

# Electroquímica y concreto reforzado: Más vida útil para las estructuras

Brian Pailles.

Ingeniero Principal, Vector Corrosion Services Inc.

Reimpreso del "Concrete Repair Bulletin Marzo/Abril 2019" con autorización del International Concrete Repair Institute ([www.icri.org](http://www.icri.org))

Fotos: Vector Construction y Vector Corrosion Technologies

## Introducción

La corrosión del acero de refuerzo es uno de retos de resistencia más significativos que enfrentan las estructuras de concreto reforzado en todo el Mundo. La corrosión suele ser producto del ingreso de iones cloruro y/o de carbonatación, los cuales destruyen el estado de pasividad natural del acero embebido en el concreto. Entre las numerosas opciones de preservación de estas estructuras se incluyen los ánodos galvánicos y la protección catódica por corriente impresa; sin embargo, las técnicas electroquímicas pueden extender significativamente la vida de servicio, con bajo mantenimiento adicional, lo cual las hace interesantes dentro de la preservación de la infraestructura de concreto reforzado. Existen dos técnicas electroquímicas implementadas: la extracción electroquímica de cloruros y la realcalinización.

La extracción electroquímica de cloruros (ECE), dirige hacia afuera del concreto los cloruros existentes en el acero, restaurando de esta manera su pasividad. La realcalinización, como su nombre lo indica, vuelve a alcalinizar el concreto carbonatado, restaurando así la pasividad del acero de refuerzo. Ambas técnicas logran su objetivo mediante la instalación temporal de un ánodo externo y la aplicación de un campo eléctrico entre el ánodo temporal y el acero de refuerzo. En la ECE, el campo eléctrico transporta los iones cloruro fuera del acero, mientras que en la realcalinización el campo eléctrico conduce una solución alcalina dentro del concreto. Estos métodos también son tratados en el documento ICRI 510.1, *Guide for Electrochemical Techniques to Mitigate the Corrosion of Steel for Reinforced Concrete Structures*<sup>1</sup>, que proporciona amplia información sobre estas técnicas de preservación.

En este artículo veremos dos casos históricos de aplicación de estas técnicas: la autopista interestatal 480 (I-480), en el centro de la ciudad de Omaha, Nebraska, donde se aplicó la ECE en la

subestructura; y el hall del edificio administrativo de la Universidad de Chicago, en cuya fachada se implementó la realcalinización.

## Corrosión producida por iones cloruro

El acero de refuerzo embebido en el concreto está protegido de la corrosión por la alta alcalinidad de la solución porosa del concreto, con un pH generalmente mayor a 12. Este alto pH de la solución porosa forma una película pasiva en la superficie del acero, que previene la corrosión. En estructuras de concreto reforzado expuestas a los iones cloruro del agua de mar, las sales de deshielo o suelos que contienen cloruros pueden destruir la película pasiva. Los iones cloruro penetran la superficie del concreto y la corrosión comienza una vez se alcanza un valor crítico en su concentración a la profundidad donde se encuentra el acero. El valor crítico generalmente aceptado para el inicio de la corrosión varía entre 0,45 y 0,9 kg (1-2 libras) de cloruro por 0,76 m<sup>3</sup> (yarda cúbica) de concreto. El concreto también puede contener cloruros, ya sea agregados en el concreto fresco o presentes de forma natural entre sus componentes. Podrían agregarse cloruros en forma de aditivos químicos durante la mezcla del concreto o por utilizar agua de mar en vez de agua potable.

A estos cloruros mezclados y a los que penetran el concreto desde el medio ambiente se les conoce como cloruros "libres" y son los responsables de la corrosión producida por iones cloruro en el concreto reforzado. Los cloruros unidos químicamente presentes en los agregados no pueden iniciar la corrosión.

## Corrosión producida por carbonatación

La carbonatación reduce el pH del concreto debido a que el dióxido de carbono se difunde dentro del concreto húmedo. La reacción del CO<sub>2</sub> con la cal libre presente en la estructura porosa del concreto reduce

