



1-ANTECEDENTES

Tradicionalmente, el hormigón se ha venido considerando como un material inerte, comparable a la piedra, y por lo tanto, eterno. Desgraciadamente, la piedra no es eterna, y mucho menos lo es el hormigón. Efectivamente, a medida que el patrimonio de estructuras de hormigón va aumentando y envejeciendo, los problemas que se van detectando, van asimismo, incrementándose.

La corrosión del armado del hormigón es un fenómeno complejo que puede tomar una o varias formas. Por lo común, se limita a la superficie del metal y esto se conoce como corrosión general; pero en otras ocasiones, ocurre corrosión por picaduras desarrollándose en zonas muy localizadas, esto da como resultado la formación de cavidades y agujeros que pondrán en riesgo la estabilidad mecánica de la estructura.

En la mayor parte de los sistemas acuosos, la reacción de corrosión se divide en una porción anódica y otra catódica, que se producen simultáneamente en puntos discretos sobre la superficie metálica. Se genera un flujo de electricidad entre las zonas anódicas y las zonas catódicas mediante celdas locales desarrolladas ya sean en una superficie metálica simple o entre metales distintos.

Este tipo de corrosión se conoce como corrosión metálica y su característica principal es la formación de una pila electroquímica. La presencia de humedad con sales disueltas y un diferencial de potencial eléctrico en la armadura generará procesos intensos de corrosión.

2-FACTORES QUE ACELERAN EL PROCESO DE CORROSIÓN

Los factores normalmente encontrados en las estructuras de hormigón presentes en centrales eléctricas, petroquímicas, e industria en general, son los siguientes:

La carbonatación

El mecanismo básico de la carbonatación es la penetración del CO₂ (dióxido de carbono) en el hormigón. La protección del acero se pierde por reducción de la alcalinidad en el hormigón. Esto ocurre cuando el dióxido de carbono, presente en la atmósfera, reacciona con los hidróxidos de calcio y magnesio que existen en el hormigón.

El consumo de hidróxido cálcico provoca una reducción del pH hasta valores inferiores a 9, lo que sitúa al acero fuera de la zona de pasividad. Por ello, debe de evitarse que el proceso de carbonatación logre llegar a las proximidades de las armaduras. El resultado final es que deja al acero embebido como si estuviera expuesto a la atmósfera, es decir, sin protección química.

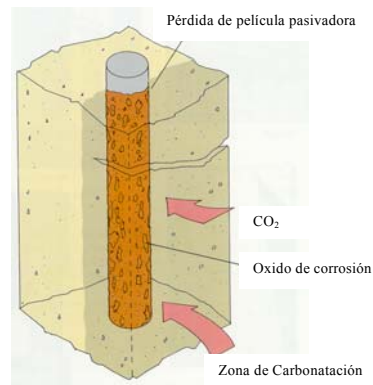


Figura 1. Proceso de carbonatación del hormigón armado.

El ión cloruro

A diferencia de la carbonatación, la oxidación por ataque de cloruros se produce de forma localizada en la armadura. Dicha oxidación resulta más severa y destructiva que la provocada por la carbonatación produciendo una pérdida de la sección de la armadura que puede ocasionar fallos de gran alcance en las estructuras de hormigón.

El medio más frecuente de ingreso de iones es desde el exterior, ya sea porque la estructura esté localizada en zonas costeras, elevado nivel freático en suelos sulfatados, piscinas, mercados, industrias papeleras, industrias químicas, torres de refrigeración, carreteras donde se emplean sales de deshielo, etc.

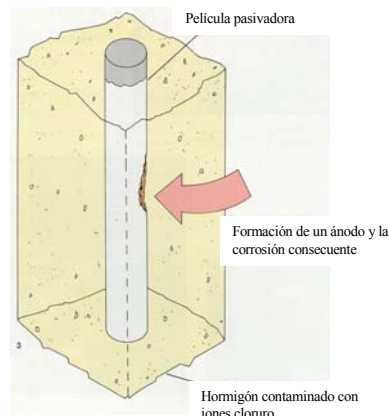


Figura 2. Proceso de ataque por cloruros en el hormigón armado.

