los métodos de protección es partir de un modelo sencillo del proceso corrosivo que involucra una fase reactiva (generalmente metálica), un medio agresivo (sólido, líquido o gaseoso) y una interfase en la que transcurre la reacción. Por lo tanto, los métodos diseñados para mantener al proceso corrosivo bajo control deben incluir acciones que involucren al material, que influyan sobre el medio o que modifiquen la interfase.

Es así que, en la práctica, existen tres grandes grupos de métodos que, con algunas variantes, nos permiten luchar contra la corrosión:

## **1. Evitar que el metal que nos interesa sea el que se ataque**

Para conseguir este propósito se presentan dos grandes opciones: o bien se interviene en la etapa de diseño eligiendo un material metálico menos activo y por tanto más resistente a la corrosión o sino se acopla al sistema un proveedor de electrones alternativo, que puede ser un metal que se ataque preferentemente y que proteja así al material de interés o más directamente, una fuente de corriente continua.

La primera opción implica sustituir el material por otro con mejores características, es decir más resistente a la corrosión. Esta alternativa puede no ser viable por cuestiones asociadas a las propiedades mecánicas que deberá tener el material para ser adecuado para la función que debe cumplir, o bien porque los costos no lo permitan.

La segunda opción es la base de un método bien conocido y que veremos en más detalle más adelante: se trata de la protección catódica, que a su vez puede implementarse con ánodos de sacrificio o con corriente impresa.

## **2. Intervenir sobre el entorno alterando su composición**

En este caso, hay que modificar el medio con el que el material metálico está en contacto. Una opción es eliminar el oxígeno disuelto, que inevitablemente está presente en los medios aireados y que es gran candidato a ser quien recibe los electrones que pierde el metal al corroerse.

Otra posibilidad es incorporar en el medio agresivo sustancias llamadas inhibidores de corrosión, que actuando a través de ciertos mecanismos químicos, pueden dificultar la transferencia de electrones entre el metal y su entorno.

### **3. Impedir que el material metálico y el medio agresivo entren en contacto**

En este caso, puede recurrirse al aislamiento eléctrico del material metálico, interrumpiendo el contacto directo con el medio agresivo. Esto es posible mediante el empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente o por aplicación de recubrimientos que cumplan la función de barrera e impidan la circulación de electrones.

#### **5.3.1 SI NO PUEDES CON EL ENEMIGO, ÚNETE A ÉL**

Otra forma de evitar que el metal sufra un ataque corrosivo es utilizar la técnica del engaño. La idea es impedir que sean los electrones del metal que queremos proteger los que pasen a la sustancia que los puede aceptar en el entorno. Lo que se puede hacer es entonces buscar otra forma de proveer los electrones. Este método se denomina protección catódica y constituye sin duda, una de las formas más extensamente empleada para combatir la corrosión de estructuras metálicas enterradas en el suelo (por ejemplo oleoductos y gasoductos) o sumergidas en medios acuosos (por ejemplo cascos de barcos o pilotes de puentes). No es útil en cambio, para estructuras expuestas a la atmósfera (como la carrocería de un auto), ya que no puede cerrarse el circuito de cargas eléctricas.

Entre los metales que pueden ser protegidos de la corrosión por este método se cuentan los aceros, el cobre, plomo y bronce, entre otros. Las aplicaciones incluyen embarcaciones, diferentes clases de tuberías, tanques de almacenamiento, pilotes de puentes, edificios y varios más.

Una variante de este método se fundamenta en incorporar al sistema un material metálico bastante activo, cuyo único propósito en el sistema sea entregar sus electrones. Esta opción constituye la base de un recurso muy ampliamente empleado que se denomina protección catódica por ánodos de sacrificio. En este caso, el metal que va a entregar los electrones se va a oxidar, es decir se va a sacrificar, para así proteger al metal que nos interesa. Un ejemplo doméstico que ilustra el uso de protección catódica son los ánodos que se emplean para proteger a los termotanques. Los metales más usados para este fin son el magnesio, el zinc y ciertas aleaciones de aluminio. Los ánodos de magnesio pueden ser usados en tierra y agua dulce y los otros dos más comúnmente en agua de mar. Un ánodo de aluminio no puede ser utilizado en aguas de bajo contenido de cloruro, porque se cubre de una película pasiva y ya no es capaz de conducir la corriente eléctrica. En este tipo de aplicación, está previsto que el material del ánodo se consuma y es deseable que así sea para que cumpla con su función, por lo que debe reemplazarse periódicamente. Dependiendo del caso particular de que se trate, las dimensiones y la forma de estos ánodos de sacrificio se calculan y la frecuencia de recambio se especifica dentro del programa de mantenimiento. Normalmente son varillas o bloques (conocidos en la jerga como “panes”). En el caso de los termotanques, los fabricantes recomiendan el reemplazo de las varillas de magnesio una vez por año.

Si el ánodo es de zinc y la cantidad de material presente está en exceso respecto del mínimo necesario, solamente se alargará su vida útil, sin provocar ningún problema a la estructura que se quiere proteger. Con el ánodo de aluminio se debe ser algo más riguroso en el cálculo de la masa que se necesita, porque una sobreprotección puede provocar otros problemas. Este efecto es mucho mayor aún si se usan ánodos de magnesio. Sin embargo, si se respeta la cantidad y el tipo de material recomendados y aun así, el ánodo no se consume en el periodo previsto, es posible que exista algún problema asociado a una aislación no deseada en la conexión eléctrica entre éste y la estructura a proteger.