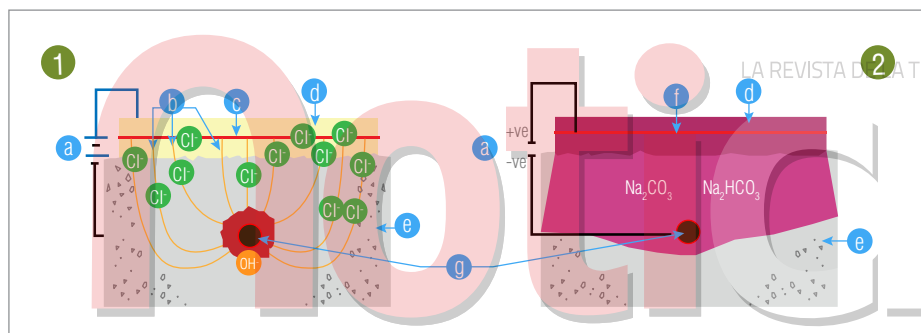
la concentración de  $\text{OH}^-$  dentro del concreto. Si el pH del concreto disminuye a un valor inferior a 11, comienzan la despasivación del acero de refuerzo y la corrosión. La carbonatación puede dar inicio a la corrosión en el concreto no contaminado con cloruros, que puede propagarse a través de las grietas en concreto fracturado. En concreto contaminado con cloruros, la carbonatación iniciará la corrosión más rápidamente y requerirá concentraciones más bajas para su inicio.

### Procesos de ECE y de realcalinización

El objetivo fundamental de la ECE y la realcalinización es restablecer la pasividad del acero de refuerzo. La técnica de la ECE es conducida por una combinación de movimiento de los iones cloruro hacia el exterior del acero de refuerzo y la generación de iones hidroxilo en la superficie de este acero (Fig. 1). La realcalinización (Fig. 2) se aplica aumentando el pH del concreto alrededor del acero mediante el transporte de una solución básica dentro del concreto.

1 Fig.1: Proceso de ECE.

2 Fig. 2: Proceso de re-alkalización.  
a. Fuente de corriente continua.  
b. Recorrido actual.  
c. Ánodo temporal.  
d. Medio conductor.  
e. Concreto.  
f. Ánodo.  
g. Refuerzo.



En ambos sistemas se instala un ánodo temporal externo a lo largo del elemento estructural a tratar. Típicamente, el ánodo temporal está compuesto de acero al carbono como un tejido de alambre soldado; sin embargo, en algunas aplicaciones se utiliza malla de acero inoxidable o de titanio. Se aplican espaciadores para alejar el ánodo de la superficie del elemento y crear un espacio suficiente de encapsulación de este ánodo. Una vez que el ánodo se encuentra en su lugar, el medio conductor (electrolito) se coloca sobre y alrededor del ánodo, creando un par iónico entre el ánodo y la superficie de concreto. Este medio conductor permite una transferencia de carga entre el ánodo externo y el acero de refuerzo dentro del concreto. El medio se mantiene húmedo utilizando un sistema de goteo y envolviendo con plástico el elemento a tratar.

El ánodo temporal se conecta al terminal positivo de la fuente de corriente directa (DC), mientras que el acero de refuerzo del elemento a ser tratado se conecta al terminal negativo. La fuente de energía suministra aproximadamente de 100 mA a 200 mA de corriente a cada  $0,1 \text{ m}^2$  (pie cuadrado) por superficie de área del acero durante el tratamiento. En el proceso de la ECE, el ánodo cargado positivamente atrae hacia él los cloruros, mientras que el acero de refuerzo cargado negativamente

dirige los cloruros hacia afuera. En la realcalinización se incluye una solución de carbonato de potasio, la cual es atraída hacia el acero de refuerzo embebido por la carga eléctrica entre el ánodo externo temporal y el acero de refuerzo embebido. Un beneficio de los sistemas de ECE y de realcalinización es que, cuando el acero de refuerzo se carga negativamente durante el tratamiento, alrededor de este acero aparece una reacción electroquímica con la formación de iones de hidróxido.

Esto aumenta el pH localmente alrededor del acero de refuerzo, creando una capa pasiva similar a la que se forma cuando el acero es embebido por primera vez en concreto fresco. El proceso de eliminar cloruros y aumentar el pH del concreto disminuye la corrosión activa en el acero de refuerzo y amortigua la actividad de corrosión adicional.

### Casos estudiados

#### I-480 Omaha - Rehabilitación de la subestructura

La autopista elevada I-480 orienta el tráfico hacia el centro de la ciudad de Omaha. El Departamento de Transporte de Nebraska (NDOT) emprendió durante el verano de 1998 una importante rehabilitación de esta estructura de 1 km (unas 0,6 millas) de largo. La rehabilitación incluyó el reemplazo de la losa de rodamiento en las direcciones este y oeste, además de otras importantes reparaciones de la subestructura. La subestructura está integrada por 50 pilares con forma de martillo. El puente sufría de corrosión inducida por cloruros como resultado de la aplicación de productos químicos para deshielo.

