

# El triángulo virtuoso de la corrosión-protección electroquímica

## The virtuous triangle of electrochemical corrosion and protection

Gerardo Cifuentes<sup>1</sup>, Belén Garrido<sup>1</sup>, Francisca Rojas<sup>1</sup>, Flavia Leiva<sup>1</sup>,  
Magdalena Cifuentes-Cabezas<sup>2</sup>, Maximiliano Álvarez<sup>1</sup> e Iván Gentico<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universidad Politécnica de Valencia, España.  
[gerardo.cifuentes@usach.cl](mailto:gerardo.cifuentes@usach.cl)

### Resumen

---

El presente trabajo tiene como objetivo perfeccionar el proceso de enseñanza aprendizaje del par corrosión-protección, con la utilización de un triángulo virtuoso en donde se identifican los elementos base presentes en la corrosión electroquímica como son: Ánodo, Cátodo y Electrolito. En dicho triángulo se identifican los elementos recién mencionados específicamente en los vértices, los que están unidos por sus respectivas aristas para completar dicho triángulo. Cada vértice de este triángulo es a la vez otro triángulo que se activa o desactiva dependiendo si se rompe el circuito del triángulo principal (vértice). De el mismo modo, las aristas representan la conexión eléctrica pertinente entre cada elemento, ya sea conductor de electrones o conductor iónico electrolito-electrodo. Dependiendo si se está en presencia de corrosión o de protección contra la corrosión se tendrán las polaridades respectivas de pila galvánica o celda de electrólisis, independiente de la polaridad la interpretación y uso del triángulo virtuoso es análogo en ambos casos, teniendo eso sí que previamente identificar en que caso del tipo de fenómeno se está. Este nuevo método utiliza una forma gráfica de ver la problemática de la corrosión y su protección, lo que contribuye al desarrollo de los estudiantes y fomenta su interés por esta materia, incrementa sus conocimientos mediante el estudio por etapas consecutivas interrelacionadas entre sí.

**Palabras Clave:** Corrosión; Ánodo; Cátodo; Electrolito; Triángulo virtuoso.

### Abstract

---

The present work aims to improve the teaching-learning process of the electrochemical corrosion-protection pair, with the use of a virtuous triangle where the basic elements present in electrochemical corrosion are identified, such as: Anode, Cathode and Electrolyte. In said triangle, the elements just mentioned are specifically identified in the vertices, which are joined by their respective edges to complete the triangle. Each vertex of this triangle is at the same time another triangle that is activated or deactivated depending on whether the circuit of the main triangle (vertex) is broken or not respectively. In the same way, the edges represent the electrical connection between each element, be it an electron conductor or an electrolyte-electrode ion conductor. Depending on whether you are, in the presence of corrosion or protection against corrosion, you will have the respective polarities at the each galvanic cell or electrolysis cell, regardless of the polarity the interpretation and use of the virtuous triangle is analogous in both cases, obviously with the respective polarity at de vertex. This new teaching method uses a graphic way of looking at the problem of corrosion and its protection, which contributes to the development of students, encourages their interest in this subject and increases their knowledge by studying interrelated consecutive systems with the same methodology.

**Keywords:** Corrosion; Anode; Cathode; Electrolyte; Virtuous triangle; Teaching.

## Introducción

(Feliu y Andrade, 1991; Cifuentes *et al.*, 2006).

Naturalmente, los metales se encuentran formando compuestos con otros elementos (óxidos, sulfuros, sulfatos, carbonatos, etc.). Para ser utilizados en su forma elemental es necesario reducirlos, suministrando energía; la cual comenzará a ser eliminada por el metal, para volver a su estado estable termodinámicamente. Así, el proceso por el cual el metal vuelve a su estado nativo se denomina corrosión.

La corrosión de los metales no nobles es un hecho cotidiano que se da paulatinamente, por lo que en caso de no ser posible evitarla, se busca que sea lo más lenta posible, para aumentar la vida útil de los metales. Este control sobre la corrosión ha nacido por la necesidad de disminuir las pérdidas económicas que conlleva la pérdida de material, en diferentes estructuras públicas y privadas.

## Tipos de corrosión

Existen dos mecanismos de corrosión de acuerdo al tipo de medio en el cual se desarrolla:

- Corrosión química
- Corrosión electroquímica.

### Corrosión Química

El primer mecanismo, es una reacción puramente química en toda la superficie por igual, esto ocurre cuando se trabaja a altas temperaturas en sistemas no electrolíticos, tales como gases y vapores o líquidos no conductores eléctricos, sin presencia

de iones, los productos de corrosión quedan adheridos a la superficie, formando en ocasiones, una barrera contra la corrosión.

El segundo mecanismo, corrosión electroquímica, es el más común, en este se forma una pila, existiendo zonas en la cual el metal se disuelve y otras en las cuales no se altera. Para que funcione ininterrumpidamente debe existir una conexión eléctrica entre ánodo y cátodo, además, de la presencia de un electrólito para cerrar el circuito.

A continuación, se describirá de una forma simple la corrosión electroquímica y como proteger los materiales de está.

### Corrosión Electroquímica

Los productos de corrosión se distribuyen de forma heterogénea en la superficie y sin carácter protector u homogénea y con carácter protector, siendo incluso utilizada como protección anódica al fenómeno de corrosión.

De esta manera, se puede ver la corrosión como un triángulo tal como lo presenta la Figura N° 1, compuesto por tres partes elementales:

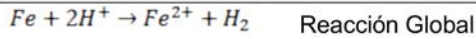
- **Ánodo:** zona en que se efectuará la corrosión propiamente tal, disponiendo de iones al electrolito. Polaridad (-).
- **Cátodo:** zona en la cual se realizará la reducción del ion proveniente del electrolito. Polaridad (+).
- **Electrólito:** encargado de facilitar un medio iónico para cerrar el circuito, ayudando a la reducción en el cátodo.

