

# Corrosión

Índice

<b>Introducción</b> .....	2
<b>1. Conceptos</b> .....	2
<b>2. Tipos de corrosión</b> .....	5
<b>3. Corrosión uniforme</b> .....	5
<b>4. Corrosión por Cavitación</b> .....	8
<b>5. Corrosión intergranular</b> .....	14
<b>6. Corrosión galvánica</b> .....	16
<b>7. Fragilización por hidrógeno</b> .....	19
<b>8. Corrosión por picadura</b> .....	21
<b>9. Corrosión-erosión</b> .....	24
<b>10. Corrosión-desgaste</b> .....	26
Resumen .....	29
Referencias .....	30

## Introducción

Entendemos como corrosión a un proceso de degradación o proceso de “destrucción” de un material metálico. De igual manera, se puede entender cómo un proceso metalúrgico inverso esto debido a que el material intenta volver a su estado de menor nivel de energía, es decir, el material está perdiendo energía (está regresando a su estado natural), recordando que la función de un proceso metalúrgico es agregar energía a los materiales metálicos para llevarlo a un estado metaestable, siendo en este estado que los metales se pueden utilizar para las diferentes industrias. Existen diversos factores que fomentan la corrosión en los materiales, tema que será abordado más adelante.

La corrosión se puede presentar de forma uniforme o de forma localizada, de manera visible o no visible, siendo esta última la más peligrosa debido a que como no está a simple vista es difícil su detección y puede causar accidentes catastróficos. La corrosión representa una de las pérdidas económicas más importantes de las empresas, es por ello que es tan estudiada y se han logrado encontrar diversos métodos de protección contra esta.

### 1. Conceptos

Antes de comenzar de lleno con los tipos de corrosión, es necesario definir algunos conceptos que nos ayudarán a tener un mejor entendimiento sobre el tema en cuestión.

**Electroquímica:** La electroquímica es una rama de la química, la cual estudia las reacciones de óxido – reducción o mejor conocidas como reacciones redox, estas reacciones son aquellas en las que se presentan la transferencia de electrones de un átomo, de forma que este fenómeno se utiliza para provocar una reacción espontánea o no espontánea estas son utilizadas en las celdas electroquímicas.

**Celdas electroquímicas:** Existen dos tipos de celdas: las primeras son las electrolíticas, las cuales necesitan una fuente externa de energía eléctrica y esto provoca que se genere una reacción química no espontánea; la segunda y en la cual se profundizará más, son las celdas galvánicas, en estas no existe una fuente de energía externa, sino todo lo contrario esta celda generará energía eléctrica mediante una reacción química espontánea.

**Celda galvánica:** En la celda galvánica ocurren procesos de oxidación y reducción, para que este proceso se pueda llevar a cabo se necesitan dos electrodos, uno de ellos será un electrodo catódico y el segundo es un electrodo anódico, en el electrodo anódico es donde va a suceder el proceso de oxidación mientras que en el electrodo catódico se presenta un proceso de reducción. Dado a que esas reacciones se producen simultáneamente en la superficie de los metales se crea un ciclo electrónico químico esto da lugar a las reacciones anódicas y catódicas.

Para generar la celda galvánica no es necesario que estén sumergidas en una solución salina ni tampoco es necesario que la ubicación de los electrodos este fija ya que pueden estar adyacentes o estar muy separados, esto por ejemplo si los metales están en contacto uno de ellos puede ser el ánodo y el otro el cátodo lo que va a provocar una corrosión galvánica. Por otro lado, también se tiene la variación en la superficie donde las concentraciones de oxígeno del medio ambiente pueden dar lugar a la formación de un ánodo en las zonas expuestas con menor contenido de oxígeno provocando así la corrosión.

[1]

Otra forma en la que puede suceder es la variación de la homogeneidad de la superficie metálica, también la corrosión se puede generar debido a la presencia de inclusiones en la pieza, al igual que diferentes fases dentro de un material. Todos estos defectos provienen de un mal proceso de metalurgia, generando un cátodo y un ánodo dando paso a una celda galvánica que dará paso a una oxidación. [2]

**Efecto de la temperatura:** El efecto de la temperatura usualmente hace que las reacciones químicas aumenten su velocidad de reacción y para la oxidación no será un caso diferente, ya que un incremento súbito de temperatura aumentará la velocidad de oxidación en la pieza, para este caso la velocidad de oxidación tendrá un comportamiento exponencial, pero no solo con un aumento súbito sino también con temperaturas bajas que van en aumento, en un principio la velocidad de oxidación no aumentará hasta que la temperatura aumente.

[3]

**Diagrama de Pourbaix:** Para que suceda una corrosión se necesita una energía impulsora para que los electrones fluyan entre el cátodo y el ánodo, esta energía impulsora es la

diferencia de potencial entre los sitios anódicos y catódicos, esto se presenta debido a que una reacción de óxido o de reducción se asocia con su potencial determinado por la tendencia la reacción a tomar lugar espontáneamente.

La diferencia de potencial es una medida de tendencia útil a la hora de estudiar las relaciones de corrosión, la cual mediante un diagrama de equilibrio desarrollado por pourbaix, permite realizar un análisis en el cual, al comparar la variable antes mencionada contra el ph de un elemento, se puede obtener la zona en que se encuentra nuestro material. Este diagrama es de gran importancia para los procesos de corrosión.

Entonces los diagramas de pourbaix o también conocidos como los diagramas de potencial contra ph se suelen utilizar para ayudarnos a la predicción de los Estados más estables un metal, sus productos de corrosión y sus iones asociados a una solución acuosa, entonces en este diagrama se representa en forma gráfica el potencial de equilibrio frente a la actividad de iones. [4]

En esta representación gráfica la característica es que contienen tres tipos de líneas horizontales, verticales y las oblicuas. Las horizontales indican reacciones con dependencia solamente del potencial, las verticales por su parte indican reacciones con dependencia solamente del ph y las líneas oblicuas indica reacciones con dependencia tanto potencial como del ph. También en dicho diagrama se presentan con dos tipos de trazados: uno continuo y uno discontinuo fino; si esta línea aparece con un trazado continuo indicará un equilibrio entre dos especies sólidas o bien entre una especie sólida y una soluble con distintos valores de actividad, por el contrario sí aparece con un trazado discontinuo indicará un equilibrio entre dos especies solubles (Figura 1) [5]

Los diagramas de pourbaix son muy útiles en el campo de corrosión, también se utilizan en los campos de electrólisis industrial y en los procesos de recubrimientos electrolíticos, entre otros.