La subestructura estaba expuesta a los cloruros contenidos en la escorrentía contaminada que circulaba a través de juntas de la losa con fugas. Además, los drenajes que recogen la escorrentía sobre la losa se construyeron dentro de los pilares. Infortunadamente, estos drenajes devolvían el agua y goteaban dentro de los pilares, constituyendo una fuente adicional de contaminación por cloruros. La rehabilitación de la subestructura incluyó reparaciones típicas de concreto, relocalización de drenajes en el exterior de los pilares y aplicación posterior de la ECE en 23 de los pilares. La Figura 3 muestra un ejemplo de los pilares antes de la rehabilitación.

➔ Fig. 3: Condiciones del pilar antes del tratamiento.





↑ Fig. 4: Remoción del concreto fracturado y delaminado.



↑ Fig. 5: Instalación del ánodo externo temporal.

Se observan con claridad las manchas de agua y corrosión a lo largo de la cara de la pila. El primer paso en la rehabilitación de los pilares I-480 fue remover y reemplazar el concreto delaminado y desprendido que resultó tras años de actividad corrosiva (Fig. 4), ya que la ECE mitiga la corrosión, pero no restaura el deterioro físico que se ha producido en el concreto; por lo tanto, el concreto deteriorado físicamente debe retirarse y repararse antes del tratamiento de la ECE.

Luego de reparar el concreto defectuoso, se instaló el ánodo externo temporal en la superficie completa de los pilares (Fig. 5). Se utilizaron listones de madera para separar el ánodo temporal, malla electrosoldada, de la superficie del pilar, de forma que el medio conductor pudiera encapsular completamente el ánodo. Una vez que el ánodo estuvo en su lugar y se hicieron conexiones de alambre tanto al ánodo como al refuerzo de acero, los medios conductores se rociaron completamente sobre el muelle para sellar del todo el ánodo (Fig. 6). Una vez aplicado el medio conductor, los pilares se envolvieron en plástico para mantener húmedo el medio (electrolito).

Un sistema de riego por mangueras mantiene el medio húmedo y una baja resistencia al paso de la corriente entre el ánodo y el acero de refuerzo. Luego se conectó la fuente de alimentación DC<sup>1</sup>, y el tratamiento se aplicó en los 23 pilares durante aproximadamente 6 semanas (Fig. 7), cuando se retiraron el ánodo temporal y la malla electrosoldada. Finalmente, se procedió a limpiar la superficie con chorro de arena y se aplicó recubrimiento para ayudar a prevenir una exposición futura a los cloruros. La figura 8 muestra los pilares completos después del tratamiento y el recubrimiento.

Antes y después del tratamiento se tomaron muestras de concreto para verificar la reducción de cloruros. La Figura 9 proporciona los resultados promedio de la concentración de cloruro antes y después del proceso de tratamiento de ECE. Se observa una disminución significativa en la concentración de cloruro a lo largo de las profundidades muestreadas. En promedio, se encontró una reducción del 74% en la concentración de cloruros dentro del concreto luego de efectuada la ECE. Puede observarse una reducción del 66% a una profundidad de muestra entre 0 y 25 mm (0 y 1"), de 76% entre 25 y 50 mm (1-2") y de 80% entre 50 y 75 mm (2-3"). En la profundidad del acero, que varía de 50 a 65 mm (2 a 2,5"), la concentración de cloruro luego del proceso de la ECE está muy por debajo del umbral de cloruros necesarios para que se inicie la corrosión. En 2018, el autor visitó y revisó el puente I-480 después de 20 años de realizado el tratamiento. Una inspección visual muestra estos pilares en muy buena condición (Fig. 10). La gran mayoría de las pilas no muestra signos de deterioro por corrosión. Existen contados casos en que se observan signos de corrosión en los extremos de los muelles (Fig. 11). Al parecer, este problema se debe a las juntas por encima de las pilas, que dirigen nuevamente agua contaminada con cloruro hacia los pilares. Esta reexposición ha permitido que nuevos cloruros migren a la matriz de concreto. Sin embargo, en el resto del área de la superficie de las pilas, donde se mitigó la exposición al cloruro, el proceso de ECE ha evitado efectivamente un mayor deterioro de las pilas. La vida útil de estas pilas I-480 se ha ampliado sustancialmente gracias a la aplicación de la ECE.