En la reacción de oxidación que ocurre en el acero, los iones cloruros actúan como transportadores de carga eléctrica, acelerando la misma y aumentando su concentración en el área próxima al punto de corrosión, ya que no se consumen en dicha reacción. Por esta razón, es muy importante una correcta eliminación de todo el hormigón contaminado o la implementación de ánodos de sacrificio para evitar la formación de nuevas áreas susceptibles de corrosión en el perímetro de la reparación.

Eliminación de la capa pasivada

El pH fuertemente básico del hormigón (aproximadamente 12,5) conduce a la formación de un 'film protector' sobre las armaduras y, en estas condiciones, se dice que el acero está 'pasivado'; esto es, aun en presencia de oxígeno y humedad, no se oxida.

Esta característica permite asegurar una prolongada vida útil al material y a las estructuras, la que dependerá de cuándo se inician los procesos de corrosión y con qué velocidad avanzan una vez que se hayan iniciado.

La electrolisis

En el proceso de corrosión ocurre una transformación química del hierro con una polarización en las zonas de corrosión (formación de ánodo y cátodo) y un flujo de corriente.

En aquellas estructuras donde existen corrientes erráticas o metales con potenciales eléctricos menos activos que el acero en contacto

con él, pueden polarizarlo y obligarlo a comportarse como ánodo, forzando un proceso corrosivo.



Figura 3. Proceso de corrosión bi-metálica en viga de hormigón armado.

Bajo recubrimiento de hormigón

Existe una relación directa entre el espesor y porosidad del recubrimiento con la velocidad de corrosión de una estructura de hormigón armado.

La mejora en los diseños estructurales con mayores espesores de recubrimiento y hormigones de mejor calidad, ofrecerán mayor protección a dichas estructuras.

Las grietas

Quizás es uno de los síntomas más elocuentes en cualquier estructura dañada. Dependiendo de su localización, forma, trayectoria, evolución en el tiempo, condiciones ambientales, etc., es fácil, en la mayoría de los casos, establecer un diagnóstico, o bien tener una buena base de partida para seguir investigando.

Las fisuras pueden tener su origen en acciones de tipo mecánico, químico electroquímico, físico y reológico.

3-INSPECCIÓN Y ANALISIS

Tradicionalmente, las técnicas de análisis de corrosión han sido las visuales, las cualitativas, gravimétricas y las cuantitativas.

Técnicas como la inspección visual, la determinación de laminaciones y la resistencia a compresión del hormigón, son las más empleadas sin ofrecer una información generalizada de la estructura.

Los ensayos cuantitativos más eficaces y menos conocidos como los que se hacen mención más adelante pueden indicarnos las zonas de mayor riesgo de corrosión.

MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN

Como el desarrollo de la corrosión en las armaduras del hormigón representa un proceso electroquímico, existe un flujo iónico del ánodo al cátodo a través del conjunto de poros del hormigón. Conocer la resistencia o dificultad que ofrece el hormigón a ese flujo, nos indicará cuan eficiente puede ser la reacción de oxido-reducción en el acero.

Por lo general, se emplean 4 sondas de medición tipo Wenner (electrodos equidistantes) para medir la resistividad en estructuras de hormigón.

Se inyecta una corriente I entre el par de electrodos exteriores y se mide el ΔV entre el par de electrodos interiores. Considerando el medio de hormigón como un elemento homogéneo de resistividad.

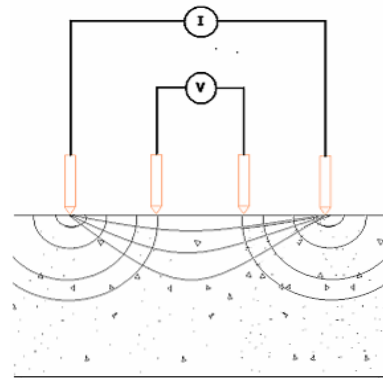


Figura 4. Medición de resistividad con sondas de Wenner

Los resultados de las mediciones realizadas son interpretadas en la tabla siguiente:

Resistividad (KOhm.cm)	Riesgo de corrosión
> 20	Bajo
10 – 20	Intermedio
5-10	Alto
< 5	Corrosión

Figura 5. Riesgo de corrosión según medición de resistividades en el hormigón armado.