Las ventajas de utilizar ánodos de sacrificio son varias: son de fácil instalación, tanto en estructuras nuevas como usadas, no necesitan mantenimiento, se pueden colocar en estructuras móviles o alejadas de fuentes de suministro de energía eléctrica y son de bajo costo.

Existen también en el mercado pinturas ricas en zinc que son de fácil aplicación y pueden desempeñar la función de proteger catódicamente algunos sistemas.

Otra forma de alimentar con electrones al agente oxidante que esté presente en ese medio es aplicando una corriente externa, a partir de un rectificador que suministre corriente continua de bajo voltaje. Este segundo método se denomina protección catódica con corriente impresa. Esta forma de protección catódica puede ser más costosa, dependiendo del tamaño de la estructura a proteger. Además, requiere de mantenimiento continuo, ya que es muy importante asegurarse de que la fuente de corriente esté permanente operativa, y que entregue la corriente que se ha calculado, ni más, ni menos. También aquí deben instalarse ánodos para que circule la corriente. Sin embargo,

al contrario de los ánodos de sacrificio, estos están hechos de materiales resistentes a la corrosión. En estos sistemas, la corriente que entregan no proviene de la propia corrosión del ánodo, sino de una fuente externa.

### **5.3.2 CAMBIAR DE ENTORNO**

#### **5.3.2.1 USO DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN**

El empleo de los inhibidores de corrosión, entra dentro del conjunto de las formas de control que actúan modificando del medio ambiente.

Los inhibidores son sustancias químicas con formulaciones complejas que se emplean para proteger a los materiales metálicos contra el ataque corrosivo de soluciones particularmente agresivas. Son usados ampliamente por numerosos tipos de industrias para modificar el comportamiento del medio y tener un mejor control de la corrosión, muy comúnmente cuando el entorno es un medio acuoso.

En términos generales, los inhibidores de corrosión modifican la superficie de contacto entre el metal y el medio corrosivo. Pueden favorecer la formación de un compuesto insoluble, la fijación de una determinada sustancia orgánica, o bien tener mecanismos de acción más complejos.

Habitualmente, se los clasifica en dos categorías, aunque a veces la distinción no es precisa: —inhibidores anódicos— como en el caso de hidróxido, carbonato, silicato, nitrito, cromato, benzoato y borato de sodio y ciertos fosfatos, entre otros; —inhibidores catódicos—

como son el sulfato de zinc, sulfato de magnesio, bicarbonato de calcio, y otros.

Los inhibidores anódicos actúan formando un compuesto insoluble (generalmente un óxido), que se deposita en la superficie metálica. Ayudan a mantener la integridad de la película pasiva cuando esta se deteriora localmente, impidiendo el avance de la corrosión.

Los inhibidores catódicos, en cambio, reducen la incidencia de la corrosión mediante la formación de una capa o película de alta resistencia eléctrica sobre la superficie, que funciona como una barrera para el intercambio de electrones. Muchas veces, la formación de una película responde a procesos de interacción entre el metal y las sustancias disueltas que son muy específicos y que se ven afectados por muchos factores, como la temperatura, la velocidad de flujo del medio y las impurezas presentes en la superficie metálica. Todos estos factores deben ser evaluados muy cuidadosamente al recomendar un inhibidor.

Los inhibidores anódicos deber emplearse en cantidad suficiente, para que cualquier posible defecto en la película de óxido sea reparado a tiempo, previniendo que avance alguna forma de corrosión localizada como picado o corrosión por rendijas.

Existen también sistemas de inhibidores de efecto combinado que, básicamente, son mezclas de inhibidores anódicos y catódicos. El componente catódico disminuye la velocidad global de corrosión y permite que el componente anódico repare las imperfecciones o defectos en la capa de óxido empleando una cantidad mucho menor que si estuviera actuando solo.

El proceso a través del cual se selecciona y de dosifica un inhibidor es bastante complejo y con mucha frecuencia

tiene etapas de prueba y error. Una manera posible de comenzar la selección es a través de las propiedades físicas. Se debe determinar si es importante que el inhibidor sea sólido o líquido o que se volatilice fácilmente. Será de interés considerar si el sistema puede alcanzar temperaturas extremas tal que pueda fundirse, congelarse o incluso descomponerse. Habrá que evaluar también si el inhibidor puede degradarse con el tiempo o a alguna temperatura crítica, sin dejar de contemplar que deberá ser compatible con otras sustancias que formen parte del sistema. La lista de variables a evaluar es extensa, pero es importante porque permite definir el conjunto de posibles inhibidores. La evaluación de potenciales candidatos a actuar como inhibidores continuará con el diseño de experimentos que simulen las condiciones de operación del sistema. Las variables que deben ser consideradas y que debe intentarse reproducir en laboratorio, incluyen la temperatura, presión y velocidad del fluido, así como las propiedades del metal y la composición química del ambiente corrosivo. Los ensayos generalmente se realizan simulando las condiciones más severas a las que pueda operar el sistema y no deben limitarse a las condiciones promedio. También se pueden probar inhibidores en situación de operación real (en campo), empleando cupones metálicos que se interponen en el sistema y que luego de transcurrido determinado tiempo se extraen para su observación y análisis.