(Los paréntesis redondos indican que se trata de una polaridad espontánea del electrodo). Para que la corrosión se lleve a cabo estos tres elementos deben estar en contacto como se observa en la Figura N° 1, pero si elimina o aísla alguna de las partes, este fenómeno será detenido. De esta forma, se entiende el proceso de corrosión como un triángulo, en cuyos vértices se encuentran los elementos ya nombrados, unidos por sus aristas, además, siendo cada sistema corrosivo único, termodinámicamente y cinéticamente.



Figura N° 1: Triángulo de corrosión.

Un ejemplo de corrosión muy conocido es el hierro en solución ácida:



Este tipo de corrosión es la que afecta al hierro en el acero al carbono en presencia de medio ácido.

Una pieza de acero está compuesta por granos desarrollados en diferentes direcciones como producto del proceso de solidificación durante la fabricación del material.

Se entiende por solidificación, el cambio de fase de un material, en este caso metal, pasando del estado líquido al sólido, ocurriendo en dos etapas: nucleación y crecimiento. Durante la nucleación, tras un descenso de la temperatura, generando pequeños núcleos, formándose aleatoriamente y de preferencia en lugares de contacto con otras superficies (solidificación heterogénea), como zonas de contacto con el molde y ambiente. Una vez formados estos núcleos, estos comienzan a crecer, también de forma aleatoria, generando granos de tamaños y direcciones diferentes entre sí conforme avanza la solidificación, hasta que se acaba el metal líquido que permite el crecimiento de los granos.

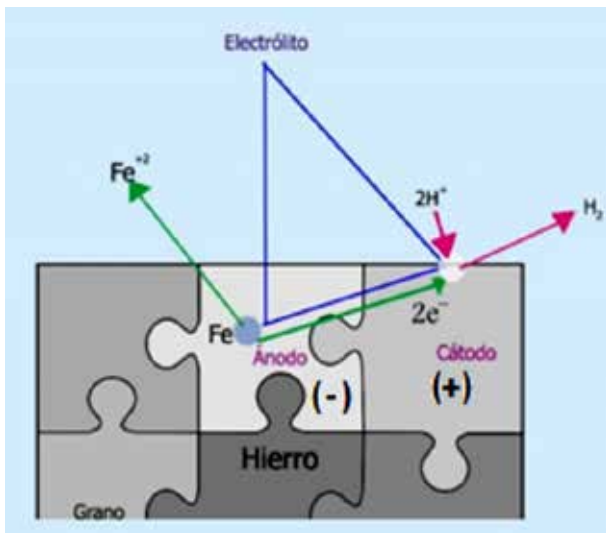


Figura N° 2: Caracterización de corrosión en una pieza de acero al carbono.

Por lo tanto, y como se aprecia en la Figura N° 2, esta disposición de granos aleatorios puede generar un comportamiento donde un grano puede actuar de ánodo y otro como cátodo, generando el producto de corrosión sobre la superficie de la pieza de acero.

Siendo posible plantear el fenómeno de corrosión electroquímica a través de triángulos, esquemáticamente como se muestra en la misma Figura N° 2 anterior con líneas azules.

## Protección

Como se mencionó anteriormente, el fenómeno de la corrosión no se efectuará si uno de los tres elementos fundamentales del proceso es aislado. Si observamos la Figura N° 3 el triángulo tiene sus aristas continuas, y el proceso ocurre. En cambio en el triángulo de la Figura N° 4, las aristas de éste han sido suprimidas para esquematizar la aislación del o los elementos del proceso. Hay que hacer notar eso sí, que para evitar que ocurra la corrosión,

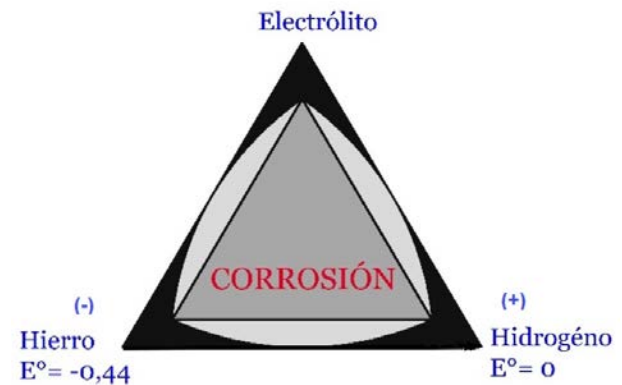


Figura N° 3: Triángulo de corrosión de hierro.

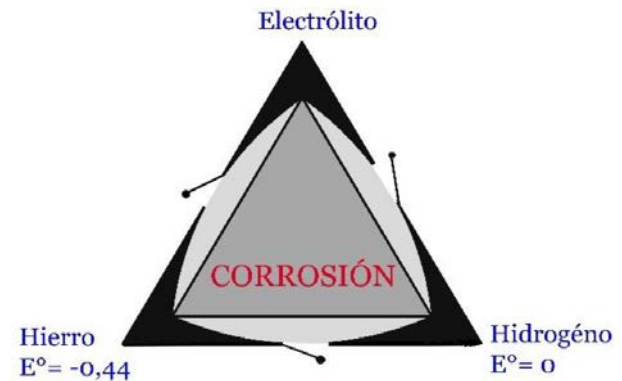


Figura N° 4: Triángulo de corrosión de hierro con las aristas cortadas, evitando la transferencia de electrones.

basta con suprimir solo una de las aristas en cuestión. De esta manera entonces, el proceso corrosivo no ocurre.