#### Universidad de Chicago – Reparación de una fachada

El proceso de re-alcálizaci3n se llevó a cabo en el edificio administrativo de la Universidad de Chicago. Este hall fue diseñado por el arquitecto Walter Netsch en estilo brutalista (Fig. 12). El edificio consiste en una torre de 28 pisos construida en 1963, con un marco en concreto reforzado vaciado in situ como fachada, dentro del cual hay un panel de ventanas prefabricadas. Por la edad y la exposici3n al medio ambiente, se presentó corrosi3n del acero de refuerzo inducida por carbonataci3n con daños en el concreto en forma de grietas y desconchamientos, que exigieron extensas reparaciones y restauraci3n. En la restauraci3n del exterior del edificio se realizaron reparaciones al concreto de fachada, así como el tratamiento de realcalinizaci3n del concreto en esta superficie exterior.

En ánodo temporal utilizado en este caso fue una malla de titanio revestida con óxido de metal mixto. La superficie del edificio se dividió en zonas y el proceso de realcalinizaci3n se aplicó a toda la fachada. En cada zona, el tratamiento se efectuó típicamente durante 7 días, manteniendo húmedos el ánodo y el medio mediante una soluci3n de carbonato de potasio. Una vez efectuado el tratamiento en la primera zona, el sistema se removió hacia la siguiente zona, efectuando el tratamiento hasta completar toda la fachada.

El proceso de realcalinizaci3n se comprobó mediante núcleos, extraídos después del tratamiento, que se sometieron a la prueba de fenolftaleína indicadora del pH. La fenolftaleína reacciona en ambiente alcalino con pH de 9,5 o superior,

1: DC. Direct Current. Corriente continua



↑ Fig. 6: Aplicaci3n de la celulosa-electrolito.



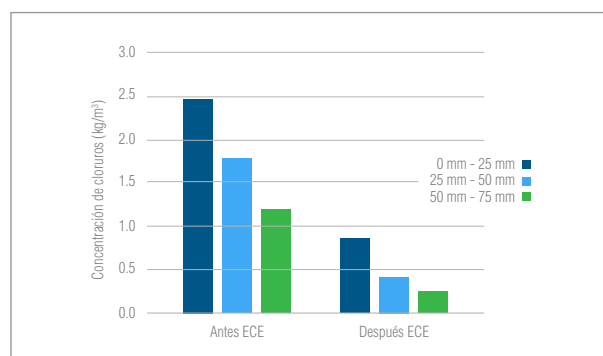
↑ Fig. 7: Tratamiento ECE completo y pilares pintados.



↑ Fig. 8: Tratamiento ECE en progreso.



↑ Fig. 10: Pilar típico 20 años después del tratamiento de ECE.



↑ Fig. 9: Resultados de la muestra de cloruros antes y después del tratamiento con ECE.  
BRIAN PAILES

cambiando del color claro a un púrpura rojizo. La Figura 13 muestra dos núcleos: uno tomado antes, y el otro después del tratamiento de realcalinización. Los dos núcleos fueron rociados con fenolftaleína.

El núcleo tomado antes de la realcalinización muestra un pH por debajo de 9,5 al permanecer la muestra clara; por el contrario, el núcleo tomado después de realizado el tratamiento muestra una coloración púrpura rojiza debido a la reacción de la fenolftaleína con el pH del concreto, indicando que el pH del concreto se ha incrementado. Esta prueba fue realizada en todas las zonas para comprobar la efectividad del tratamiento.

## Sostenibilidad

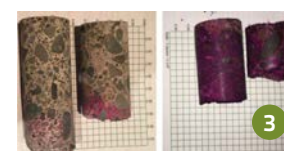
En los dos proyectos presentados, el concreto reforzado estuvo expuesto a contaminación que condujo a corrosión seria y a deterioro físico posterior. Los tratamientos electroquímicos mejoraron el ambiente alrededor del refuerzo y retornaron el acero a un estado pasivo. Mantener el concreto existente en su lugar no solamente resulta económico: también proporciona una ventaja sustancial ambiental, comparada con su reemplazo. La producción de concreto y su transporte generan emisiones, calor y consumo de recursos naturales.

## Conclusión

La Extracción Electroquímica de Cloruros y la Realcalinización corresponden a métodos económicos efectivos para tratar corrosión activa y extender efectivamente la vida útil de las estructuras de concreto reforzado. Su aplicación contribuye de manera positiva la sostenibilidad de las estructuras y a disminuir el impacto ambiental.

En el proyecto I-480 se mantuvo y se prolongó la vida útil de 5.125 m<sup>3</sup> (6.700 yardas<sup>3</sup>) de concreto, mientras que en el proyecto de la Universidad de Chicago se protegieron 995 m<sup>3</sup> (1.300 Yd<sup>3</sup>) de concreto.

La reconstrucción de estos elementos de concreto habría tenido un impacto negativo significativo sobre el medio ambiente. La Tabla 1 estima el impacto ambiental que se ha evitado al aplicar los tratamientos electroquímicos en vez de reemplazar estas estructuras.