Además de estas razones de índole práctica, hay otros criterios se deben considerar al elegir qué compuestos químicos usar como inhibidores de la corrosión y cómo emplearlos. La necesidad de inhibir la corrosión metálica es principalmente un proceso dominado por cuestiones económicas. Por lo tanto, el primer criterio que

debe ser cumplido se relaciona con el costo. Pero hay otro criterio muy importante que también debería ser tenido en cuenta durante la selección de un inhibidor de corrosión y este tiene que ver con su efecto sobre las personas y sobre el medio ambiente en general. Desafortunadamente, la mayoría de los inhibidores de la corrosión eficaces de uso industrial son compuestos químicos sintéticos con alto costo que, al mismo tiempo, pueden causar daño a la naturaleza. Sin embargo, muchas veces se pasa por alto que existen a nuestro alrededor sustancias naturales, con la amplia variedad de estructuras químicas, que son potencialmente aplicables como inhibidores de corrosión. De hecho, el reino vegetal puede ser considerado como una gran fábrica de productos químicos, donde es posible encontrar sustancias apropiadas para inhibir el proceso de corrosión. Se está trabajando activamente en probar diferentes extractos naturales para este tipo de aplicaciones. Los ejemplos son numerosos, e incluyen sustancias tales como la henna, el aceite de oliva, el extracto de vainilla, la miel natural, el ficus, el aloe vera y muchos aceites extraídos de diferentes partes de plantas, entre otros. Muchas de estas sustancias de origen natural han demostrado su capacidad para actuar como inhibidores para la corrosión de numerosos metales y aleaciones en diferentes medios agresivos, sin representar ningún peligro de contaminación para el ecosistema.

### **5.3.2.2 BAJAR LA AGRESIVIDAD DEL ENTORNO**

Los ambientes naturales más comúnmente asociados con la corrosión son de tres tipos: medios acuosos, los suelos y la atmósfera. En todos ellos, la especie que se

encarga de aceptar los electrones que el metal libera cuando se oxida, es el oxígeno presente en el sistema.

En el caso de medios acuosos otra forma de combatir a la corrosión, interviniendo sobre el entorno, es realizar tratamientos de agua. Además del empleo de inhibidores, el principal método de tratamiento de aguas para control de la corrosión es la eliminación del oxígeno disuelto. El aire contiene aproximadamente un 20% de oxígeno y como se trata de una sustancia capaz de captar electrones, su presencia en el agua acelera la corrosión.

Así las cosas, es importante tener en cuenta que la composición química de un sistema de base acuosa puede ser extremadamente compleja. En todos los casos, las principales fuentes de agua son el agua de mar o ríos y lagos, el agua de lluvia, el agua de napas subterráneas o el agua de red. Por tanto, su contenido de sales, minerales y contaminantes será muy variable, tanto entre una fuente y otra como también a lo largo del tiempo.

La eliminación del oxígeno en las aguas, antes de su uso, constituye un método de control de la corrosión que no sólo es apto para proteger el hierro y aceros, sino también del cobre, bronce, cinc y plomo. El oxígeno puede ser eliminado por medios físicos (deaireación) o químicos (desactivación).

La deaireación se puede llevar a cabo subiendo la temperatura, bajando la presión o purgando el agua al hacer circular un gas inerte. De esta manera, el oxígeno disuelto en el agua, vuelve a incorporarse al aire, como gas. La desactivación química se realiza por tratamiento del agua con sustancias denominadas "secuestrantes", como son la hidrazina o el sulfito de sodio. Con este método, el oxígeno disuelto reacciona químicamente y se transforma en otra

sustancia que ya no es capaz de aceptar los electrones del metal.

La corrosión en suelos se parece, en muchos aspectos, a la corrosión en medios acuosos. En ambos casos, son las sustancias disueltas las que determinan la agresividad del medio. Por otro lado, una diferencia entre ambos es que el suelo puede cambiar de un sector a otro, mientras que los medios acuosos suelen ser más homogéneos. Los principales factores que determinan cuándo un suelo es agresivo con respecto a una estructura metálica enterrada son: la humedad, el acceso de oxígeno (que depende de la profundidad y de que tan compacto es el suelo), la conductividad eléctrica (que está influenciada por la presencia de sales disueltas), el grado de acidez del suelo y la presencia de otros contaminantes (por ejemplo suelos salobres o con alto contenido de microorganismos).

Como ya vimos, la forma más frecuentemente empleada de prevenir la corrosión de metales o estructuras enterradas es mediante el método de protección catódica. También se emplean recubrimientos, como discutiremos más adelante.

Por último, otro entorno natural que debemos considerar es la atmósfera. En este caso, la agresividad frente a la corrosión depende fundamentalmente de dos factores: el grado de humedad del aire y la presencia de contaminantes (entre ellos, el dióxido de azufre es uno de los más comunes en ambientes industriales).

La humedad relativa es muy importante al considerar los problemas relacionados con la corrosión atmosférica. El hierro no suele cubrirse de herrumbre en atmósferas cuya humedad relativa es del 70% o menor. En general, para cualquier metal que se pueda corroer en la atmósfera, hay un valor crítico de la humedad relativa, por debajo del cual

no se ataca. Por otro lado, la influencia ejercida por los contaminantes típicos de atmósferas industriales se relaciona con su capacidad de acidificar el ambiente, lo que a su vez perjudica la estabilidad de la película pasiva.