La atmósfera es el medio corrosivo más común y másico en la actualidad, siendo esencial encontrar una manera de proteger al material de ésta y de cualquier otro medio corrosivo. Existen diversas formas de protección, una de ellas es mediante recubrimientos, de esta forma estaríamos aislando el electrolito (atmósfera, agua salada o dulce, etc.) de la **superficie de electrodo (ánodo/cátodo)** a través de una barrera física o electroquímica. Según su naturaleza, los recubrimientos pueden ser: metálicos (galvanizados, zincados, etc.), orgánicos (barniz, pinturas, lacas, etc.) o inorgánicos no metálicos (plásticos, cementos, esmaltes, madera).

Otro método de protección contra la corrosión es la protección electroquímica, buscando minimizar la velocidad de corrosión, al punto de considerarlo despreciable, imponiendo un potencial determinado a la pieza a proteger. Existen dos métodos generales de este tipo de protección: protección anódica y protección catódica que serán descritos más adelante.

Por ejemplo, el recubrimiento metálico consiste en cubrir el metal a proteger con otro metal de menor o mayor nobleza que el primero, dependiendo de las características físicas, en caso de ser de mayor nobleza, esta capa debe ser no porosa, para evi-

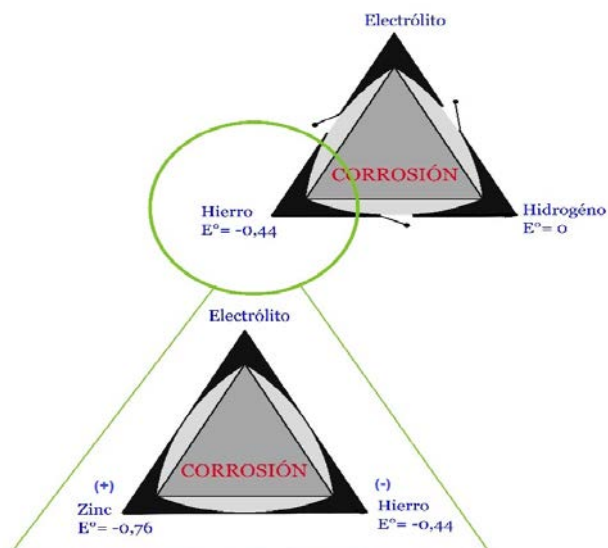


Figura N° 5: Protección del hierro a la corrosión ácida (que genera hidrógeno), utilizando zinc como ánodo de protección y formando un nuevo triángulo de corrosión.

tar corrosión localizada del metal base. En caso de ser menos noble, este debe ser capaz de generar una capa protectora de óxido metálico insoluble y adherente impidiendo la corrosión, a este fenómeno se le denomina "pasivación", descrito en detalle más adelante.

Para el caso de querer proteger el hierro de la corrosión se debe cortar al menos una de las aristas del triángulo, por ejemplo la correspondiente a la conductividad electrónica o a la conductividad iónica, se observa en la Figura N° 4 donde las aristas se encuentran todas cortadas indicando aislamiento total. El aislamiento como se dijo antes, podría ser parcial cortando por lo menos una de las aristas.

La forma más conocida y utilizada es la galvanización del acero al carbono, esta consiste en recubrirlo con zinc, para que éste se corra antes que la aleación que se desea proteger es lo que se esquematiza en la Figura N° 5 al proteger el hierro.

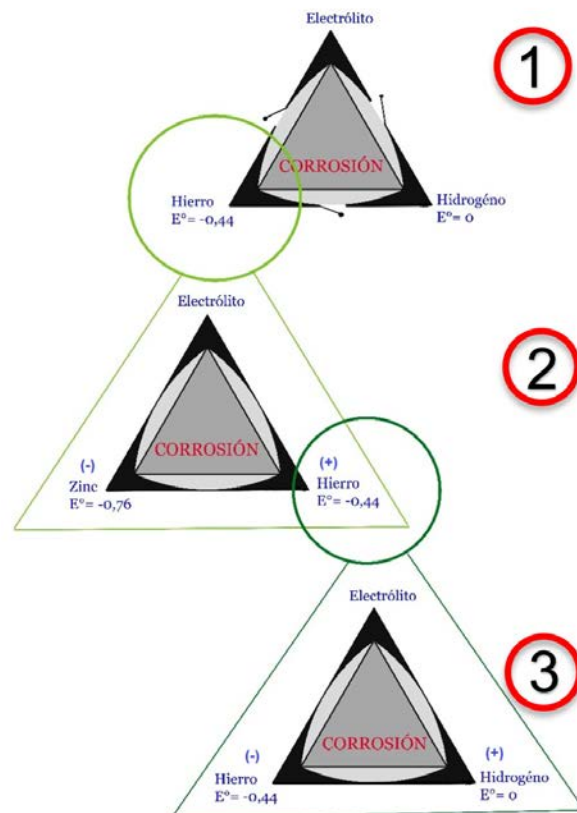


Figura N° 6: Escalones de triángulos de corrosión que puede ir produciéndose a medida que varían las condiciones de protección de las piezas de hierro.

En síntesis, si se tiene una pieza de acero o hierro, la corrosión de ésta en un ambiente ácido, es representada por un triángulo como el que se observa en la Figura N° 3. Lo que se desea hacer es cortar al menos una de las aristas, para esto existe el galvanizado (recubrimiento metálico), que logra cambiar el comportamiento del hierro, pasándolo de ánodo a cátodo. Lo que se esquematiza en la Figura N° 5.

Al tener el cinc un potencial menor que el hierro, tenderá a oxidarse, mientras el hierro se reducirá, esta ventaja permite que los poros que puedan quedar en la superficie o las rayaduras que puedan ocurrir por el uso de las piezas no afectan la protección del zinc sobre el hierro, ya que, aunque este expuesto el metal base a la atmosfera, el hecho de estar en contacto directo con el cinc provocara que siga comportándose como cátodo, evitando oxidarse.

