

AUMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CORROÍDAS, MEDIANTE REALCALINIZACIÓN.

Irma Ocampo, Analía Torres, Basilio Solorza, Martín Onorato, Sabrina Borbore, Nancy Moreno
Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ingeniería, Dpto. de Ingeniería Química
Av. General San Martín Oeste 1109 – (CP: 5400) - San Juan – Argentina
Fax: 0264 4200289 iocampo@unsj.edu.ar

Palabras claves: Hormigón armado – Corrosión – Realcalinización

Introducción.

La integridad de una estructura de hormigón armado depende tanto de la calidad de sus componentes como de su dosificación, para lograr las mejores propiedades que garanticen un período de vida útil prolongado. El hormigón protege al acero, esta protección es en dos sentidos, por un lado el hormigón constituye una barrera física que separa al acero del medio circundante y el otro es de carácter químico por el valor de pH alcalino, que se alcanza cuando han tenido lugar las reacciones de hidratación del cemento, que pasivan al refuerzo protegiéndolo químicamente con respecto a la corrosión.

Factores tales como, espesor del hormigón adecuado a las condiciones del medio ambiente, baja porosidad del hormigón, buena adherencia acero-hormigón, mínima fisuración y la posibilidad de repasivación del acero, contribuyen a aumentar la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

Si bien existen varias causas, que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasivante del acero, en la práctica los factores que promueven la corrosión electroquímica de las armaduras en el interior del hormigón son mayoritariamente la carbonatación y la presencia de cloruros, o ambos en conjunto, ayudados por el fisuramiento y/o la porosidad del hormigón y la saturación o no de los poros que permiten el paso del O_2 , CO_2 y Cl^- hasta la armadura; humedad y la presencia de diversos agresores del medio.

Una vez que la corrosión se ha desencadenado, sus daños se manifiestan en general bajo tres vertientes [1]: sobre el acero, con una disminución de su diámetro inicial y por lo tanto de su capacidad mecánica; sobre el hormigón, debido a que al generarse acumulación de óxidos expansivos en la interfase acero-hormigón, provoca fisuras y desprendimientos y sobre la adherencia acero-hormigón.

La zona Cuyo, principalmente San Juan y Mendoza, posee amplias áreas invadidas por la revenición y/o abundante polvo de los afloramientos de salitre, que caracterizan un medio de alta salinidad y agresividad para estructuras. Es una zona de alto riesgo sísmico, de frecuentes heladas en invierno, y bruscos cambios de temperatura. Todas estas condiciones hacen que existan problemas en las construcciones de hormigón armado, que comienzan con microfisuras y grietas que exponen el acero al medio agresivo, con el consecuente deterioro prematuro, generando gastos de reparación no contemplados tan tempranamente.

Para mejorar la vida útil de las estructuras se hace necesario proteger las armaduras; para ello existen técnicas tales como protección catódica, recubrimientos epóxico, otros; la protección catódica debe ser cuidadosamente estudiada y aplicada, porque al acero se le cambia la polaridad y esto puede inducir zonas anódicas en las partes contiguas produciendo corrosión en zonas pasivadas; el recubrimiento epóxico protege por barrera, los resultados no son muy alentadores ya que se han encontrado estructuras, donde este método ha sido aplicado, que muestran corrosión severa de la armadura, con el agravante que el uso de cualquier otro sistema de protección no es efectivo, si a la armadura no se le elimina el recubrimiento.

En el presente trabajo se estudia la realcalinización, es una técnica no convencional que brinda una protección indirecta a través del hormigón. Con esta técnica se lograría incrementar el pH de la solución acuosa de los poros del hormigón, producido por la incorporación de un electrolito alcalino desde la superficie del hormigón. Este proceso repasiva la armadura debido a las reacciones electroquímicas que tienen lugar en ella, otorgándole la alcalinidad suficiente para que el proceso de corrosión se detenga.

El procedimiento es adecuado para reparar estructuras dañadas por un proceso de corrosión, originado por carbonatación, consiguiendo prolongar la vida útil de construcciones civiles afectadas.