Este tipo de diagramas se utilizan mucho debido a que estos predicen el comportamiento de los materiales frente a la corrosión, ya que esto permite predecir las zonas inmunidad,

corrosión y pasivación de un metal en un medio agresivo esto también será determinado a partir de la fase termodinámica del metal. [6]

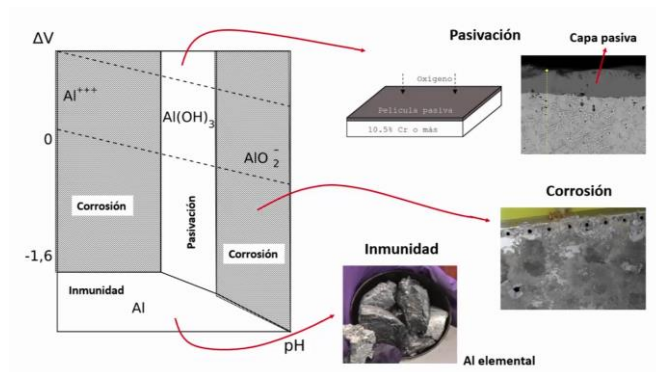


Figura 1. Diagrama de pourbaix donde se muestran las zonas de inmunidad, pasivación e inmunidad del aluminio.

**Inmunidad:** Esta zona es donde el material no se encuentra bajo un proceso de corrosión.

**Corrosión:** En esta zona es en la que se evita estar ya que el material ya está bajo un proceso de oxidación y por lo tanto provoca que el material pierda sus propiedades.

**Pasivación:** Zona en donde el material forma una capa estable de óxido u otra sal en su superficie, lo que favorece al metal ya que esta capa protege al sustrato del proceso de corrosión.

## 2. Tipos de corrosión

Existen diferentes tipos de corrosión que se caracterizan dependiendo tanto de la naturaleza del material, como de las condiciones del medio ambiente en donde se encuentren. Una forma común de clasificar los tipos de corrosión es de la siguiente manera:

### 3. Corrosión uniforme

Comencemos con el tipo de corrosión más común, la cual es la más fácil de apreciar debido a que se puede identificar dado las características visuales que presenta. A continuación, se muestra una definición formal, así como las causas que la hacen presente.

La corrosión uniforme o también conocida como corrosión generalizada, es la forma más común de corrosión, la cual se caracteriza por ser una reacción química o electroquímica que se produce de manera homogénea en toda la superficie expuesta a un tipo de atmósfera.

Este tipo de corrosión es responsable de la mayor pérdida de material, tanto que puede provocar un adelgazamiento severo que muchas veces tiende a llegar a ser la causa de falla de una pieza. Los materiales homogéneos sin una tendencia significativa a la pasivación en el entorno real son susceptibles de sufrir esta forma de corrosión. [7]

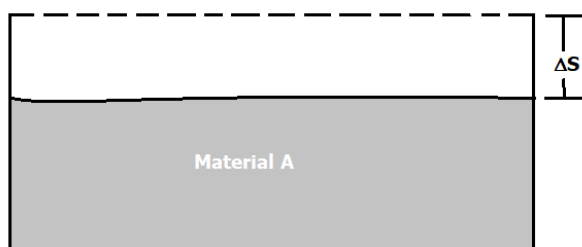


Figura 2. Corrosión uniforme.  $\Delta S$  indica la cantidad de material que se perdió debido a este tipo de corrosión.

### **Causas**

La velocidad de corrosión para estos casos es altamente influenciada por la existencia de impurezas y fases distintas en el material, ya que estas inducen a una variación en la energía potencial, formando electrodos a pequeña escala, propiciando el proceso de corrosión. [8] Sin embargo, este tipo de corrosión no se considera “peligrosa” debido a que como ya se mencionó esta se puede apreciar de forma visual en la superficie.

Otra causa para que se presente este fenómeno es debida al ambiente que se encuentre la pieza puesto que esto también determina la velocidad en que se propague la corrosión.

### **Ejemplos**



Figura 3. Fotografía lámina de metal que presenta corrosión.

En la fotografía de la Figura 3 se presenta una corrosión uniforme en una lámina de metal que se encuentra expuesta en la azotea de una casa, las causas probables de la corrosión fueron debido a las condiciones del ambiente.



Figura 4. Fotografía lata de metal que presenta corrosión.

En la Figura 4. Se observa corrosión generalizada en una lata, está al igual que la figura 3, se encontraron en el mismo lugar y las causas se deben a los mismos factores que para la lámina.

La corrosión en las imágenes 3 y 4 se pueden observar a simple vista, por ello es fácil saber si las piezas están en proceso de corrosión y saber si es necesario cambiarlas o realizar un proceso de protección.

### **Formas de prevención**

Dado que este tipo de corrosión es fácil de identificar a simple vista, se puede actuar de manera oportuna con lo que se evitará un daño mayor o una pérdida de material considerable.

La prevención de la corrosión uniforme puede lograrse seleccionando un:

1. Material adecuado que tenga una microestructura uniforme,
2. Revestimiento o pintura,
3. Inhibidor(es) para retardar o suprimir la corrosión.
4. Protección catódica, que es un proceso electroquímico. [9]

Adicionalmente se puede mencionar que la utilización paralela del diagrama de Pourbaix y de las curvas de sobretensión resulta a veces útil para evaluar la tipicidad y la estabilidad de la corrosión uniforme en diferentes condiciones. [10]

#### **4. Corrosión por Cavitación**

La cavitación es un fenómeno hidrodinámico en el que se forman pequeñas cavidades llenas de vapor en una superficie debido a los cambios rápidos de presión en lugares donde la presión es baja. Cuando las cavidades experimentan una alta presión pueden colapsar, generando una onda de choque que es más fuerte mientras más cerca esté de la burbuja.

La cavitación-corrosión es la combinación del deterioro de la superficie causado por la formación y colapso de burbujas en un líquido y de la corrosión. La onda de choque debido al colapso de las cavidades se lleva la capa protectora de óxido de los metales de tal forma que entre esta zona y la que permanece pasivada se forma un par galvánico en el que el ánodo es la zona que ha perdido su capa de óxido y cátodo la que la mantiene. [11].

#### **Causas**

La cavitación-corrosión ocurre en instalaciones como turbinas hidráulicas, aspas de turbinas, hélices, aviones sumergidos e impulsores de bombas.

Para entender cómo se generan y colapsan las burbujas se considerará un tubo con agua y un pistón. Cuando el pistón se mueve hacia afuera el volumen aumenta y la presión disminuye. Con presión reducida el agua hierve y se forman burbujas. Cuando el pistón se mueve hacia adentro el volumen disminuye y la presión aumenta. Con presión aumentada las burbujas colapsan. Este proceso se repite muchas veces y muy rápido dentro de turbinas e impulsores, causando una rápida formación de burbujas y su colapso.



La superficie metálica desprotegida sufre corrosión y la capa protectora se reforma. La formación y colapso de las burbujas destruyen la capa superficial recién formada. Estos procesos se repiten para crear una cavidad, que crece en profundidad hasta que ocurre la falla.

La cavitación se produce en las bombas cuando la entrada de la bomba no suministra fluido a la bomba lo suficientemente rápido para igualar la cantidad de fluido que se descarga de la salida de la bomba. Las burbujas de gas se forman dentro de la bomba en estas condiciones y posteriormente colapsan bajo presión. El fluido de alta velocidad golpea el metal cuando las burbujas colapsan en la superficie del metal.