En la Figura N° 6 la condición inicial sin protección es la (1). Al proteger, se avanza a la condición (2) de la misma Figura. Es obvio que la capa de zinc comenzará a desaparecer con el tiempo, lo cual producirá la corrosión del hierro por el contacto que tendrá éste con el medio circundante, como se observa en el paso de condición (2) a (3) de la, de esta forma se volverá a la condición inicial de corrosión entre los granos del metal, lo que ya se mostró anteriormente en la Figura N° 2.



Figura N° 7: Escalones de protección contra la corrosión hasta la aplicación de pintura.

Pero para agregar una protección extra a la ya utilizada, se aplica una capa de pintura, la cual protegerá tanto el zinc como el hierro, produciendo la aislación de ambos del electrolito, debido al corte de las aristas que unen el ánodo y el cátodo con el electrolito, aumentando la protección de las piezas que se estén trabajando. (Figura N° 7).

## Protección Anódica

La protección anódica, consiste en la polarización de una pieza metálica hasta un potencial más positivo que el de equilibrio entre el metal y el electrolito ( $E^\circ$ ), bajo estas condiciones la velocidad de corrosión debería incrementarse considerablemente, sin embargo, en algunos casos, se observa una disminución drástica en la velocidad de corrosión a valores de densidad de corriente despreciable, denominada corriente residual, la cual se ejemplifica en la Figura N° 8. A este fenómeno se le denomina pasivación, y consiste en la formación de una capa de óxido la cual se forma en la superficie debido a una rápida oxidación. Lleva el nombre de protección anódica, porque el metal base se comporta como ánodo, y de esta manera se protege a el mismo (Feliu y Andrade, 1991; Ugaz y Díaz, 1998; Cifuentes *et al.*, 2006)..

Para que un metal este protegido anódicamente, su potencial debe mantenerse en los valores de

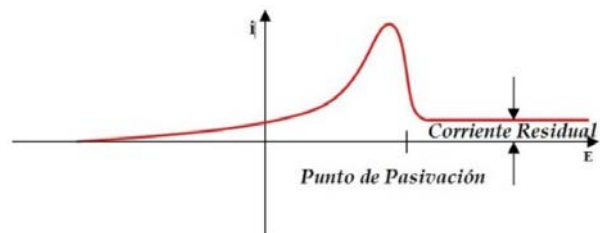


Figura N° 8: Ejemplo de curva de polarización con pasivación del sistema.

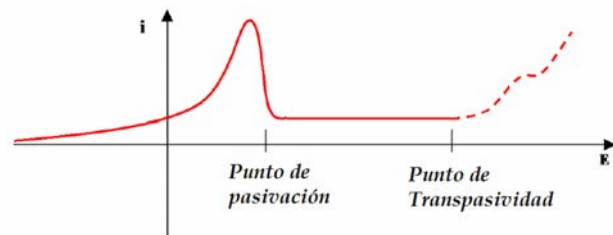


Figura N° 9: Ejemplo de curva de polarización con punto de pasividad y punto de transpasividad.

pasivación, sin exceder el potencial de transición entre las zonas pasivas y transpasivas, mostrado en la Figura N° 9.

Finalmente, se debe proporcionar altas corrientes al metal para que ocurra el proceso de pasivación, mientras que solo se requiere pequeñas corrientes para mantener la pasivación.

En palabras simples, el metal será protegido por el producto de corrosión generado, el óxido, y para que este cumpla con su objetivo, debe formar una capa de producto homogénea y adherente al metal base.

La explicación se encuentra en el hecho de que al aumentar el potencial aplicado desde el potencial de equilibrio comienza el proceso de oxidación de los átomos del metal, formando una capa superficial de óxidos metálicos que lo "impermeabiliza" frente al medio agresivo en el que se encuentra. Evidentemente, esta capa de óxidos debe poseer ciertas características físicas y químicas para proteger al metal de forma efectiva, dicho de otra manera, es posible obtener capas de óxidos que permitan proteger más o menos el material según su morfología estructural, y esta protección se refleja

directamente en la velocidad de corrosión residual. Existen algunos metales que generan esta capa naturalmente, por ejemplo, el aluminio, el cual forma un óxido homogéneo actuando como protección contra la corrosión externa, en la Figura N° 10 se observa como la capa de óxido ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), no protege totalmente el metal, sino que la cinética del proceso se vuelve muy lenta, de tal forma que el proceso de corrosión es prácticamente despreciable, esto se conoce como pasivación, donde el triángulo con aristas más delgadas representa la disminución de la velocidad del proceso de oxidación.

Al contrario, también existen metales que no se auto-protegen, como el acero, el cual forma una capa de óxido heterogénea y poco adherente, sin poder cumplir con los requisitos de protección. Sin embargo, a estos materiales se les adiciona elementos aleantes, los cuales provocan una alteración en su composición química, lo que conlleva a que su capa de producto corrosivo cumpla con los estándares de protección, como es el caso del acero inoxidable, que se le adiciona cromo para formar óxido de cromo como capa ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

Esto se ejemplifica a continuación en la Figura N° 11.