Como la atmósfera es muy difícil de modificar, los métodos más efectivos para mantener a la corrosión bajo control son aquellos basados en impedir que haya contacto entre el material metálico y el medio ambiente.

### **5.3.3 RECUBRIMIENTOS: CUANDO LA MEJOR SOLUCIÓN ES SEPARARSE**

La mayoría de los recubrimientos se utiliza para aislar el metal del entorno agresivo que los rodea. Existen recubrimientos metálicos y no-metálicos y diversas técnicas para aplicarlos, sin modificar demasiado la superficie metálica.

Entre los recubrimientos no-metálicos se cuentan las pinturas, los barnices, las lacas, las resinas naturales o sintéticas y los esmaltes vitrificados. También ciertas materias grasas, ceras y aceites que son con frecuencia empleados durante el almacenamiento o transporte de materiales metálicos pueden considerarse recubrimientos, en vista de que proporcionan una protección temporal del tipo barrera.

Los recubrimientos metálicos suelen aplicarse con fines estéticos o incluso como protección catódica. Para proteger de una manera eficaz y económica la superficie de un metal susceptible de corroerse empleando un recubrimiento metálico hay hacer un proceso de selección. La elección finalmente se puede justificar sobre la base de

una de las siguientes propiedades, dependiendo del caso particular:

- Impermeabilidad, esto es, que el recubrimiento quede íntegro, libre de defectos y con un espesor suficiente como para aislarlo de los agentes agresivos.
- Resistencia mecánica de los materiales utilizados en los recubrimientos, para garantizar que soporten choques, rozamientos o erosión leve
- Buena adherencia, tanto inicial como a lo largo de la vida útil de la pieza
- Condiciones del medio ambiente que va a entrar en contacto con la pieza
- Acabado final acorde con el uso

La selección de un recubrimiento debe también contemplar otros factores, como son las dimensiones y la forma, además del área de la superficie de la pieza o parte a recubrir.

Una vez seleccionado, hay que optar por alguna de las muchas formas posibles de aplicar un recubrimiento metálico. Una posibilidad es hacerlo mediante galvanoplastia o electrodeposición, que son métodos electrolíticos. Tal es el caso del níquel, cinc, cobre, cadmio, estaño y cromo, entre otros. Los recubrimientos metálicos también pueden prepararse por inmersión en metales fundidos o mediante la proyección del metal fundido con pistola atomizadora.

La forma en que se aplica el revestimiento determina en gran medida que tan eficaz será la protección contra la corrosión, ya que tanto el espesor y la porosidad, como la naturaleza y la calidad global de las capas obtenidas

dependen del procedimiento de aplicación. Así, por ejemplo, los recubrimientos electrolíticos que tienen espesores de algunos micrones (milésimas de milímetro), se reservan generalmente para su utilización en medios poco agresivos. En cambio, los recubrimientos obtenidos por inmersión en un metal fundido tienen espesores mayores y son más resistentes. Los recubrimientos obtenidos mediante proyección con pistolas pulverizadoras permiten obtener espesores todavía más grandes. Se utilizan en condiciones de corrosión especialmente severas.

Entre los diferentes procedimientos existentes y disponibles para aplicar recubrimientos metálicos, la selección se realiza siguiendo criterios tales como: el espesor de protección, dimensión de las piezas, agresividad del medio, duración prevista y costo, entre otros.

Los procedimientos que requieren el uso de equipos tales como hornos, cubas electrolíticas o crisoles, sólo pueden utilizarse para aquellas piezas cuyas dimensiones sean apropiadas. Por el contrario, la metalización con pistola permite efectuar recubrimientos metálicos independientemente de las dimensiones de la pieza. Por ejemplo, si se trata de aplicar un recubrimiento de zinc sobre unos tornillos, la operación se puede realizar mediante una electrólisis, en una cuba electrolítica. Para proteger un tanque de acero con un recubrimiento de zinc, se puede recurrir a la galvanización en caliente. En cambio, si se trata de proteger una escultura de gran porte o la puerta de una esclusa en una central hidroeléctrica, se debe de recurrir a proyectar el zinc mediante una pistola de metalización.

Por último, la elección final, tanto de la naturaleza como del espesor del metal protector, será función de

muchos otros parámetros que aún no hemos considerado, entre los cuales uno de los más importantes es el costo.

También es importante resaltar que para obtener buenos resultados con los recubrimientos metálicos, hay que prestar mucha atención a la preparación de la superficie del metal que se desea proteger, antes de aplicar el recubrimiento metálico. La adherencia y la integridad del recubrimiento dependen fuertemente de la calidad con que se haya preparado la superficie, lo que a su vez impactará en la eficacia de la capa protectora.

Dependiendo del estado inicial de la superficie a proteger (su rugosidad, dureza, grado de oxidación) se puede seleccionar el procedimiento mecánico de limpieza más adecuado. Las opciones son diversas e incluyen el granallado y el arenado, pasando por una limpieza química con baños ácidos, aplicando o no una corriente eléctrica.

Por último, vale mencionar algunos otros tipos de recubrimientos que se emplean con bastante frecuencia y que no se encuadran en las dos categorías que describimos.