En ausencia de capas superficiales protectoras, la formación de burbujas y el colapso propagan la cavitación por deformación plástica (que arranca las partículas metálicas de la superficie) del metal. La corrosión facilita aún más la propagación de la cavitación. Por lo tanto, la corrosión por cavitación es una acción sinérgica que involucra procesos tanto mecánicos (formación de burbujas y colapso) como químicos (corrosión). [12]

## Ejemplos

Las figuras 6 y 7 muestran piezas dañadas por la cavitación. Son piezas sometidas a cambios de presión en lugares con agua. La figura 5 es una válvula que tuvo su capa de óxido protectora removida, generando pérdida de material en una zona específica.



Figura 5. Fotografía de una turbina.

La figura mostrada es una turbina. En esas piezas hay cambios de presión bruscos y una corriente de fluido que arranca la capa protectora.

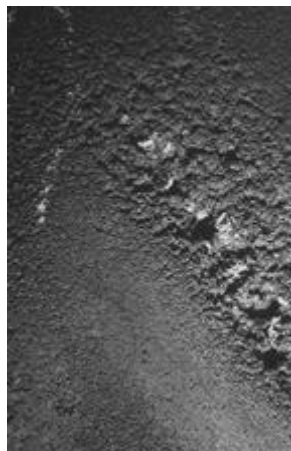


Figura 6. Daño por cavitación en la placa de una válvula para una bomba hidráulica de pistones axiales.

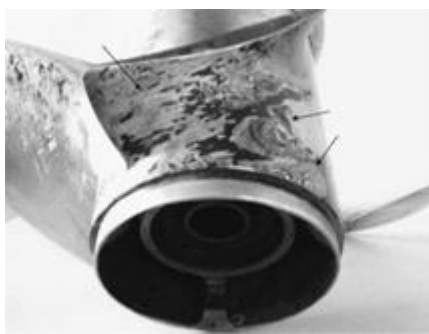


Figura 7. Cavitación-corrosión en una hélice de acero inoxidable.

### **Formas de prevención**

El daño por cavitación se puede controlar minimizando la probabilidad de formación de burbujas y colapso, lo que se puede lograr diseñando sistemas hidrodinámicos con diferencias de presión más pequeñas.

En el caso de una bomba que experimente cavitación, el enfoque estándar es aumentar la presión del sistema lo suficiente para evitar la formación de burbujas en los puntos de baja presión del sistema. Además, los sistemas hidrodinámicos se fabrican con materiales que son resistentes a la corrosión y al daño mecánico.

Con respecto a la selección de materiales, debe tenerse en cuenta que los materiales dúctiles son más resistentes que los materiales frágiles, los materiales con mayor resistencia a la fatiga también tienen una mayor resistencia a la cavitación-corrosión y la resistencia a la cavitación-corrosión aumenta con la disminución del tamaño de grano de los materiales.

Las superficies rugosas proporcionan más sitios para la nucleación de burbujas que las superficies lisas; por lo tanto, las superficies de los impulsores y las hélices de la bomba pueden alisarse. Las superficies de los materiales están protegidas con revestimientos; comúnmente caucho o plástico. [13]

## Corrosión por esfuerzos

La corrosión bajo esfuerzos es un proceso complejo y peligroso debido a que se generan grietas en el material lo que provocará que la vida útil de la pieza disminuya, este tipo de corrosión es complejo, ya que existen muchos factores que interactúan para generar este tipo de corrosión.

Los factores se pueden dividir en tres grandes grupos:

1. Materiales
2. Ambiente
3. Esfuerzos

En el primer grupo se consideran factores como el acabado superficial o si la pieza ha tenido algún tratamiento térmico entre otros factores, para el segundo grupo se toman en cuenta las interacciones ambientales con la pieza y en último grupo se colocan las variables mecánicas que están en contacto con el material, usualmente toda esta información se suele colocar en un diagrama de venn, Figura 8.

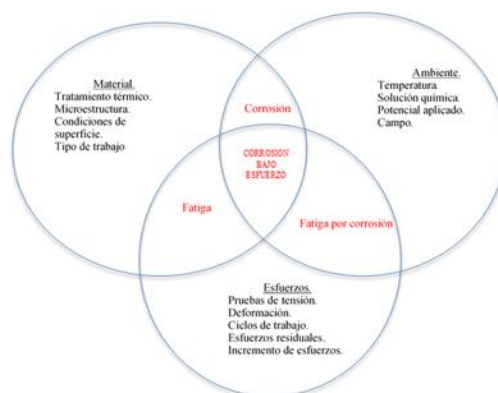


Figura 8. Diagrama de Venn

En este diagrama se muestra los factores que interactúan entre sí y las consecuencias de dichas interacciones.

Para que se pueda dar una corrosión bajo esfuerzos es necesario la unión de los tres grupos, ya que de lo contrario se tienen otros tipos de fenómenos, por ejemplo, si solo existen factores del material y ambientales, lo que se generará será un proceso de corrosión o si solo se tiene la interacción entre factores de esfuerzos y de material, sólo se presentará un proceso de fatiga.

El proceso de corrosión por esfuerzos sólo sucederá cuando se unan factores de los tres grupos.

Para que suceda este tipo de corrosión primero se debe producir un agrietamiento por la acción simultánea y combinada de una tensión cíclica junto con la presencia de un medio agresivo que favorezca el proceso de corrosión.

A diferencia de otros procesos de corrosión en esta los esfuerzos deben ser de cíclica, no estática, y no es necesaria la presencia de un medio agresivo específico para cada material metálico. [14]

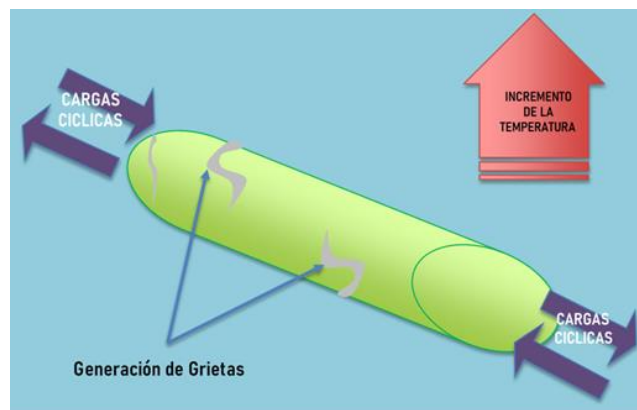


Figura 9. Corrosión por esfuerzos

En la Figura 9 se muestra el esquema con una barra donde la superficie de esta en mal estado y se somete a cargas cíclicas con a un ambiente de elevadas temperaturas lo que va genera grietas y posteriormente en una fractura.