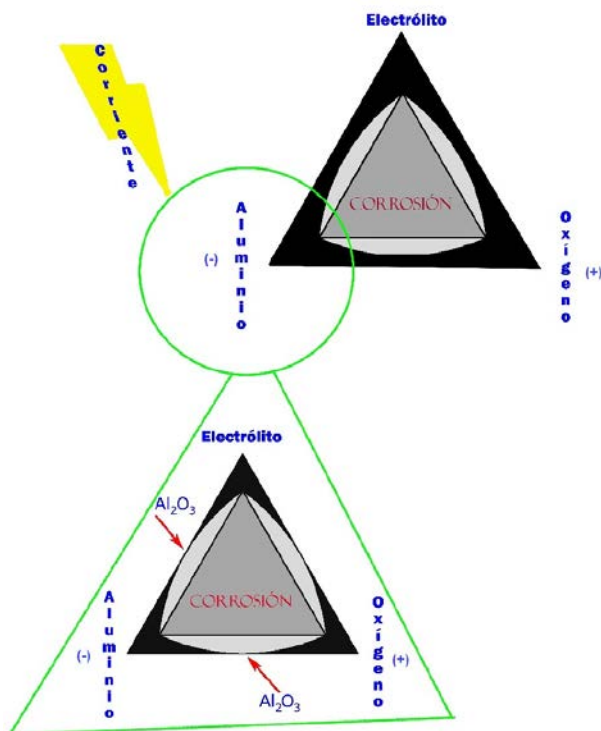


Figura N° 10: Escalones de protección anódica del aluminio.

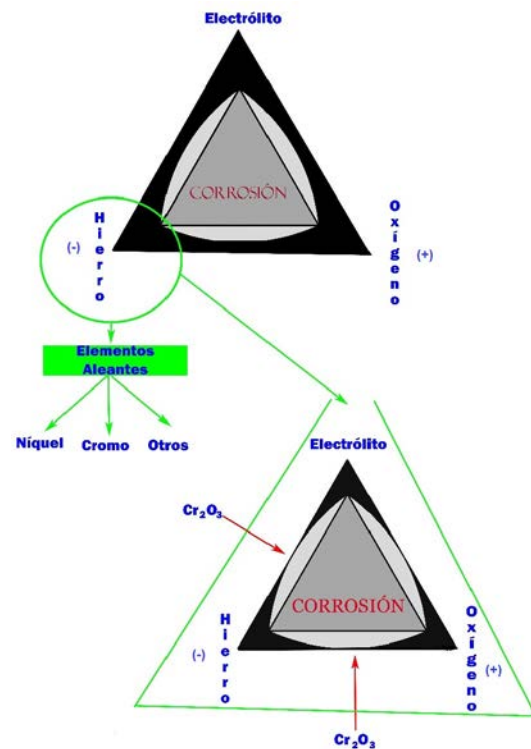


Figura N° 11: Escalones de protección del hierro a través de elementos aleantes.

## Protección Catódica

La protección catódica consiste en hacer que un metal, inicialmente actuando como ánodo, adquiera un comportamiento catódico, usando otro metal denominado "ánodo de sacrificio".

Esto se puede lograr de dos formas en las cuales el comportamiento de la protección puede ser como una pila, o como una celda electrolítica (Feliu y Andrade, 1991; Cifuentes *et al.*, 1998; Ugaz y Díaz, 1998; Cifuentes *et al.*, 2006; Cifuentes *et al.*, 2009).

La primera forma se logra adhiriendo un metal que se corroe con mayor facilidad formando una capa protectora, así éste se corroe antes que la base metálica protegida, para esto es necesario que el metal protector tenga un potencial electroquímico ( $E^\circ$ ) menor al del metal a proteger. Es el caso que se explicó anteriormente de la galvanización.

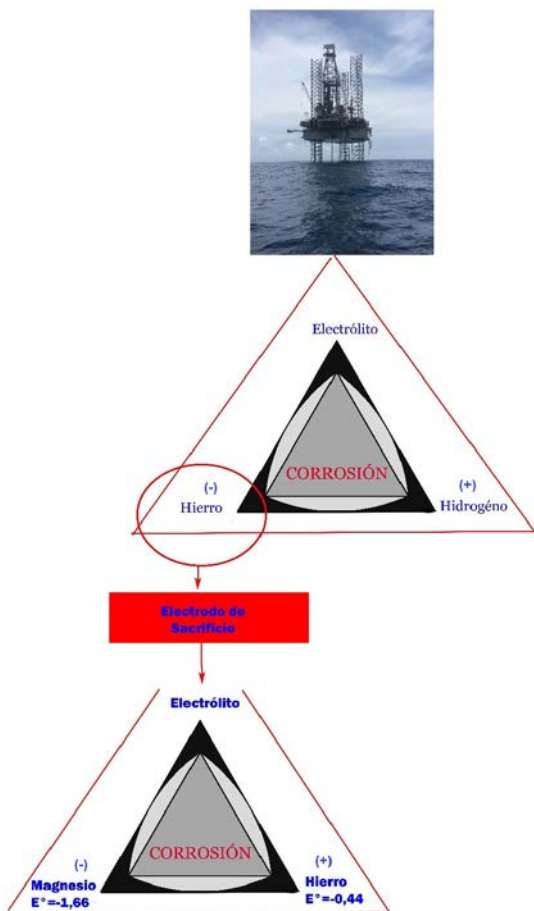


Figura N° 12: Protección catódica a través de un ánodo de sacrificio.

En el caso observado en la Figura N° 12, se tiene una torre de petróleo o plataforma *off-shore*, de hierro, la cual debe ser protegida de la corrosión del agua de mar (ácida), para mantener de tal forma que se usaran elementos de un metal de menor potencial electroquímico, como puede ser el aluminio, cadmio, cinc, magnesio, entre otros. En este caso se utiliza el magnesio, y en consecuencia se produce su corrosión protegiendo el hierro catódicamente. La diferencia entre esta protección y la galvanización es que para la segunda es una protección catódica particular donde se necesita un recubrimiento completo de la estructura, algo que, para piezas muy grandes como la plataforma marítima, puede significar un costo extremadamente alto.

