

## CARBONATACIÓN

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado perfectamente. En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros, no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del dinero que cuesta remediar sus efectos.

Uno puede preguntarse por qué razón un proceso tan común y natural como la carbonatación no ha sido ampliamente reconocido en Estados Unidos como una causa seria de corrosión de las varillas de refuerzo. Algunos creen que la carbonatación es causada por los calentadores que queman combustible y que se usan en interiores. Aunque estos calentadores pueden liberar grandes cantidades de dióxido de carbono (el culpable de la carbonatación), sólo se requiere una pequeña concentración de CO<sub>2</sub>, que normalmente se encuentra en la atmósfera (0.03 por ciento) para que ocurra la carbonatación del concreto. Hay quien piensa que la carbonatación del concreto es un problema que ocurre únicamente en Europa y cita como una razón las mezclas de concreto de menor calidad y los estándares europeos. Sin embargo, la única diferencia de consecuencias reales entre el concreto de Europa y el del resto del mundo es su edad: el de Europa, en general, es más viejo. Consecuentemente, el primer lugar donde hubo que encarar la corrosión del concreto inducida por la carbonatación fue Europa.

### ¿Qué es la carbonatación?

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral (figura 1). ¿Por qué es un problema la pérdida de pH? Porque el concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Esta es la misma capa pasivadora que atacan los cloruros cuando alcanzan el acero de refuerzo expuesto a sales descongelantes y ambientes marinos.

Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9.5), es posible que empiece la corrosión, resultando finalmente en el

agrietamiento y astillamiento del concreto (figura 2). Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar.

Es muy importante identificar la presencia de la carbonatación cuando también hay cloruros en el concreto. En el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero ahogado. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el umbral de cloruro para la corrosión es significativamente menor -100 ppm o menos-. Por esta razón, una investigación de la condición para la mayoría de las estructuras de concreto en proceso de corrosión debe siempre incluir un análisis de la profundidad de carbonatación.

Afortunadamente para los propietarios, especificadores y contratistas, la carbonatación es una condición relativamente sencilla de identificar y diagnosticar. La manera más fácil de detectar la carbonatación en una estructura es romper un pedazo de concreto (preferentemente cerca de un borde) en donde se sospeche que hay carbonatación. Después de soplar todo el polvo residual del espécimen o del sustrato, se pulveriza una solución de 1 o 2 por ciento de fenoltaleína en alcohol sobre el concreto (figura 3). Las áreas carbonatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosado brillante.<sup>3</sup> Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente ha progresado el "frente" de carbonatación dentro del concreto. Existen otros métodos y otros indicadores para detectar la carbonatación, pero éste es, con mucho, el método más fácil y común de detección.

Las agencias de prueba calificadas realizan estas pruebas rutinariamente como parte de una investigación de la condición en edificios y estructuras de concreto. Además de las pruebas de carbonatación, estas investigaciones de la condición incluyen con frecuencia pruebas de resistencia del concreto, valoraciones de la profundidad del recubrimiento, contenido de cloruro y permeabilidad del concreto.

### Factores que afectan la carbonatación

Tal como se mencionó antes, el proceso de carbonatación es completamente natural. También se ve afectado por variables naturales que se encuentran en el concreto. El aumento de carbonatación depende, en gran medida, del contenido de humedad y permeabilidad del concreto.

Contenido de humedad del concreto. Como se muestra en la figura 1, para que tenga lugar la carbonatación, debe haber presencia de humedad. La reacción de carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre 50 y 55 por ciento.<sup>4</sup> A humedad más baja, no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio. Por

encima de 75 por ciento de humedad, la situación se revierte y los poros se bloquean progresivamente con agua.

Aunque esto permite que se disuelva libremente el hidróxido de calcio, evita en gran medida el ingreso del dióxido de carbono. Así se explica por qué diferentes lados de la fachada de un edificio de concreto, por ejemplo, pueden variar grandemente en la profundidad de sus frentes de carbonatación. Una fachada expuesta al mar puede tener poca carbonatación debido a su contenido constantemente alto de humedad, mientras que la carbonatación puede haber avanzado a niveles más profundos en los otros lados del edificio.