## Causas

1. Este tipo de corrosión suele suceder cuando se realiza un mal proceso de soldadura, en consecuencia, de este mal procedimiento puede introducir defectos físicos o químicos y cambiar las características del material, lo que fomentará este tipo de corrosión.
2. Un cambio en la función de la pieza.
3. Cuando la pieza se someta a diferentes variaciones en las cargas, además agregando la variación de temperatura o del ambiente de trabajo de la pieza.
4. Las propiedades superficiales de un metal puede cambiar con el tiempo de operación
5. Los procesos de corrosión localizada, como picaduras, corrosión por grietas o corrosión intergranular pueden iniciarse y convertirse en precursores del agrietamiento por corrosión por esfuerzos. [15]

## Ejemplos



Figura 10. Fotografía del avión B737

Figura 10. Se muestra el Avión B737 que sufrió una falla catastrófica debido a corrosión por esfuerzos. El 28 de abril de 1988, el vuelo 243 de Aloha Airlines sufrió un accidente donde obligó al piloto a realizar un aterrizaje forzoso, la causas probables fue que se encontraron signos de corrosión en la zona de las juntas de las placas de aluminio que conforman el casco del avión y esto hizo que el material se fatigara más rápido y esto acortó su ciclo de vida. [16]

## Formas de prevención

Se pueden realizar recubrimientos, como procesos de conversión de metales, algunos recubrimientos dentro de este proceso en al anodizado, fosfatado y cromatado, también se puede utilizar algún proceso de electrodeposición como el zincado, cromado, niquelado o estañado u optar por algún proceso por inmersión en caliente como el galvanizado que es el que más se utiliza en la industria debido a su largo ciclo de vida.

Para elegir el recubrimiento se deben considerar el ambiente de trabajo y la función de la pieza además que queda a consideración del diseñador y de los recursos económicos con los que se cuenta.

### 5. Corrosión intergranular

La corrosión intergranular es proceso de corrosión galvánica que sucede en el límite de grano. Esto debido a la sensibilización de la pieza.

La sensibilización de un metal suele ocurrir cuando este es sometido a una elevada temperatura o es expuesto a largos periodos de elevadas temperaturas, lo que provocará que en el límite de grano se genere una nucleación de precipitados y esto provocará que se generen pequeñas celdas galvánicas entre el límite del grano y el grano, debido al diferencial de potencial que existe entre ambos, entonces una corrosión intergranular es una proceso de corrosión galvánica localizada en los bordes de grano.[17]

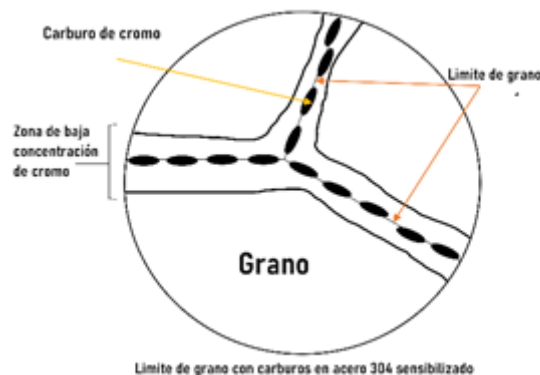


Figura 11. Sensibilización de un acero 304

Figura 11. Se muestra la sensibilización de un acero 304 y el precipitado de carburo de cromo en el límite de grano, lo cual ocasionará una corrosión galvánica. [18]

### Causas

Los procesos que causan este tipo de corrosión son el proceso de soldadura y los tratamientos térmicos.

Esto debido a que el metal se está sometiendo a una elevada temperatura en el proceso de soldadura y en un tratamiento térmico porque se somete la pieza a un periodo largo de elevadas temperaturas, se debe aclarar que esto sucede cuando se realizan de forma errónea estos procesos.

### Ejemplos

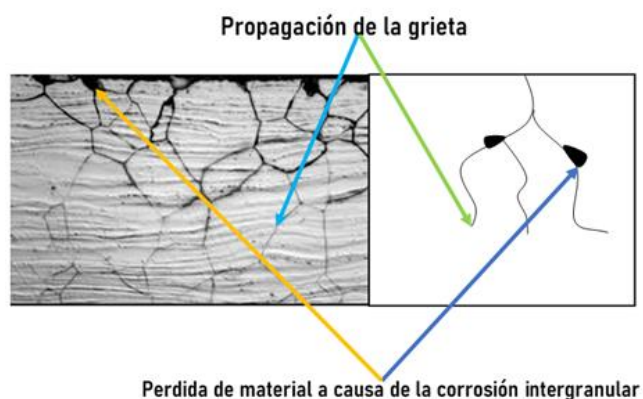


Figura 12. Diagrama esquemático donde se muestra la corrosión intergranular en una pieza metálica y la propagación de la grieta.

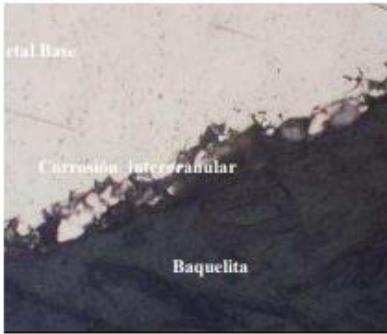


Figura 13. Se muestra el resultado de una oxidación intergranular debido a un cordón soldadura X 500 después de un mes y medio de su colocación. [19]

### **Formas de prevención**

Usualmente este tipo de corrosión se presenta más en aceros es por ello que las formas de prevención estarán más enfocados en este tipo de metales.

La corrosión intergranular puede ser controlada con los métodos siguientes:

1. Utilizando un tratamiento de calentamiento a alta temperatura, 500 a 800°C, seguido de un enfriamiento con agua, los carburos de cromo pueden ser disueltos y volver a la solución sólida. [20]
2. Añadiendo un elemento que pueda combinarse con el carbono del acero para que no pueda formarse el carburo de cromo. Como adiciona niobio y titanio, para generar una condición estabilizada. [21]
3. Bajando el contenido en carbono alrededor del 0,03 por 100 en peso o menos para que no puedan precipitar cantidades significativas de carburo de cromo. [22]

### **6. Corrosión galvánica**

Otro tipo de corrosión que se puede apreciar de manera visual y que se presenta de manera común en muchos materiales es la corrosión galvánica, la cual se da principio ante el contacto de dos materiales y la existencia de un ambiente corrosivo.