En caso de que los ánodos de sacrificio no puedan ser reemplazados continuamente por razones de accesibilidad, se utiliza una fuente de poder externa que brinde corriente, la cual hará que toda la su-

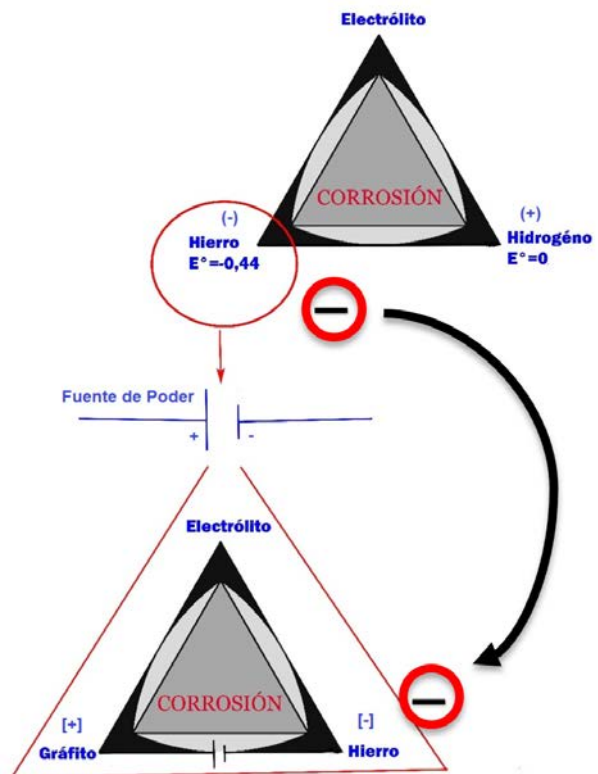


Figura N° 13: Protección catódica a través de una corriente impresa al sistema.

perficie que se desea proteger tenga un comportamiento catódico evitando ser oxidado por el proceso de corrosión (Cifuentes *et al.*, 1998; Cifuentes *et al.*, 2009). Al conectar el metal a proteger, en este caso hierro (Figura N° 13), al polo negativo de la fuente de poder [-] se comportará como cátodo y el polo positivo se conecta al ánodo de sacrificio [+], de tal forma que la fuente entregara electrones al sistema a proteger, evitando la corrosión de este. Esto se hace a través de un rectificador. (Los paréntesis cuadrados indican que la polaridad es impuesta al electrodo por una fuente de poder externa).

Como se muestra en la Figura N° 13, el signo negativo (-) se mantiene para el Hierro, incluso habiendo cambiado la condición electródica de ánodo a cátodo. Esto se debe a que las polaridades para un proceso espontaneo como la corrosión al medio ambiente, son totalmente opuestas a un proceso forzado como lo es la protección catódica con inducción de corriente, por ende el signo se mantiene para el Hierro, lo que ocurre netamente es que se invierte el sentido de la corriente, los electrones no son cedidos por el Hierro tras la protección, esta vez es el Hierro quien recibe dichos electrones por su condición de cátodo.

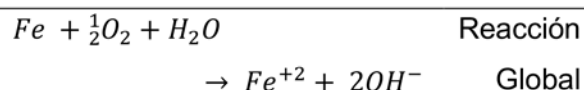
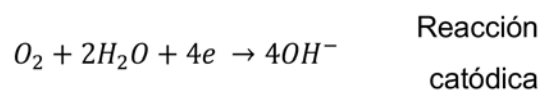
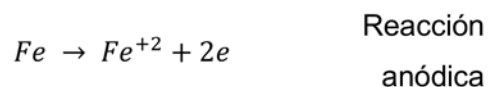
## Teoría del potencial Mixto

La teoría del potencial mixto o de corrosión, postula que las reacciones de oxidación y reducción en la corrosión electroquímica se producen a la misma velocidad sobre la superficie metálica, lo que exactamente se presenta en los procesos de corrosión. La representación gráfica de esto se logra ver en las curvas de Evans que grafican la reacción anódica y catódica de un proceso corrosivo, en cuanto a la velocidad a la que ocurren con respecto al potencial del mismo sistema, o viceversa.

### Corrosión de Hierro en medio Básico

Un ejemplo de esto se muestra en la Figura N° 14, donde se grafica la corrosión en medio básico del hierro, específicamente el potencial de las reacciones con respecto a la densidad de corriente (velocidad a la cual ocurren) (Feliu y Andrade, 1991; Ugaz y Díaz, 1998; Cifuentes *et al.*, 2006).

Donde las reacciones son:



Esta idea gráfica puede relacionarse con el triángulo virtuoso desarrollado anteriormente, para dar cuenta de la existencia del potencial mixto del proceso de corrosión. De tal manera que al unir los puntos de los pares ( $i_o$ ,  $E_{eq}$ ) anódico (A) y catódi-

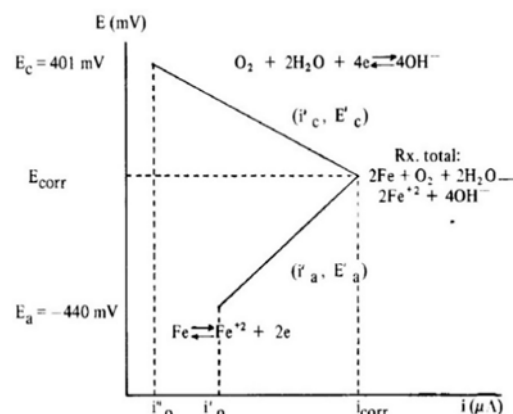


Figura N° 14: Diagrama de Evans de corrosión de Hierro en medio básico.