- Recubrimientos con fosfato: el fosfatizado se aplica principalmente sobre acero, pero también puede realizarse sobre cinc y cadmio. Consiste en tratar al acero en una solución de fosfato de hierro, cinc o manganeso disuelto en ácido fosfórico diluido. Los recubrimientos de fosfato proporcionan una protección limitada, pero en cambio resultan ser una base excelente para la pintura posterior.
- Recubrimientos con cromato: el cromatizado es similar al fosfatizado y se emplea sobre el aluminio y sus aleaciones, magnesio y sus aleaciones, cadmio y cinc.

Por lo general, confieren un alto grado de resistencia a la corrosión y también constituyen una buena preparación para la aplicación posterior de pintura.

- Recubrimientos producidos por anodizado: el anodizado es un proceso electrolítico a través del cual se produce o se aumenta el espesor de una capa de óxido en su superficie. Este proceso se aplica a varios metales no-ferrosos, pero principalmente al aluminio y a sus aleaciones. Proporciona una buena protección y también resulta un buen tratamiento previo para la pintura posterior.
- Cementación: incluye los recubrimientos que modifican la superficie del metal convirtiendo la superficie más externa de la pieza metálica a proteger, en una aleación de alta resistencia a la corrosión. El proceso consiste en calentar la superficie metálica en contacto con polvo de zinc, polvo de aluminio o un compuesto gaseoso a base de cromo. Se obtienen capas de un espesor considerable y se lo emplea en aplicaciones muy específicas y que lo justifican.

#### **5.4 ESTRATEGIAS PARA NO REINCIDIR: UN BUEN PLAN DE MANTENIMIENTO**

Cualquiera que haya sido el método de prevención elegido, no habrá buenos resultados si no se cuenta con un plan de mantenimiento adecuado que permita seguir en el tiempo el grado de avance de la corrosión. Mediante programas de inspección y diagnóstico adecuados será posible detectar la iniciación de corrosión con una actitud proactiva, que permita intervenir antes de que se inicie la aparición de patologías visibles. De esta manera, será

posible evaluar la eficiencia y durabilidad del esquema de reparación implementado.

Por último, al poner de poner en marcha un programa de control se debe llevar adelante un control de obra exhaustivo que permita que se verifiquen las distintas etapas del esquema de control seleccionado y que asegure que se han seguido las etapas y las pautas previstas en las especificaciones correspondientes.

## CAPÍTULO 6

# Grandes fracasos que fueron noticia

Los daños ocasionados por corrosión pueden ser ínfimos, pequeños, importantes y a veces pueden cobrar gran magnitud, debido a las circunstancias particulares en que se presentan. Muchas de las fallas graves, que pueden ser atribuidas a corrosión, no han alcanzado estado público por múltiples razones, inclusive porque la evidencia desapareció en la catástrofe o no fue adecuadamente investigada. Sin embargo, otros casos sí han llegado a los titulares de medios de comunicación masivos.

Algunos ejemplos relevantes, ocurridos en distintos ámbitos y con diferente magnitud, se presentan a continuación.

### 6.1 ACCIDENTES AÉREOS

El 28 de abril de 1988, un Boeing 737 operado por la línea aérea Aloha y que llevaba 19 años en servicio, sufrió un accidente catastrófico que resultó decisivo para crear conciencia respecto del envejecimiento de aeronaves, tanto entre el público como en la comunidad de la aviación. El avión perdió una parte importante del sector superior del fuselaje en pleno vuelo a 24.000 pies. Con gran destreza, el piloto logró aterrizar el avión en la isla de Maui, Hawai con una azafata como única víctima.

Al investigar el accidente, se detectaron numerosas grietas por fatiga en la estructura de la aeronave, en la fila superior de remaches, en varias de las juntas del fuselaje. En el Boeing 737 de Aloha, se encontró evidencia de daños

múltiples por fatiga que condujeron a una grave falla estructural. El resultado del informe de investigación publicado en 1989 por Junta Nacional de Seguridad del Transporte, atribuyó el accidente a fallas en el programa de mantenimiento que resultó incapaz de detectar daños por corrosión. Anteriormente, en 1981, un avión similar había sufrido problema parecido en vuelo, dejando más de un centenar de víctimas fatales. Cuando se realizó la inspección de otras aeronaves con características semejantes, se encontraron problemas de corrosión y la presencia de grietas en varias de las uniones entre planchas del fuselaje.

Los procesos de corrosión y la subsiguiente acumulación de productos de corrosión voluminosos dentro de las juntas produjeron una variante de la corrosión por rendijas, que al progresar provocaron la separación de las superficies. Actualmente, se han diseñado instrumentos de inspección específicos para detectar esta condición peligrosa.

Además, se ha tomado conciencia de que los problemas asociados al envejecimiento de las aeronaves no se resuelven con la renovación de la flota. Los aviones con más horas de vuelo probablemente terminen al servicio de un nuevo operador. Por lo tanto, las cuestiones de seguridad en relación con el envejecimiento de las aeronaves deben ser bien comprendidas, instrumentando programas que deben aplicarse de forma rigurosa.

## **6.2 ACCIDENTES EN PLANTAS QUÍMICAS**

El 3 de diciembre de 1984 tuvo lugar en la India un accidente trágico, con gran repercusión en la opinión

pública a nivel mundial. Este es un ejemplo de cómo un problema de corrosión puede tener un enorme impacto ambiental y cobrar vidas, en este caso al causar una fuga de un gas altamente tóxico.