La corrosión galvánica ocurre cuando existe una unión, física o eléctrica, entre metales de diferente naturaleza, los cuales, en la presencia de un electrolito, forman una celda



electroquímica, donde el material de menor potencial electroquímico es el que se corroe. [23]

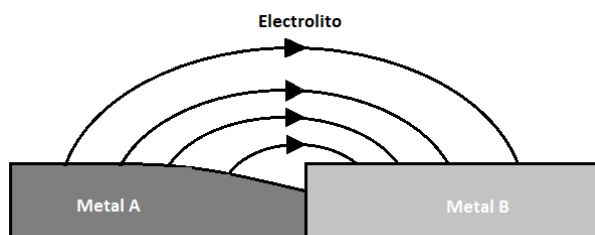


Figura 14. Proceso de corrosión galvánica

### Causas

La corrosión galvánica es una corrosión química o electroquímica. Esta última se debe a una diferencia de potencial entre dos metales diferentes conectados a través de un circuito para que se produzca un flujo de corriente desde el metal más activo (potencial más negativo) hacia el metal más noble (potencial más positivo). El acoplamiento galvánico es una célula galvánica en la que el ánodo es el metal menos resistente a la corrosión que el cátodo. [24]

Cabe mencionar que este fenómeno en muchos casos es inducido, puesto que a través de este tipo de corrosión se pueden obtener varios beneficios, tal es el caso de una batería / pila o incluso se puede utilizar como un ánodo de sacrificio.

Este tipo de corrosión es muy vista en partes que requieren sujeción, es decir en donde hay remaches o tornillos. Los cuales a veces son colocadas de manera intencional debido a que el reemplazo de estos elementos puede ser más viable en términos de costo en referencia a otros métodos de sujeción.

Un factor de importante consideración es la relación de área de la zona de contacto entre los materiales. Entre mayor sea la relación del ánodo respecto al cátodo, el proceso de corrosión ocurre con mayor velocidad. [25]

## Ejemplos



Figura 15. Corrosión galvánica, placa con tornillos



Figura 16. Corrosión galvánica, mismo caso que la figura anterior.

Las figuras 15 y 16 muestran como se ve la corrosión galvánica. Uno de los materiales no muestra fallas y el otro se ve como se oxida. En este caso, el tornillo sufrió corrosión y la tuerca no se aprecia daño alguno.

### Formas de prevención

Las prácticas siguientes sirven para combatir la corrosión galvánica. algunas veces se usan varias simultáneamente.

1. Selección de materiales lo más cercano posible en la serie galvánica.
2. Evitar el efecto de área desfavorable.
3. Aislamiento eléctrico entre los diferentes materiales.
4. Aplicar bien los recubrimientos, sobre todo el recubrimiento sobre el ánodo.
5. Añadir inhibidores para disminuir la agresividad del medio.
6. Evitar la unión con rosca para los materiales que están muy separados en la serie galvánica; es mucho mejor soldar con un metal parecido o más noble que la estructura.

7. Diseñar zonas anódicas fácilmente renovables o de mayor espesor.
8. Instalar un tercer metal anódico con respecto a ambos materiales utilizados (protección catódica). [26]

## **7. Fragilización por hidrógeno**

El hidrógeno es responsable de muchas fallas que ocurren en los metales especialmente en aquellas industrias que trabajan con ambientes que lo contienen o pueden liberarlo por reacciones con el material. [27]

Este fenómeno se produce cuando el hidrógeno entra en la estructura como defecto intersticial, es decir en una primera etapa el hidrógeno quedará en la superficie del componente metálico y después de un tiempo el hidrógeno se introducirá en el componente metálico debido a la absorción de este, esto causará fracturas, esfuerzos residuales y obstáculo en el movimiento de dislocaciones.

Este tipo de daño se traduce por una alteración de la mayoría de las propiedades mecánicas del material, especialmente pérdida de la ductilidad, pudiendo llegar a producir rotura catastrófica. [28]

### **Causas**

Para que se produzca la fragilización se necesita: una cantidad mínima de H en el material (concentración crítica), una tensión mínima en el rango elástico (tensión crítica) aplicada y/o interna y una microestructura susceptible. [29]

Esto se debe en parte a que la tipología de fractura puede variar en función del elemento microestructural con el que interaccione el hidrógeno. Por ejemplo, cuando el hidrógeno se concentra en las juntas de grano, se considera que reduce la energía de los enlaces atómicos y facilita la aparición de fracturas intergranulares. La segregación del hidrógeno a precipitados incoherentes con la matriz, sin embargo, puede dar lugar a los tres tipos de rotura: dúctil, intergranular o de tipo clivaje. Evidentemente esto complica asociar a cada rotura su mecanismo íntimo de fragilización, porque no existe una correspondencia unívoca entre el modo de fallo y el estado de disolución del hidrógeno en el material. [30]

Este fenómeno puede ser reversible o prevenido, si es detectado a tiempo, puede eliminarse mediante tratamientos adecuados. Pero es muy peligrosa, debido a que no es detectable.

## Ejemplos

### PROCESO DE FRAGILIZACIÓN POR HIDRIGENO.

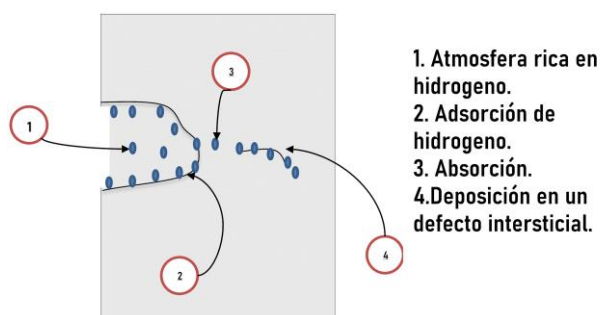


Figura 17. Etapas de la fragilización por hidrógeno, debido a una fuente externa. Tomada del instituto sabata, CNEA.

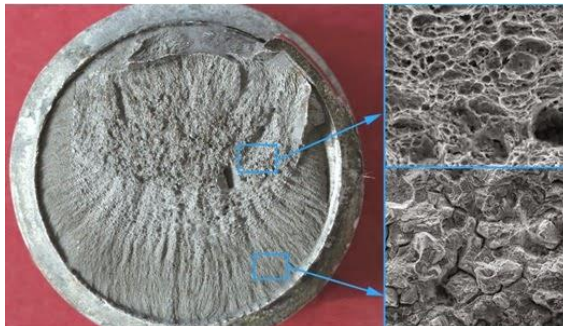


Figura 18. Fragilización por hidrógeno. Tomado de AZTERLAN, muestra una fractura frágil. Evidencia de que se fragilizó.

## Formas de prevención

1. Una selección de material con baja dureza.
2. Realizar un proceso de revenido.
3. Sustituir la atmósfera que rodea a la pieza.
4. Sustituir el material.

## 8. Corrosión por picadura

La corrosión por picadura es un proceso electroquímico de óxido-reducción que ocurre en agujeros localizados, llamados células, en la superficie de metales cubiertos por una capa pasivada. La corrosión por picadura es un sistema de corrosión extremadamente localizado que genera agujeros en el metal.