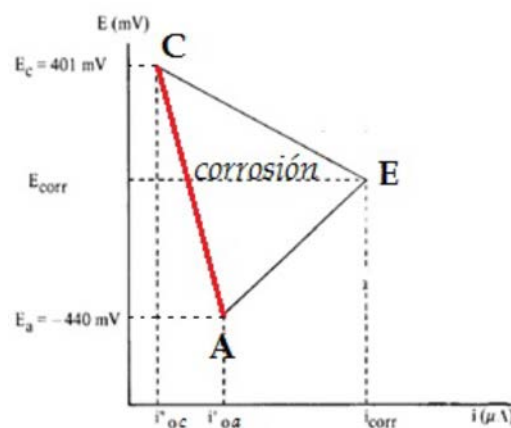


Figura N° 15: Triángulo virtuoso superpuesto sobre el diagrama de Evans de corrosión de Hierro en medio básico. (E) electrolito, (A) ánodo y (C) cátodo.

co (C) se obtenga el triángulo respectivo, representado por la recta de color rojo de la Figura N° 15.

El potencial mixto o de corrosión corresponderá a la horizontal desde el punto (E) hasta cortar el eje del potencial y su respectiva corriente de corrosión corresponderá a la vertical desde el punto (E) hasta cortar el eje de la corriente.

Por otro lado, en la Figura N° 15, se observa que la arista de color rojo del triángulo tiene cierta inclinación con respecto al eje vertical del potencial. Esto se debe a que las reacciones involucradas en el proceso tienen una corriente de equilibrio ( $i_0$ ) distintas entre sí. Esto se cumple en la mayoría de los casos ya que este parámetro es único para cada sistema por lo que generalmente en un

proceso se tienen distintas corrientes de equilibrio ( $i_0$ ) para cada una de las semi reacciones. Esto se puede observar en el eje horizontal de el gráfico de la Figura N° 15, donde los  $i_0$  de las reacciones son distintos.

En consecuencia, como puede notarse en la Figura N° 15, el valor del potencial mixto ( $E_{corr}$ ) también podría incluirse en el dibujo del triángulo virtuoso. Es obvio que para incluir dicho parámetro en el triángulo se debe tomar en cuenta el diagrama de Evans del proceso, a simple vista y por lo mencionado anteriormente del parámetro  $i_0$ , el  $E_{corr}$ , para este caso de ejemplo no quedará simplemente de forma vertical como se indica en la Figura N° 16 a menos que se cumpla la condición de que los  $i_0$  de las dos semi reacciones sean de igual magnitud.

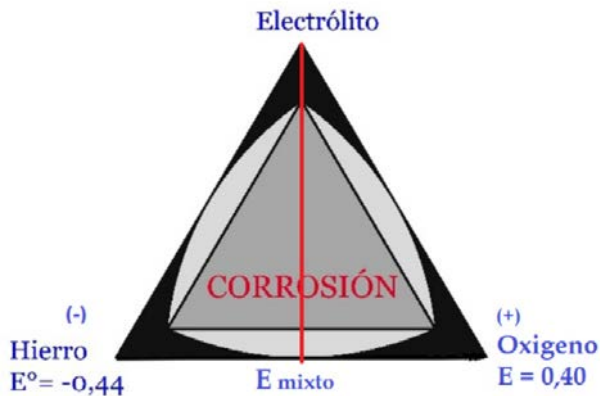


Figura N° 16: Triángulo virtuoso para la corrosión de hierro en medio básico indicando  $E_{corr}$  para el caso de  $i_0$  iguales.

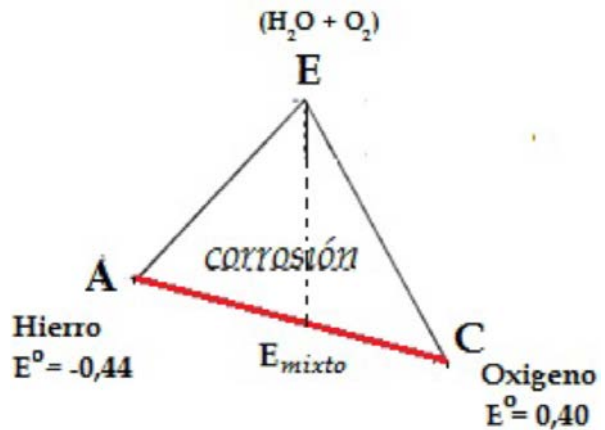


Figura N° 18: Triángulo virtuoso extraído desde diagrama de Evans

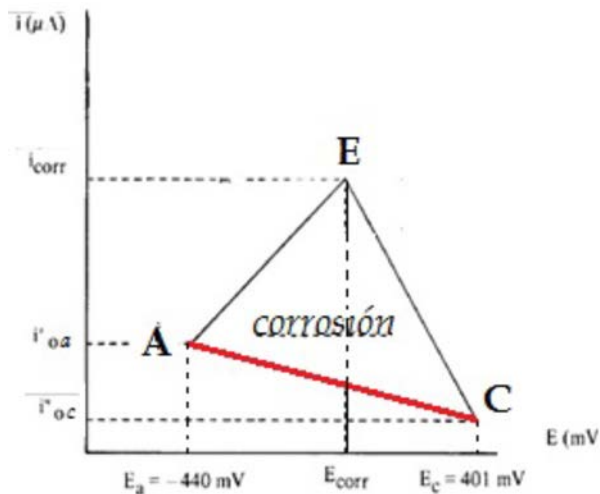


Figura N° 17: Triángulo virtuoso superpuesto sobre el diagrama de Evans ( $i$  v/s  $E$ ) de corrosión de Hierro en medio básico.