En la década de los años sesenta, India era un mercado potencial con 400 millones de población rural. El gobierno de este país tenía intención de aumentar el rendimiento de la producción agrícola y el uso de plaguicidas era fundamental para poder alcanzar este objetivo. Se decidió entonces establecer una fábrica de pesticidas en la India, lo que ofrecía una doble ventaja: abastecer rápidamente a la demanda y contribuir al desarrollo tecnológico y económico de aquella nación. Es así como la multinacional Union Carbide se introdujo en el mercado indio, y en 1967 se construyó una pequeña fábrica en Bhopal para la formulación del concentrado de SEVIN, que antes se importaba de Estados Unidos. Este pesticida cumplía con los requisitos de ser económico, eficaz contra las plagas más comunes, y completamente inocuo para el hombre y el medio natural. Sin embargo, el proceso de fabricación implica el empleo de unas sustancias fuertemente tóxicas entre las que se cuenta el metilisocianato (MIC), que es la base de la producción del SEVIN y una de las sustancias más inestables y peligrosas de la industria química.

A partir de 1983, las ventas comenzaron a caer y se decidió que la fábrica de Bhopal sólo se pondría en funcionamiento intermitentemente, en la medida en que así lo requiriese la demanda del mercado. Con las paradas de la planta se relajaban también los sistemas de seguridad: se apagaba el sistema de refrigeración de las cisternas donde se almacenaba el MIC, se desactivaba la torre de descontaminación y se apagaba la llama de la torre

incineradora. Se unieron por tanto tres factores que desencadenaron la tragedia en diciembre de 1984: ausencia de personal técnico especializado, corrosión de los materiales y equipos y desactivación de las medidas de seguridad.

Así las cosas, la noche de la tragedia la fábrica estaba parada. Uno de los escasos movimientos era el de unos obreros que realizaban tareas de limpieza con agua a presión en el interior de unos canales. El accidente se originó en un depósito enterrado, equipado con protección catódica, construido de acero inoxidable. El depósito contenía 40.000 kg de metilisocianato (MIC). Por razones aún desconocidas, entre 700 y 1.400 kg de cloroformo, así como 400 a 900 kg de agua entraron en contacto con el MIC. Entre ellos se produjo una lenta reacción química que desprendió calor y condujo al aumento de la temperatura. El sobrecalentamiento aceleró la corrosión de las paredes del recipiente, y el hierro proveniente de la oxidación del acero activó una reacción de trimerización del MIC, que contribuyó a producir un aumento considerable de la temperatura (hasta valores probablemente cercanos a los 200 °C) y de la presión (hasta valores superiores a 4 veces la presión atmosférica). El aumento de la presión provocó la apertura de la válvula de seguridad, durante unas dos horas. La instalación de lavado de gases no funcionó correctamente, con el agravante de que la antorcha que había en la planta para el quemado de los eventuales gases de salida estaba desmontada por mantenimiento. El resultado fue que aproximadamente 23.000 kg de MIC en forma líquida y como vapor fueron emitidos a la atmósfera.

La planta estaba ubicada en un barrio de clase trabajadora en la ciudad de Bhopal. La noche de la catástrofe coincidió con la celebración de un importante

concurso poético al que acudió mucho público procedente de toda la región e incluso de lugares más lejanos. Por este motivo, toda la ciudad estaba engalanada y mucha gente disfrutaba de la noche fuera de su hogar. Más de un millón de personas de hallaban en Bhopal en aquel fatídico momento. Al producirse la fuga de compuestos altamente tóxicos, no hubo ninguna advertencia para las personas que vivían alrededor de la planta, ya que las sirenas de emergencia estaban fuera de servicio. El efecto sobre las personas que habitaban en los asentamientos cercanos fue inmediato y devastador. Muchos murieron en sus camas, otros se tambalearon fuera de sus casas, ciegos y ahogándose, para morir en la calle. Muchos más murieron más tarde, aún después de llegar a los hospitales y centros de ayuda de emergencia. La mayoría de las muertes se ha atribuido a una insuficiencia respiratoria. Se ha estimado que al menos 3.000 personas murieron como consecuencia de este accidente, mientras que las cifras sobre el número de personas afectadas en distinto grado oscilan entre 200.000 y 600.000. La fábrica fue cerrada después del accidente.

El desastre de Bhopal fue el resultado de una combinación de errores legales, técnicos, organizativos y humanos. La causa inmediata de la reacción química fue la filtración de agua en el tanque de almacenamiento de MIC cuyas paredes estaban afectadas por corrosión. Los resultados de esta reacción se vieron agravados por la falta de medidas de contención y seguridad, y con una ausencia total de información de la comunidad sobre los riesgos y los procedimientos de emergencia.

### 6.3 ACCIDENTES EN CAÑERÍAS ENTERRADAS

Las explosiones de Guadalajara, México, ocurrieron el 22 de abril de 1992 en el barrio céntrico de Analco. Una secuencia de explosiones de gasolina en el sistema de alcantarillado destruyó 12 kilómetros de calles. Según cifras oficiales, como resultado de las explosiones murieron 206 personas, casi 500 personas quedaron heridas y unas 15.000 personas quedaron sin hogar.

Tres días antes de la explosión, los residentes de la zona comenzaron quejarse de un fuerte olor a combustible que venía de las alcantarillas. Algunos residentes incluso encontraron gasolina saliendo de su toma de agua. Aun así, no se consideró que fuera necesaria la evacuación de la zona, aunque los resultados de una investigación posterior al desastre mostraron que había fuertes indicadores que permitían anticipar la tragedia.