Permeabilidad del concreto. El concreto permeable se carbonatará rápidamente. Muchos años de protección contra la carbonatación pueden sumarse al concreto reforzado si los constructores simplemente siguen las prácticas estándar para producir concreto de baja permeabilidad. Éstas incluyen relaciones bajas de agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas tales como ceniza volante o humo de sílice y curado apropiado. Todas estas prácticas reducen la permeabilidad del concreto y hacen más difícil para que el dióxido de carbono se difunda a través de él.

Recubrimiento del concreto y defectos de superficie. La carbonatación puede inclusive causar problemas de corrosión aun en concreto de alta calidad. Un recubrimiento bajo del concreto y defectos de superficie tales como grietas y pequeños hoyos proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo. La figura 4 muestra claramente de qué manera una grieta ha llevado la carbonatación muy por debajo de la superficie expuesta de concreto. No pasará mucho tiempo antes de que el acero en el área de esta grieta empiece a corroerse debido a la pérdida de pasivación.

Del mismo modo, los pequeños hoyos pueden, a veces, dar como resultado la pérdida de 12 mm o más del recubrimiento protector del concreto. Si ha de usarse un recubrimiento protector anticarbonatación, los pequeños hoyos y otros defectos de la superficie deben rellenarse primero con un "mortero nivelante" para evitar roturas en el recubrimiento protector.

Los bordes del recubrimiento de concreto son notables por su susceptibilidad a la corrosión inducida por carbonatación. Como se ve en la figura 5, los bordes o las esquinas tienen dióxido de carbono que se difunde hacia el acero de refuerzo en dos direcciones. Si el acero en estas áreas no tuviera un recubrimiento de concreto adecuado, la carbonatación conduciría a la corrosión y podría causar astillamiento en los bordes en muy pocos años. Durante la construcción original, las esquinas son también áreas donde con frecuencia el concreto no está bien compactado. Los huecos y los agregados expuestos de la superficie reducen el recubrimiento de concreto, permitiendo que la carbonatación alcance rápidamente el acero.

## Estrategias de reparación y protección

La investigación de la condición debe siempre constituir la base para un enfoque de reparación y protección. Antes de que pueda prescribirse un remedio apropiado, debe completarse un diagnóstico minucioso. Para estructuras a las que se ha diagnosticado corrosión, agrietamiento y astillamiento inducidos por la carbonatación, existen pocas opciones de reparación.

Se puede elegir la protección catódica (PC) si el daño por corrosión es severo.<sup>5</sup> Sin embargo, esta es una opción costosa y requiere la continuidad eléctrica del refuerzo, así como también costos sustanciales para el mantenimiento progresivo. La realcalinización es una técnica bastante nueva que pretende restaurar la alta alcalinidad del recubrimiento de concreto extrayendo electroquímicamente un químico con alto contenido de pH en la estructura.<sup>6</sup> Se trata también de una opción costosa con un historial muy limitado.

Con frecuencia, la opción más factible es reparar y proteger el concreto. Esta es una técnica de reparación directa que atiende claramente la necesidad inmediata del propietario.<sup>7</sup> Sin embargo, la reparación del daño visible es sólo el primer paso para una reparación duradera del concreto dañado por la corrosión. Las áreas resanadas cubren usualmente sólo alrededor de 15 por ciento de toda el área de la superficie, pero el área total de ésta ha sido carbonatada. Si sólo se resana el daño visible, sin preocuparse por las causas subyacentes, no pasará mucho tiempo antes de que ocurra mayor astillamiento. Con frecuencia, un propietario ha pagado mucho dinero por un enfoque de reparación para verse finalmente ante más astillamientos en nuevas áreas en el término de dos años. Esto se debe a que el problema de la carbonatación nunca se resolvió de manera efectiva.

Recubrimientos anticarbonatación. Para detener efectivamente el avance del "frente de carbonatación", con frecuencia se emplean recubrimientos anticarbonatación. Al contrario de las pinturas de mampostería o los recubrimientos elastoméricos comunes, los recubrimientos anticarbonatación están específicamente diseñados para detener el ingreso del dióxido de carbono. Existen en Europa métodos de prueba estandarizados para evaluar la resistencia al dióxido de carbono de un recubrimiento. La figura 6 muestra la ilustración de una de tales pruebas, donde puede medirse el coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub> de un material. Estas pruebas han demostrado que un recubrimiento anticarbonatación de alta calidad puede agregar protección a la varilla de refuerzo en una cantidad igual a muchos centímetros de recubrimiento de concreto. Los recubrimientos anticarbonatación deben ser recubrimientos respirables que puedan obtenerse en variedades rígidas o capaces de puentear grietas.