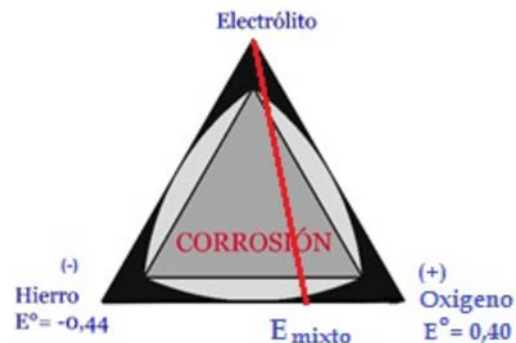


Figura N° 19: Triángulo virtuoso final para la corrosión de hierro en medio básico indicando de manera correcta el  $E_{corr}$ .

Lo explicado, se puede observar a simple vista en el Diagrama de Evans donde se ve claramente que el triángulo formado es escaleno, por ende, en ángulo que forma la proyección de la línea que une el vértice de electrolito (E) con el eje de potencial es distinto a  $90^\circ$  con respecto a la línea roja que une el cátodo (C) con el ánodo (A). El ángulo si tendría un valor de  $90^\circ$  si los  $i_0$  fueran iguales.

De la misma manera, al analizar el diagrama de Evans de la Figura N° 15, se nota que el  $E_{corr}$  del cual se ha estado hablando, coincide en la gráfica con el valor de  $i_{corr}$ . Aquí es donde nace un nuevo concepto y es el parámetro que indica la densidad de corriente o velocidad a la que ocurren ambas semi reacciones del proceso corrosivo, mientras mayor sea su valor, la corrosión será más rápida.

En la siguiente Figura N° 17 se muestra el triángulo esquematizado sobre el diagrama de Evans mostrado en la Figura N° 15, manteniendo la orientación e idea de triángulo que se ha desarrollado hasta ahora, invirtiendo los ejes con el fin de no confundir al lector.

Luego dejando solo el triángulo sin ejes para solo visualizar el triángulo queda la Figura N° 18.

De esta manera, queda explícitamente graficado que el potencial mixto tiene cierta tendencia a acercarse al valor del potencial  $E_{th}$  de la semi reacción que tenga el  $i_0$  más pequeño y que no tendrá un

valor que pertenezca al promedio entre los  $E_{th}$  de las dos semi reacciones involucradas.

De esta manera se puede tener un triángulo que indique correctamente donde es que se encuentra el potencial mixto de la reacción como indica la Figura N° 19.

## Uso del triángulo virtuoso en Metalurgia Extractiva. Cementación de cobre

(Cifuentes *et al.*, 1998; Cifuentes *et al.*, 2009).

Así mismo se puede usar el diagrama de Evans de la cementación del Cobre a partir de chatarra de Hierro (Figura N° 20). Donde la reacción de oxidación posee un  $i_0$  un poco menor que el de la reducción. Por ende, el Potencial mixto se verá desplazado levemente hacia el valor del  $E_{th}$  de la oxidación, como se muestra esquemáticamente en la Figura N° 21, permitiendo así tener una mejor visualización gráfica del proceso electroquímico en curso.

En ambos ejemplos se puede evidenciar que el sobre potencial tiene una relación directa con el  $i_0$ . Si el  $i_0$  es menor, esa semi reacción tendrá un sobre potencial menor que la otra semi reacción.

En conclusión, si los  $i_0$  de las semi reacciones son iguales, el  $E_{mixto}$ , se encontrará a la mitad de la arista que une los electrodos (C y A) quedando con un

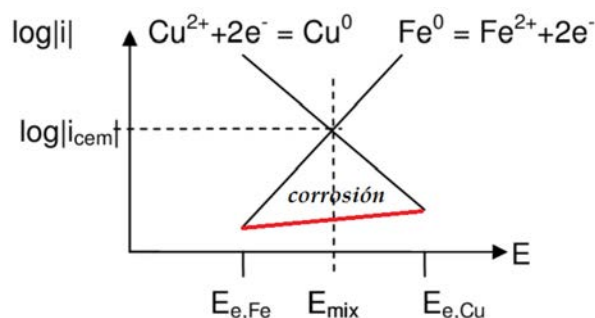


Figura N° 20: Diagrama de Evans de la cementación de cobre, con triángulo virtuoso superpuesto.



Figura N° 21: Triángulo virtuoso final para la cementación de cobre a partir de chatarra de hierro indicando tendencia de  $E_{corr}$ .

valor perteneciente al promedio entre los dos  $E_{th}$  y además formando un ángulo de  $90^\circ$  de la línea roja con respecto a dicha arista. Pero si los  $i_o$  no poseen el mismo valor como ocurre más usualmente, el  $E_{mixto}$  se verá de forma gráfica en el triángulo, desplazado hacia el vértice del electrodo o semi reacción que posee el  $i_o$  de menor magnitud.

El Triángulo Virtuoso logra ser una herramienta gráfica muy útil para la explicación de manera simplificada de lo que significan los procesos de corrosión y la base de su funcionamiento electroquímico, así como también los métodos utilizados para la protección frente a este fenómeno.

## Referencias

---

Cifuentes G, Simpson J, Vargas C. 2006. Fundamentos de corrosión y protección de materiales. Sello Editorial USACH, Santiago, Chile.

Feliu S, Andrade MC. 1991. Corrosión y protección metálica. Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.

Ugaz A, Díaz I. 1998. Principios de las técnicas electroquímicas en estudios de procesos de corrosión. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Cifuentes G, Simpson J, Lobos F, Briones L, Morales A. 2009. Copper electrowinning based on reactive electro dialysis. J Chil Chem Soc 54: 289-293. <https://doi.org/10.4067/s0717-97072009000400002>

Cifuentes G, Cifuentes L, Crisostomo G. 1998. A lead-acid battery analogue to in situ anode degradation in copper electrometallurgy. Corrosion Science 40: 225-234. [https://doi.org/10.1016/s0010-938x\(97\)00122-4](https://doi.org/10.1016/s0010-938x(97)00122-4)