MEDICIÓN DE POTENCIALES ELECTRICOS

La medición de potenciales eléctricos presentes entre un electrodo de referencia y las armaduras embebidas en el hormigón parten del diseño básico de la formación de una célula electroquímica.

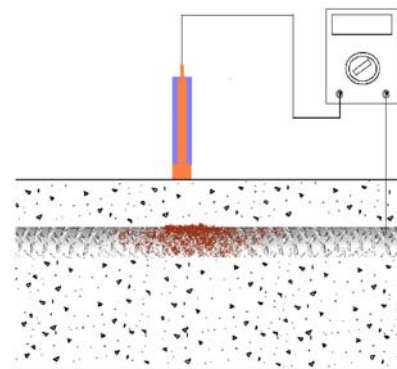
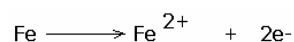


Figura 6. Medición de potencial eléctrico.

Una semi-célula está representada normalmente por un electrodo de cobre en sulfato de cobre o plata en cloruro de plata. Esta semi-célula tendrá un valor constante referenciado al electrodo de Hidrógeno



La segunda semi-célula está representada por el acero que está embebido en el hormigón. La segunda semi-célula variará en función de factores como humedad, temperatura, presencia de iones, pH, etc.



La unión de ambas semi-células a través de un polímetro digital de alta impedancia nos arrojará valores que ofrecerán una visión comparativa de la actividad de corrosión del acero en el hormigón. Los valores quedan tabulados de la forma siguiente:

Electrodo de referencia		Estado de corrosión
Cu/CuSO4	Ag/AgCl/ 4M KCl	
> - 200 mV	> - 106 mV	Débil
- 201 a -350 mV	- 107 a - 256 mV	Intermedio
- 351 a - 500 mV	- 257 a - 406 mV	Alto
< - 500 mV	< - 407 mV	Corrosión Severa

Figura 7. Riesgo de corrosión según medición de potenciales eléctricos en el hormigón armado.

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Esta técnica, también llamada polarización lineal, se fundamenta en la medición de la resistencia de polarización del hormigón armado. La resistencia de polarización se puede medir de dos formas:

- Medición Galvanoestática: Aplicando una pequeña corriente (ΔI) al acero y controlando la variación en el potencial (ΔV)
- Medición Potencioestático: Aplicando un pequeño cambio de potencial ($\Delta V = 10 - 20$ mV) al acero y midiendo el flujo resultante de corriente (ΔI).

Así, la resistencia a polarización será el cambio de potencial sobre la corriente aplicada:

$$R_p = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

Con este valor y con una constante que depende de la pasivación del acero, obtendremos el valor de corriente y la velocidad de corrosión.

Estado de corrosión	i_{corr} ($\mu A / cm^2$)
Sin corrosión prevista	< 0,2
Corrosión previsible de 10 – 15 años	0,3 – 1,0
Corrosión previsible de 2 – 10 años	1,1 a 10
Corrosión previsible de 2 años o menos	> 11

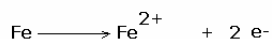
Figura 8. Riesgo de corrosión según la medición de la velocidad de corrosión en estructuras de hormigón armado

Los tres ensayos anteriores son no destructivos y pueden variar con factores como la humedad presente en los poros del hormigón, la presencia de cloruros u otro tipo de iones que actúen como transportadores de carga eléctrica, el grado de carbonatación del hormigón, la temperatura, porosidad, etc, distorsionarán los resultados anteriores. De aquí la importancia de saber interpretar dichos resultados.