1 Fig. 11: Deterioro potencial en junta con fugas.

2 Fig. 12: Universidad de Chicago - Edificio administrativo.

3 Fig. 13: Testigos de prueba antes y después del tratamiento.

| Descripción                                                      | I-480                                                                         | Universidad de Chicago                                                     |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Concreto conservado en sitio (m <sup>3</sup> )                   | 5.125                                                                         | 995                                                                        |
| Emisión de óxido nítrico (kg) <sup>i</sup>                       | 2.962                                                                         | 575                                                                        |
| Emisión de Dióxido de Carbono (kg) <sup>ii</sup>                 | 3.663<br>(equivalente a las emisiones anuales de 833 personas) <sup>iii</sup> | 711<br>(equivalente a las emisiones anuales de 162 personas) <sup>ii</sup> |
| Uso de recursos naturales (ton) <sup>iv</sup>                    | 13.191                                                                        | 2.559                                                                      |
| Consumo de agua potable (equivalente a día/persona) <sup>v</sup> | 1.695                                                                         | 329                                                                        |
| Residuos sólidos a relleno sanitario (ton) <sup>vi</sup>         | 15.975                                                                        | 2.633                                                                      |
| Generación de desperdicio calórico (GJ) <sup>vii</sup>           | 15.975                                                                        | 3.100                                                                      |

- 1.8 kg Óxido Nítrico / Tonelada de Clinker. [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/33324\\_guide\\_nox\\_anglais.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/33324_guide_nox_anglais.pdf)
- Basado en: Emisiones de CO<sub>2</sub> de 0.13 kg CO<sub>2</sub> / kg de concreto + 2.8 kg CO<sub>2</sub> / kg de acero, Scrivener (2014) Opciones para el futuro del cemento, The Indian Concrete Journal, Vol.88, Número 7, páginas 11-21.
- Basado en 20 toneladas métricas por persona por año. <https://www.sciencedaily.com/releases/2008/04/080428120658.htm>
- 1.6 toneladas de mineral para fabricar 1 tonelada de arrabio, <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/raw-materials.html>; 1.5 toneladas de materias primas para fabricar 1 tonelada de cemento, <http://ietd.iipnetwork.org/content/raw-material-preparation>; los cálculos de materia prima para agregados gruesos y finos se basan en proporciones de mezcla típicas.
- Solo se consideró el agua de mezcla y un consumo de 455 Lt. de agua / día por persona, [https://www.phila.gov/water/educationoutreach/Documents/Homewateruse\\_IG5.pdf](https://www.phila.gov/water/educationoutreach/Documents/Homewateruse_IG5.pdf)
- La masa sale a partir del volumen de concreto retirado por la densidad del concreto.
- A.K. Schindler, K.J. Folliard, Modelos de Calor de Hidratación para Materiales Cementicios, ACI Mater. J. 102 (2005) pp 24-33; Summerbell, D. L., Barlow, C. Y., y Cullen, J. M. (2016), Potential Reduction of Carbon; Emisiones por mejora del rendimiento: un estudio de caso de la industria del cemento, Journal of Cleaner Production, 135, pp 1327-1339; y Kuroki, T., Kabeya, K., Makino, K., Kajihara, T., Kaibe, H., Hachiuma, H., y Fujibayashi, A. (2014), Generación termoelectrónica usando calor residual en trabajos de acero, Journal of Electronic Materials, 43 (6), pp 2405-2410.

↑ Tabla 1. Impactos ambientales evitados en los proyectos I-480 y Universidad de Chicago.  
BRIAN PAILES

## Referencias

- ICRI 510.1, Guide for Electrochemical Techniques to Mitigate the Corrosion of Steel for Reinforced Concrete Structures, International Concrete Repair Institute, St. Paul, MN 55114, 2013, 24 pp.
- Brian Pailes, PhD, PE, NACE CP-4 PhD de la Universidad Rutgers, MS de University of Virginia y BS de Northeastern University. Ingeniero profesional registrado, sirve en varios comités de corrosión y ensayos no destructivos para la Comisión de Investigación del Transporte (TRB), y la Sociedad Americana de Ensayos No destructivos (ASNT). Brian es Ingeniero Principal de Vector Corrosion Services en Tampa, Florida. Ha trabajado en diferentes puentes a lo largo de Estados Unidos y participó en el Programa de Desempeño de Puentes, de la Administración Federal de Autopistas (FHWA). Su área de experiencia incluye, protección catódica, ensayos no destructivos, deterioro del concreto, corrosión en concreto reforzado y materiales de concreto.