La corrosión por picadura la experimentan numerosos sistemas metálicos, entre los que destacan los sistemas metálicos base aluminio, base cobre y base titanio, entre otros, así como distintos aceros inoxidable, mientras que otros sistemas son inmunes, como los sistemas metálicos base berilio. [31]

### Causas

La causa principal es la disolución de la capa protectora y la acidificación del electrolito causado por la aireación insuficiente. El proceso es el siguiente:

Iniciación de la picadura: Se puede formar una picadura inicial en la superficie cubierta por una película de óxido pasivado como resultado de lo siguiente

1. Daño mecánico de la película pasiva causado por arañazos. La reacción anódica comienza en la superficie metálica expuesta al electrolito. La superficie circundante pasivada actúa como el cátodo. Partículas de una segunda fase que emergen sobre la superficie metálica.
2. Los límites de grano pueden funcionar como ánodos locales que causan corrosión galvánica localizada y la formación de picaduras iniciales.
3. Los esfuerzos localizados en forma de dislocaciones que emergen en la superficie pueden convertirse en ánodos e iniciar picaduras.
4. El entorno no homogéneo puede disolver la película pasiva en ciertos lugares donde se forman los pozos iniciales.

Crecimiento de la picadura: En presencia de iones cloruro, las picaduras crecen mediante un mecanismo autocatalítico. La corrosión por picadura de un acero inoxidable se ilustra en la figura 19 .

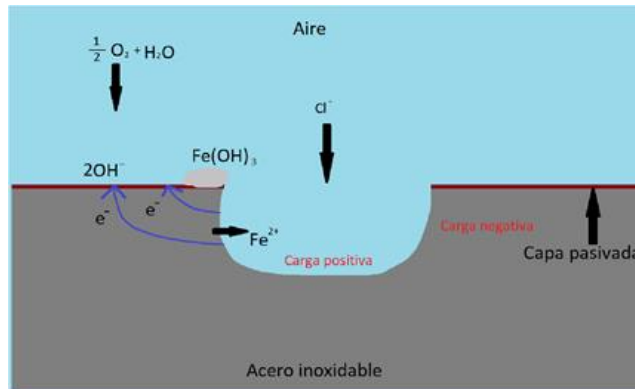


Figura 19. Diagrama de crecimiento de picadura

El acero presenta una oxidación, liberando iones Fe y electrones:

1. Los electrones liberados por el ánodo fluyen hacia el cátodo (superficie pasivada) donde se descargan en la reacción catódica:
2. Como resultado de estas reacciones el electrolito en la picadura gana carga positiva en contraste con el electrolito que rodea a la cavidad, que se carga negativamente.
3. La carga positiva de la picadura atrae iones cloruro que aumentan la acidez del electrolito de acuerdo a esta reacción:
4. El ph de la picadura disminuye y acelera el proceso de corrosión.

## Ejemplos



Figura 20. Poste con picaduras en el puente de las llamas.

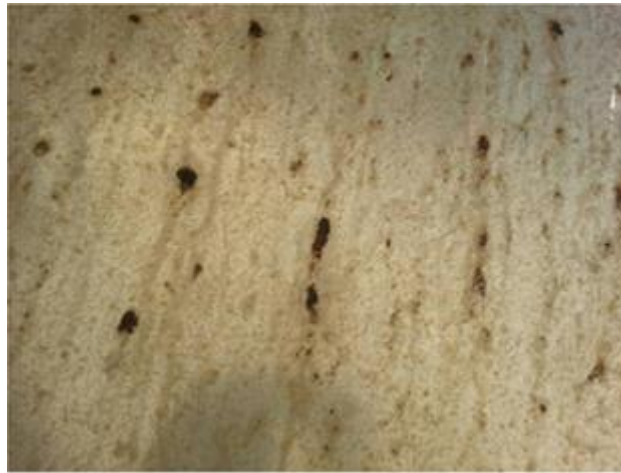


Figura 21. Pared metálica con picaduras.



Figura 22. Tubería con agujero causado por corrosión por picadura

Para el caso de las tuberías de Guadalajara, figura 22, las autoridades determinaron que las causas de la corrosión estuvieron relacionadas al material y al ambiente de operación. El material era acero y operaban en tierra húmeda. Fue la humedad que desencadenó la reacción electroquímica que causó la corrosión que generó el agujero.

### **Formas de prevención**

Una solución es usar inhibidores de corrosión, que son compuestos químicos que frenan la tasa de corrosión de un metal que está en contacto con un fluido. Por ejemplo, el benzotriazol retarda la corrosión en el cobre. Sin embargo, se debe aplicar suficiente inhibidor porque en cantidades bajas puede generar otro ánodo que agrave la formación de picaduras.

Otra solución es controlar la composición de los electrolitos para generar menos iones cloruro o aumentar el ph para tener ambientes menos ácidos.

Una solución común es aplicar protección catódica al metal para suprimir el flujo de electrones hacia el metal, previniendo oxidación. [32]

## 9. Corrosión-erosión.

La corrosión-erosión es el deterioro de un metal debido al movimiento de un fluido. Se presenta por un ataque combinado: ataque químico y ataque mecánico. El fluido actúa como agente corrosivo y con su movimiento se genera un mecanismo de desgaste abrasivo, es por ello que este tipo de corrosión causa el desgaste de las piezas de forma rápida en comparación con otras.

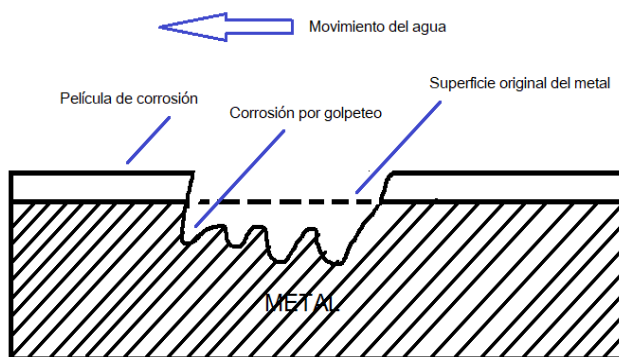


Figura 23. Mecanismo esquemático de la corrosión-erosión.

### Causas

En la figura 23 podemos observar con más claridad los efectos de la corrosión-erosión, que debido al movimiento del fluido la superficie metálica se reduce formando huecos y ondulaciones.

La mayoría de los metales y aleaciones son susceptibles a daños por este tipo de corrosión sobre todo cuando su resistencia a la corrosión se debe a la formación de una película protectora (pasivación) como el aluminio, plomo y aceros inoxidable. El flujo mecánico daña las películas y las puede arrancar. Los metales suaves como cobre y plomo son especialmente sensibles a este tipo de corrosión. [33]



## Ejemplos

Muchos tipos de medios corrosivos pueden causar corrosión-erosión: gases, soluciones acuosas, sistemas orgánicos y metales líquidos. Cualquier tipo de equipo expuesto a fluidos en movimiento es susceptible a esta corrosión: sistemas de tubos (especialmente codos y tes), válvulas, bombas, propulsores, impulsores, agitadores, tanques agitados, tubería de intercambiadores de calor, hojas de turbinas, toberas, entre otros. [34] Algunos de estos ejemplos se muestran en las figuras 24 y 25.



Figura 24. Tubería con ondulaciones y huecos causados por corrosión-erosión.