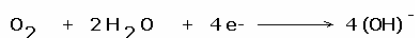
4-PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica parte del principio de que el proceso de corrosión es una reacción electroquímica. Para que esto suceda, exige la formación de cuatro fenómenos indispensables en el interior del hormigón armado:

1. Ánodo: Donde se produce la disolución del hierro (Reacción de oxidación).



2. Cátodo: Donde se produce la reacción de reducción gracias a la presencia de agua y oxígeno.



3. Electrolito: Solución que facilita el flujo iónico entre ánodo y cátodo (solución presente en los poros del hormigón).
4. Conexión eléctrica ánodo-cátodo: En el caso del hormigón armado lo constituye las propias barras de acero. Los electrodos (ánodo / cátodo) pueden pertenecer a la misma barra, o también

se puede lograr conexión a través de los puntos de contacto como por ejemplo son los estribos, sistemas de puesta a tierra, anclajes de escaleras o tuberías, etc..

Existen básicamente 3 formas de frenar el proceso de corrosión:

- Aislamiento: Evitar dentro de lo posible la existencia de alguno de los 4 fenómenos para la formación de una pila electroquímica. Normalmente se aplican revestimientos externos para frenar la entrada de CO_2 , agua, cloruros, etc.
- Inmunización: Generar un sistema donde la corrosión tenga lugar en otro metal y no en las armaduras del hormigón. Esto se logra mediante la implementación de los sistemas de protección catódica de corriente impresa o por ánodo de sacrificio.
- Pasivación: Devolver al hormigón las características originales. (alta alcalinidad)

PROTECCIÓN CATÓDICA POR ÁNODO DE SACRIFICIO

Sus orígenes datan de 1824, cuando el ingles Dave empleó bloques de zinc para proteger la envoltura de los buques de guerra británicos, dando inicio a lo que hoy se conoce como protección catódica.

Serie Electroquímica Estándar de algunos metales		
Metal		Potencial Estándar mV
Potasio	Activo	-2,922
Magnesio		-2,340
Aluminio		-1,670
Zinc		-0,762
Cromo		-0,710
Hierro		-0,440
Níquel		-0,250
Hidrógeno		0,000
Cobre		+0,345
Plata		+0,800
Platino		+1,200
Platino	Pasivo	+1,680

Figura 9. Serie electroquímica de los metales más empleados.

La protección catódica por ánodo de sacrificio se realiza normalmente con tres metales característicos: Zinc (Zn), Magnesio (Mg), Aluminio (Al) y sus aleaciones. El zinc ha sido el material anódico clásico y pionero en el desarrollo de la protección catódica. Los ánodos de aleaciones de magnesio han sido también empleados con éxito, principalmente en la protección de estructuras que se encuentran en medios agresivos o de resistividad elevada, logrando una rápida polarización. El aluminio y sus aleaciones han sido empleadas en los últimos años en protección de elementos en contacto con agua de mar.

Tomando en cuenta la serie electroquímica anterior, un metal tendrá un carácter anódico respecto a otro si se encuentra arriba de él en dicha serie. Es esta la razón por lo que comercialmente se emplea zinc, magnesio y aluminio para proteger al acero.

Las propiedades que ha de reunir un material anódico han de ser las siguientes:

1. Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo como para polarizar la estructura de acero.
2. Cuando el metal actúe como ánodo debe presentar una pequeña tendencia a la polarización, no debe formar películas pasivantes y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
3. El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.

4. En su proceso de disolución anódica, la corrosión deberá ser lo más uniforme posible.
5. El metal debe ser de fácil adquisición y podrá fundirse en diferentes formas y tamaños
6. El material tendrá un costo razonable.

Conociendo la superficie a proteger, la intensidad de corriente por ánodo, su peso y geometría, su resistencia eléctrica y la del medio, podremos diseñar un sistema galvánico de protección con una duración media de vida estimada.

Varios fabricantes de productos químicos para la construcción comienzan a desarrollar productos específicos de protección galvánica para elementos de hormigón armado.