Es importante entender que no todos los recubrimientos resisten el dióxido de carbono. Muchos recubrimientos

elastoméricos impermeables al agua no forman una barrera efectiva para el CO<sub>2</sub>. El uso de tal recubrimiento puede, en efecto, acelerar la carbonatación, secando el concreto a tal grado que permita el ingreso más rápido del CO<sub>2</sub>.

De manera similar, los selladores penetrantes con frecuencia se usan erróneamente para proteger contra la carbonatación. Los materiales a base de silicón tales como los silanos y los siloxanos son repelentes del agua, pero no evitan que entre el dióxido de carbono a los poros del concreto. Y al secar el concreto, también pueden incrementar la rapidez de carbonatación.<sup>4</sup>

Inhibidores de corrosión. Refiriéndonos nuevamente a la figura 2, la gráfica inferior muestra que el frente de carbonatación ha alcanzado ya la profundidad del refuerzo de acero. En situaciones como ésta, el recubrimiento anticarbonatación, aunque detiene el progreso ulterior de la carbonatación, no podrá detener la corrosión existente que ya está teniendo lugar. La investigación ha demostrado que existe todavía suficiente humedad en el concreto para continuar corroyendo la varilla de refuerzo.<sup>8</sup>

La tecnología actualmente en desarrollo de los inhibidores de corrosión puede ayudar a resolver la corrosión existente. En estas situaciones, los inhibidores de corrosión aplicados a la superficie, y que se pueden difundir a través del concreto que sirve de recubrimiento, pueden aplicarse en spray o con rodillos en la superficie de concreto antes de aplicar un recubrimiento anticarbonatación.

Este enfoque utiliza el inhibidor de corrosión para tratar la corrosión existente en la varilla de refuerzo, y el recubrimiento anticarbonatación agrega una protección efectiva. Los inhibidores de corrosión pueden probar su efectividad cuando se usan en situaciones similares, con selladores y membranas, donde los cloruros han alcanzado ya el nivel del refuerzo.

Es necesario que en Estados Unidos se reconozca la carbonatación como una causa seria de la corrosión del acero de refuerzo. A diferencia de los cloruros, el papel de la carbonatación en la corrosión de la varilla de refuerzo se ha descuidado con mucha frecuencia. Para evitar esto, las pruebas de la profundidad de la carbonatación deben siempre incluirse en la evaluación del concreto dañado por corrosión.

## Referencias

1. Parrot, L.J., "A Review of Carbonation in Reinforced Concrete", Cement and Concrete Association, Building Research Establishment, julio de 1987.
2. Roberts, M.H., "Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates", BRE Information Paper, abril de 1981.
3. Campbell, D.H., R.D. Sturm y S.H. Kosmatka, "Detecting Carbonation", Concrete Technology Today, marzo de 1991.

4. Davies, H. y G.W. Rothwell, "The Effectiveness of Surface Coatings in Reducing Carbonation of Reinforced Concrete", BRE Information Paper, mayo de 1989.

5. Broomfield, J.P., "Cathodic Protection of Reinforced Concrete", Society for the Cathodic Protection of Reinforced Concrete, Report núm. 001.95, 1995.

6. Mietz, J., B.Isecke, B. Jonas y F. Zwiener, "Restoration of Reinforced Concrete Structures by Electrochemical Realkalization", Proceedings from the Third International Colloquium on Material Science and Restoration, Berlín, Alemania, 1991.

7. "Guide for Surface Preparation for the Repair of Deteriorated Concrete Resulting from Reinforcing Steel Corrosion", International Concrete Repair Institute, 1995.

8. Chaker, V., M. Funahashi y W. Awiat, "The Use of Linear Polarization to Evaluate the Effectiveness of Membranes at the New York Trade Center", NACE Annual Conference and Corrosion Show, marzo de 1991.

Rick Montani es director de producto de ingeniería en Sika Corp, Lyndhurst, N.J.

Este artículo se publicó en Concrete Repair Digest y se reproduce con la autorización de The Aberdeen Group.