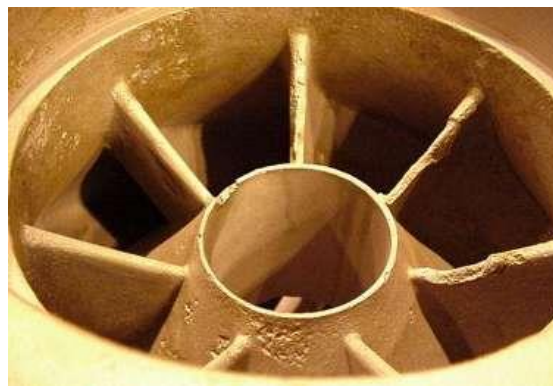


Figura 25. Álabes de una bomba con corrosión erosión debido al movimiento de un fluido. [35]

Las figuras 24 y 25 muestran equipos de ingeniería que perdieron material debido a que estaban expuestos a un fluido en movimiento, causando su desgaste superficial.

## Formas de prevención

Se usan los siguientes cinco métodos de reducción o prevención:

1. Selección de materiales más resistentes: Es casi siempre la solución más económica de este problema.
2. Diseño adecuado: Se trata de cambios en forma, tamaño y geometría de las piezas.
3. Alteración del medio corrosivo: Conviene filtrar las soluciones para eliminar partículas sólidas en suspensión y tratar de reducir la temperatura del proceso.
4. Recubrimientos. En algunos casos capas duras o superficies soldadas reducen la corrosión erosión si la capa tiene buena resistencia a la corrosión.
5. Protección catódica. Ayuda a reducir el ataque, pero no es muy usual aplicarla en estos casos.[36]

## 10. Corrosión-desgaste

Se trata de una corrosión localizada que ocurre en el área de contacto entre materiales bajo carga mecánica y sujetos a vibraciones y a desplazamiento: se forman picaduras y rayas en el material, rodeando de productos de corrosión. Este proceso es ilustrado en la figura 26. La corrosión-desgaste (inglés: fretting corrosion) es un caso especial de corrosión erosión y ocurre en la atmósfera en lugar de condiciones acuosas. [37]

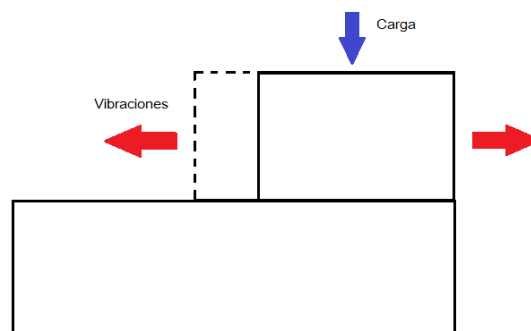


Figura 26. Mecanismo de la corrosión-desgaste.

Este tipo de corrosión causa mucho deterioro debido a la destrucción de componentes metálicos y a la producción de óxidos, lo que puede llevar a una pérdida de tolerancia y a un aflojamiento de partes ajustadas a presión. Además, puede iniciar una fractura por fatiga ya que al aflojarse las partes puede aumentar las deformaciones y las picaduras actúan como concentradores de esfuerzo. [38]

## **Causas**

Los requisitos básicos para que ocurra una corrosión-desgaste son:

1. Que la zona de contacto esté bajo carga mecánica
2. Que ocurra una vibración o movimiento relativo repetido entre las dos superficies
3. Que la carga y el movimiento relativo estén suficientemente altos para producir deslizamiento y deformación de las superficies. [39]

Se propusieron dos mecanismos para explicar el fenómeno de la corrosión-desgaste: “desgaste-oxidación y “oxidación-desgaste”.

El mecanismo de “desgaste-oxidación” está basado en el concepto de soldadura en frío que puede ocurrir entre superficies cuando la carga es muy alta. Esta soldadura local se rompe en los puntos de contacto por un desplazamiento lateral y se arrancan pedacitos de metal, los cuales, debido a su pequeño tamaño y al calor producido por la fricción, se oxidan inmediatamente. El proceso se repite y resulta una pérdida de metal y acumulación de óxido. Supone entonces que el desgaste por fricción causa el daño y que la oxidación es un factor secundario. [40]

Mientras que el mecanismo de “oxidación-desgaste” se explica suponiendo que las superficies metálicas están protegidas contra la oxidación atmosférica. Si los metales se ponen en contacto uno contra otro bajo carga y movimiento relativo repetitivo, se rompe la capa de óxido en los puntos de contacto, arrancando el óxido. El metal expuesto a la atmósfera se oxida otra vez y el proceso se repite. En esta teoría, se supone que ocurre una oxidación acelerada por efecto de fricción. [41]

La consecuencia de ambos mecanismos es la producción de óxidos sueltos y la destrucción de la superficie metálica. Se supone ahora que ambos mecanismos funcionan simultáneamente durante un proceso de corrosión-desgaste. [42]

## Ejemplos



Figura 27. Anillo exterior de un rodamiento cilíndrico y anillo interior de un cojinete, en ambos se presenta corrosión-desgaste. [43]

En la figura 27 muestra una pieza que perdió material y que también es sometido a cargas cíclicas, lo que demuestra que sufrió corrosión-desgaste.

### 2.9.3 Formas de prevención.

Es posible reducir o casi eliminar la corrosión-desgaste aplicando uno o más de los métodos de prevención:

1. Lubricar con aceites de baja viscosidad y alta tenacidad, reduciendo así la fricción entre las partes y excluyendo el oxígeno.
2. Aumentar la dureza de uno o ambos materiales en contacto, eligiendo la combinación adecuada de componentes.
3. Aumentar la fricción entre las partes aumentando la rugosidad de las superficies.
4. Utilizar empaques para absorber las vibraciones y excluir el oxígeno de la superficie.
5. Aumentar la carga para reducir el deslizamiento entre los elementos. [44]

## 11. Medición de la corrosión

La tasa de corrosión es la velocidad a la que un material se deteriora en un ambiente específico. Una medida es la tasa de pérdida de masa. Esta es más usada en laboratorio debido a que en su ambiente controlado se puede medir con precisión la masa perdida.

$$C_{rate, m} = \frac{\Delta m}{t s} \quad 1$$

Donde:

$\Delta m$  es la masa perdida en el periodo de tiempo establecido

t es el tiempo de prueba

s es la superficie del material

Para la industria se usa la tasa de penetración debido a que en la vida real no se tiene un ambiente tan controlado y no es posible medir con precisión como en un laboratorio.

$$C_{rate} = \frac{C_{rate, m}}{\gamma} \quad 2$$

Donde:

$\gamma$  es la densidad del material.

Las unidades con las que se mide la tasa de corrosión son los mpy (millas por año), mm/año,  $\mu\text{m}$ /año, mdd (mg por  $\text{dm}^2$  por día) y mmh (mg por  $\text{m}^2$  por hora).