Al menos nueve explosiones fueron escuchadas por separado, comenzando aproximadamente a las 10:30 am hora local. Produjeron una zanja irregular que corrió por cerca de 2 km, casi contigua con el sistema de alcantarillado de la ciudad, produciendo agujeros de al menos seis metros de profundidad y tres metros de diámetro.

Aparentemente, algunos caños más antiguos habían sido reemplazados por tubos de conducción de agua nuevos, hechos de cobre revestido de zinc, que fueron ubicados cerca de una tubería de acero perteneciente a una estación de expendio de combustibles. La humedad de la tierra hizo que los metales sufrieran corrosión galvánica, que eventualmente originó un agujero que provocó que el combustible se filtrara hasta el subsuelo. Así, se fueron acumulando los vapores hasta que finalmente una chispa producto del roce de dos metales cualquiera (por ejemplo

cuando una boca de tormenta es acomodada de nuevo en su lugar) fue suficiente para desencadenar la devastadora secuencia de explosiones.

## **6.4 ACCIDENTES EN ESTRUCTURAS VIALES**

El Puente de Plata (Silver Bridge), fue un puente de suspensión de cadena construido en 1928 en West Virginia, Estados Unidos sobre el Río Ohio. Se lo llama puente de cadena porque en vez de cables utilizaba como sostén una estructura muy similar a la de las cadenas de las bicicletas.

El 15 de diciembre de 1967, durante la hora pico, el puente colapsó sin previa advertencia. Como resultado del accidente 37 vehículos cayeron al río y 47 personas murieron.

La causa del colapso fue inicialmente atribuida al proceso de fatiga de uno de los eslabones de la cadena, combinada con la baja temperatura del metal, y una supuesta sobrecarga del puente a raíz del intenso tráfico en un fin de semana de compras navideñas. La fatiga es una condición que se produce en los metales que están sometidos a movimiento repetitivo.

Una investigación más profunda demostró luego que la supuesta sobrecarga sobre los eslabones era muy pequeña en comparación con el peso del puente. Eso significaba que el eslabón casi no se movía cuando pasaban los vehículos, y en teoría tenía que durar muchísimos años antes de fatigarse.

Análisis de microscopía realizados sobre las piezas de metal mostraron que, si bien la superficie estaba sana, algunos milímetros más abajo, en todos los eslabones había grietas pequeñas. Incluso se encontraron grietas en muchos

eslabones que no habían fallado. El problema tuvo entonces su origen cuando se fabricaron las piezas de metal de la cadena. El proceso de enfriamiento del metal no fue controlado correctamente, y en el interior de la pieza se formaron pequeñas grietas que no llegaban a la superficie. Como no había grietas visibles, a la hora de construir el puente no se encontraron defectos en el metal. Pero en el día del colapso, fueron esas grietas las que provocaron la falla del puente por corrosión bajo tensiones, combinada con corrosión fatiga.

Otro factor importante que ayudó a acelerar la caída del puente era el peso de los automóviles y camiones que circulaban. Cuando el puente fue diseñado, el vehículo más utilizado (el modelo Ford-T) tenía un peso aproximado de menos de 700 kg. En 1967, el coche de la familia promedio pesaba 2000 kg o más. En 1967, el límite de peso para vehículos de carga alcanzaba a 27000 kg brutos. Los ingenieros civiles normalmente proyectan una vida útil superior a los 50 años, pero nadie podía prever que 40 años después de la construcción del puente las cargas debidas al tráfico aumentarían a más del triple.

El colapso del puente en West Virginia fue un desastre mayor que preocupó a toda la nación. El entonces presidente Lyndon B. Johnson ordenó una investigación a nivel nacional para determinar la seguridad de los puentes de la nación. En 1967 había 1.800 puentes en los Estados Unidos con 40 años de servicio, incluidos 1.100 puentes diseñados para el tráfico del Ford-T. A pesar de que el colapso del puente fue una tragedia, hubo aspectos positivos como resultados de este fracaso. A raíz de la investigación, el otro puente de cadena que quedaba en Estados Unidos fue demolido. También los códigos de diseño fueron replanteados y se les incorporaron medidas

de seguridad. Las inspecciones de los puentes son ahora más habituales y exhaustivas. Los ingenieros son ahora más conscientes de la corrosión fatiga y la corrosión bajo tensiones, lo que permite mejorar la calidad de las estructuras viales y de los programas de mantenimiento.

## **6.5 ACCIDENTES EN ESTRUCTURAS CIVILES**

En 1985, 12 personas murieron en Uster, Suiza, al desplomarse el techo de hormigón de una piscina. El techo estaba sostenido por tensores de acero inoxidable, que fallaron por corrosión bajo tensiones. En 2001, el falso techo de una piscina municipal en Holanda se derrumbó debido a una causa similar. Ha habido otros incidentes relacionados el microclima creado por las modernas piscinas cubiertas, entre ellos la caída del techo de una pileta de natación de un club ubicado en el centro de la ciudad de Mar del Plata, en la costa atlántica argentina, que en el año 2010 cayó sobre el agua. Afortunadamente, los seis nadadores que en ese momento utilizaban las instalaciones sólo resultaron con heridas leves.