La facilidad de monitorización de estos sistemas hace que puedan ser revisados y verificados en cuanto a su efectividad, duración de vida estimada, etc.

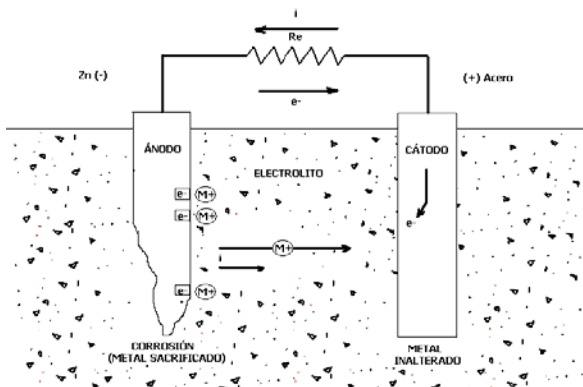


Figura 10. Esquema de protección catódica por ánodo de sacrificio.

En estructuras de hormigón armado, el requerimiento de densidad de corriente varía según las condiciones que rodean a las armaduras. De esta forma, no será igual proteger una estructura de bajo riesgo de corrosión que un elemento con procesos corrosivos severos

PROTECCIÓN CATÓDICA POR CORRIENTE IMPRESA

Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, titanio-óxido de rutenio, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico.

Los componentes de un sistema de protección catódica por corriente impresa son:

1. Un ánodo dispersor
2. Una fuente de corriente continua
3. El cable portador de la corriente

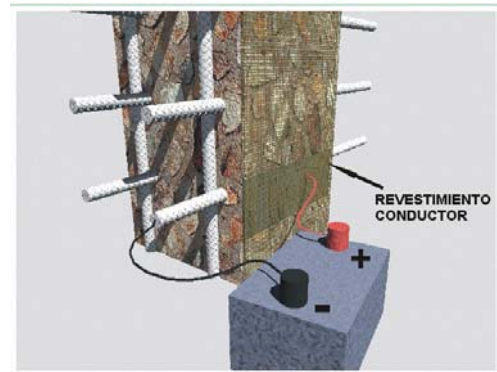


Figura 11. Protección catódica por corriente impresa. Potenciales de protección entre -850 y -1200 mV.

La posibilidad de obtener mayor corriente drenada desde el transformador hace que la protección catódica por corriente impresa sea aplicable en muchas circunstancias en donde los ánodos de sacrificio son poco efectivos o muy costosos por la cantidad necesaria.

El diseño de protección es muy similar a la protección galvánica pero el cálculo parte de la geometría de la estructura y la capacidad de corriente de los ánodos. A diferencia de los ánodos de sacrificio, la protección catódica por corriente impresa ofrece un tiempo de protección muy superior. El menor desgaste de los electrodos inertes y la regulación posterior de corriente una vez pasivada la estructura, hace que el requerimiento de corriente sea menor y así, mayor su durabilidad.

Criterios basados en consideraciones termodinámicas y de depolarización nos permite establecer la eficacia de los sistemas de protección catódica.



CORRIENTE IMPRESA

Figura 12. Esquema general de una protección catódica por corriente impresa.

Además de su función protectora contra la corrosión, la protección catódica tiene efectos o aplicaciones secundarias tales como:

- Realcalinización del entorno de las armaduras.
- Descomposición del agua y reducción del contenido de humedad.
- Inactivación de bacterias anaerobias y aerobias por aumento del pH.
- Generación de cloro.
- Reducción de incrustaciones calcáreas en tuberías.

5-CONCLUSIONES

En la búsqueda de la durabilidad

La protección catódica garantiza una mayor longevidad de las estructuras de hormigón armado.

La protección catódica puede ser controlada y monitorizada para determinar su efectividad

Las múltiples aplicaciones de la protección catódica permite su uso en una gran diversidad de sustratos y elementos

www.hcc-es.com

Avda. Euskadi 5. 28917 Leganés. Madrid
Telf. 916108506. Fax: 916107827

Dpto. Comercial: virginia@hcc-es.com