### Resumen

El fenómeno de corrosión es el proceso natural de deterioro de materiales metálicos el cual se presenta a partir de reacciones químicas y electroquímicas entre el material y el ambiente, debido a que estos materiales buscan alcanzar un estado de menor potencial energético. La corrosión presenta muchas consecuencias a nivel económico y en términos de seguridad, por lo que su estudio y prevención es de suma importancia. Es por eso por lo que el presente

trabajo tiene el propósito de exponer que es la corrosión, cómo se presenta, tipos de corrosión y algunos ejemplos, además se presentarán diferentes métodos que existen para reducir o evitar la corrosión.

La corrosión representa una pérdida considerable de dinero en la industria. Además, puede ser un riesgo para la vida de las personas operar equipos, por ejemplo, un avión, que haya sido afectado por la corrosión. Otro ejemplo de cómo puede afectar la vida de las personas es que una tubería se dañe por corrosión y evitando así suministrar agua o gas a las grandes ciudades.

Debido a que los metales son de los materiales de ingeniería más utilizados en la industria la corrosión es un problema común. Muchas veces no se pueden cambiar los diseños, como los metales que se usan o los tipos de uniones, o las condiciones de trabajo, como los flujos turbulentos o las cargas cíclicas, así que se debe buscar otra solución a la corrosión. Muchas veces puede ser un recubrimiento, un proceso de protección catódica o elegir un material correcto desde el inicio del diseño y no pensar en la corrosión hasta el final.

Por todas estas razones, es necesario que haya gente capaz de entender la corrosión, como se forma y que se debe hacer para evitarla.

## Referencias

1. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México p.p. 2.12
2. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México p.p. 2.12
3. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México p.p. 2.13
4. Jeanette Hernández, Diagrama de Pourbaix herramienta termodinámica aplicada a los problemas de corrosión. Revista Digital de Investigación y Postgrado, ISSN-e 2244-7393, Vol. 2, Nº. 4, 2012, págs. 297-306
5. Muñoz Portero, María José ,Características y usos de los diagramas de Pourbaix , Departamento Ingeniería Química y Nuclear Centro Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, universidad politécnica de valencia. p.p 5
6. Muñoz Portero, María José ,Características y usos de los diagramas de Pourbaix , Departamento Ingeniería Química y Nuclear Centro Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, universidad politécnica de valencia. p.p. 5

7. Bardal E. (2004). Different Forms of Corrosion Classified on the Basis of Appearance. Corrosion and Protection. Engineering Materials and Processes. Springer, London. Pp 91. [https://doi.org/10.1007/978-1-85233-845-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-85233-845-9_7)
8. Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de la corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). Revista Tecnología en Marcha, 28(3), Pp 130. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
9. Perez N. (2004) Forms of Corrosion. Electrochemistry and Corrosion Science. Springer, Boston, MA. Pp 6. [https://doi.org/10.1007/1-4020-7860-9\\_1](https://doi.org/10.1007/1-4020-7860-9_1)
10. Bardal E. (2004). Different Forms of Corrosion Classified on the Basis of Appearance. Corrosion and Protection. Engineering Materials and Processes. Springer, London. Pp 91. [https://doi.org/10.1007/978-1-85233-845-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-85233-845-9_7)
11. Sankara Papavinasam, Chapter 5 - Mechanisms, Editor(s): Sankara Papavinasam, Corrosion Control in the Oil and Gas Industry, Gulf Professional Publishing, 2014, Pages 249-300, ISBN 9780123970220, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397022-0.00005-4>.
12. J.S. Carlton, Chapter 27 - Propeller Maintenance and Repair, Editor(s): J.S. Carlton, Marine Propellers and Propulsion (Fourth Edition), Butterworth-Heinemann, 2019, Pages 569-576, ISBN 9780081003664, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100366-4.00027-4>.
13. J.S. Carlton, Chapter 27 - Propeller Maintenance and Repair, Editor(s): J.S. Carlton, Marine Propellers and Propulsion (Fourth Edition), Butterworth-Heinemann, 2019, Pages 569-576, ISBN 9780081003664, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100366-4.00027-4>.
14. Turnbull, A. (2016). Stress Corrosion Cracking in Metals – Mechanisms. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.03064-2
15. Aircraft Accident Report--Aloha Airlines, Flight 243, Boeing 737-200, N73711, near Maui, Hawaii, April 28, 1988
16. Turnbull, A. (2016). Stress Corrosion Cracking in Metals – Mechanisms. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.03064-2

17. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. p.p 4.15
18. Cesar Augusto Tovar, estudio del efecto de la corrosión en el proceso de soldadura de aceros inoxidable mediante las técnicas smaw, gmaw y gtaw gomez, universidad autónoma de occidente, facultad de ingeniería departamento de energética y mecánica programa ingeniería mecánica santiago de cali 2005
19. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. p.p 3.27
20. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. p.p 3.27
21. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. p.p 3.27
22. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. p.p 3.27
23. Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de la corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). Revista Tecnología en Marcha, 28(3), Pp 130. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
24. Perez N. (2004) Forms of Corrosion. Electrochemistry and Corrosion Science. Springer, Boston, MA. Pp 6. [https://doi.org/10.1007/1-4020-7860-9\\_1](https://doi.org/10.1007/1-4020-7860-9_1)
25. Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de la corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). Revista Tecnología en Marcha, 28(3), Pp 130. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
26. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.8
27. Ovejero, D. J. (2009, 1 enero). Una mirada a daño por hidrógeno en materiales metálicos. ieds, 1(1). <https://www.cnea.gov.ar/ieds>
28. Ovejero, D. J. (2009, 1 enero). Una mirada a daño por hidrógeno en materiales metálicos. ieds, 1(1). <https://www.cnea.gov.ar/ieds>
29. Ovejero, D. J. (2009, 1 enero). Una mirada a daño por hidrógeno en materiales metálicos. ieds, 1(1). <https://www.cnea.gov.ar/ieds>
30. Artola, G., Aldazabal, J. and Fernández, A., 2018. Susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno de aceros de alta resistencia: comportamiento en ambientes marinos y modelización de patrones de agrietamiento. Doctorado. Universidad de Navarra.
31. Sankara Papavinasam, Chapter 28-Pitting Corrosion. A.M. El-Sherik,2017,Pages 663-688, ISBN 9780081011058, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00028-0>.



32. Sankara Papavinasam, Chapter 28-Pitting Corrosion. A.M. El-Sherik,2017,Pages 663-688, ISBN 9780081011058, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00028-0>.
33. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
34. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
35. Erosion Corrosion Failure, Seawater intake in the Arabian Gulf. Corrosion doctors. 2019. <https://corrosion-doctors.org/Forms-Erosion/erosion-failure.html>
36. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
37. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
38. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
39. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
40. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
41. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
42. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49
43. Bearing Failure RCA: Fretting. Bearing-News.com. 17 de marzo de 2020. <https://www.bearing-news.com/bearing-failure-rca-fretting/>
44. Ortiz, Armando. Corrosión. Facultad de Ingeniería, México. 2002. México. Págs. 3.33-3.49