Los ambientes de piscinas cubiertas han cambiado significativamente en los últimos años, más marcadamente en las piscinas públicas de uso masivo. Las temperaturas más altas del agua, combinadas con un aumento en el número de usuarios, ha requerido mayores niveles de desinfección. Es normal el empleo de bactericidas basados en cloro, que junto con los contaminantes introducidos por los nadadores, aceleran los procesos corrosivos en un entorno de piscina. Además, la humedad atmosférica en las piscinas es muy elevada, ya que proviene de la evaporación del agua de la piscina. Los niveles más altos de humedad

pueden dar lugar a la condensación en las partes más frías del edificio y en la noche. El agua incorpora los compuestos clorados y al repetirse el ciclo, la cantidad de agentes agresivos se puede acumular sobre las superficies metálicas. En consecuencia, el ambiente de las piscinas cubiertas es uno de los más agresivos.

Numerosos estudios indican que la corrosión bajo tensiones en las piscinas aparece como resultado de una combinación muy específica de tres condiciones: 1) el uso de materiales susceptibles como puede ser de acero inoxidable; 2) la presencia de tensiones, ya sea por carga que soportan las estructuras o como la tensión residual de los procesos de fabricación e instalación, y 3) la presencia de un ambiente agresivo específico.

## CAPÍTULO 7

# Consideraciones finales

### 7.1 APRENDER DE LOS ERRORES

La lista de tragedias es interminable. Pero lo más importante, luego de haber descripto tan solo algunas, es tomar conciencia y aprender para que el conjunto de la sociedad pueda aspirar a un futuro mejor.

Asegurar la nutrición (incluida el agua), salud, energía, infraestructura, disponibilidad de recursos, protección del medio ambiente, seguridad social e integridad individual implica satisfacer necesidades humanas básicas. Sin embargo, los gobiernos, industrias y comunidades que enfrentan el reto de cubrir estas necesidades básicas suelen no ser conscientes de que el éxito y los logros en estos campos están inseparablemente unidos a encontrar soluciones a problemas propios de la ciencia de materiales como lo son la degradación de los materiales y su protección. Por lo tanto, es importante contribuir a generar una conciencia global de que los materiales constituyen la base física de todos los productos y sistemas de ingeniería y que son las propiedades de los materiales (incluida la resistencia a la corrosión) las que muy frecuentemente definen las capacidades y limitaciones de una dada tecnología. Debe aceptarse públicamente que la preservación de los materiales y el control de la corrosión son factores que facilitan el avance de tecnologías. Investigación y desarrollo en este campo son, por tanto, de vital importancia y deberían recibir alta prioridad a la hora de distribuir recursos y recibir apoyo financiero.

## 7.2 EL VERDADERO SUPERHÉROE

Como hemos discutido en detalle y con numerosos ejemplos, la corrosión de los materiales metálicos no puede evitarse completamente pero si puede mitigarse y mantenerse bajo control.

Para tener éxito en la lucha contra la corrosión es clave el rol que juegue el profesional especialista en corrosión, que podrá ser un ingeniero, un supervisor de mantenimiento o un jefe de planta. No interesa cómo se lo designe, es importante la supervisión de alguien entrenado, que tenga los conocimientos suficientes para identificar, diagnosticar y establecer medidas de control para este fenómeno. Es primordial que sepa reconocer el problema y que pueda identificar cuál es su origen y estimar su gravedad. No alcanza con atacar sólo los síntomas o los signos visibles si no se ataca la verdadera causa. Quien se ocupe del control de la corrosión debe estar capacitado y tener una formación actualizada sobre las herramientas y métodos de control de que se dispone hoy en día, conocer las técnicas de inspección, los efectos de las variables de diseño, la forma de interpretar y aplicar la información sobre la corrosión y en situaciones complejas y que excedan sus conocimientos debe saber dónde recurrir para obtener ayuda.

Asegurar la educación apropiada y continua y sostener los programas de investigación y desarrollo orientados a la protección de materiales constituyen las bases para que el conjunto de la sociedad aspire a un futuro mejor. Son la capa y espada del verdadero superhéroe. Sólo así podremos enfrentarnos al villano con la esperanza de que la batalla tenga un final feliz.

## **Bibliografía**



1. Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas. J.A. González Fernández, 1989. Editorial: CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS. ISBN: 9788400069902
2. <http://corrosion-doctors.org/>
3. Introduction to Corrosion Science. E. McCafferty. 2010. Editorial: Springer-Verlag New York. ISBN 978-1-4419-0454-6
4. National Association of Corrosion Engineers. <http://www.nace.org>
5. Metal Stocks in Society. T. E. Graedel. Editorial: International Panel for Sustainable Resource Management, Working Group on the Global Metal Flows. ISBN: 978-92-807-3082-1
6. White Paper: Global Needs for Knowledge, Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control. G. Schmitt. 2009. World Corrosion Organization. [http://www.corrosion.org/images\\_index/whitepaper.pdf](http://www.corrosion.org/images_index/whitepaper.pdf)
7. Corrosion: understanding the basics. J. Davis. 2000. Editorial: ASM International. ISBN-10: 0871706415
8. "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States". G. Koch, M. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani and J.H. Payer. 2002. PUBLICATION N° FHWA-RD-01-156 from the U.S. Federal Highway Administration (FHWA).
9. "Hormigón armado: la corrosión ataca desde adentro". M. Vázquez y R. Fernández. Ciencia Hoy 14 (2004) 40-47. ISSN 1666-5171