Con el objeto de que el presente trabajo no quede en el ámbito de un laboratorio, se eligió un edificio público, para aplicar la técnica de realcalinización a investigar. Es así que utilizando datos de un proyecto anterior [2], de las zonas invadidas por la revinción en la provincia de San Juan, y conociendo los problemas existentes en el lugar se seleccionó el Departamento de Albardón. Además con la aplicación de la técnica se podría paliar en gran medida, el problema de corrosión en las construcciones de la zona. Es así que nos contactamos con los directivos de las escuelas: Misión Monotécnica 44, Vicente López y Planes y Vice Comodoro Marambio, quienes estuvieron de acuerdo y prestan colaboración para que se realice el trabajo. Estas escuelas fueron seleccionadas de acuerdo al año de construcción, 1934, 1952 y 1998 (corresponden al orden en que han sido citadas las escuelas) y a la proximidad de los edificios, que nos permitió analizar rápidamente la agresividad del mismo medio ambiente sobre las tres estructuras.

El *diagnóstico* al que se arribó, después de haber realizado las inspecciones preliminar y detallada [3] del edificio seleccionado es: En función del grado de ataque evaluado se estima realizar una acción inmediata, esto es actuar en un lapso no mayor de uno a dos años.

Ante una estructura dañada como la de la escuela se puede optar por elegir alguna de las siguientes acciones:

Recalcular la estructura para determinar su capacidad resistente.

Reparar parte o toda la estructura.

Reforzar parte o toda la estructura.

Frenar el deterioro ocasionado por corrosión pero sin actuar sobre la capacidad resistente, aplicando la técnica de realcalinización. De elegir esta última opción, es aconsejable realizar un estudio posterior para determinar su capacidad resistente, de esta forma precisar cual o cuales son las medidas más adecuadas para aumentar la vida útil de la estructura.

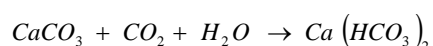
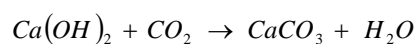
Metodología.

Mecanismo de la corrosión en armaduras de estructuras de hormigón armado.

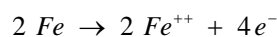
El acero de las armaduras está sumergido en un medio con un pH entre 12 y 13, resultante de la hidratación del cemento, este pH elevado se

produce por la liberación de hidróxido de calcio, "portlandita", que otorga carácter básico al hormigón. En estas condiciones la armadura se encuentra pasiva, por la presencia en su superficie de una capa de óxidos, principalmente Fe_3O_4 y Fe_2O_3 , compacta y continua, que lo mantiene protegido de la corrosión.

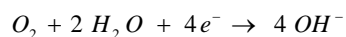
Se puede producir una despasivación de la armadura por carbonatación del hormigón, proceso que ocurre por la incorporación de anhídrido carbónico contenido en el aire, que penetra por las aberturas capilares del hormigón combinándose con el hidróxido de calcio, generando las siguientes reacciones:



En el caso de que la estructura presente carbonatación, favorecida por la presencia de cloruros inicial en el agua de amasado del cemento, se produce la pérdida generalizada de la capa pasivante con disminución del pH; que en los primeros estadios de formación es superior a 12, a valores inferiores a 9.5; en estas condiciones el acero pierde la pasividad y se corroe por la reacción anódica, disolviéndose en iones ferrosos según la reacción:



los cuales pasan a formar distintos óxidos en función de la concentración de oxígeno y de la humedad presente. En estas condiciones se produce la corrosión generalizada, resultando finalmente en el agrietamiento y astillamiento del concreto, producido por los óxidos producto de la corrosión que ocupan de 2 a 14 veces el volumen original de los óxidos pasivantes. Simultáneamente, en otra parte del acero, se produce la reacción catódica, por ejemplo la reducción del oxígeno que procede según:



Por tanto los problemas de corrosión del acero estructural están asociados a la despasivación del mismo, por el proceso electroquímico resultante de las variaciones del medio químico en la interfase hormigón-acero. Estas variaciones originan gradientes de potencial, con flujo de corrientes

eléctricas que producen áreas anódicas y catódicas que forman las celdas de corrosión.

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, éste puede ser devastador y muy costoso de revertir.

Factores desencadenantes de la corrosión de las armaduras.

El proceso de carbonatación es completamente natural y también está afectado por variables naturales que se encuentran en el hormigón. El aumento de carbonatación depende, en gran medida, del contenido de humedad y porosidad del hormigón.

Contenido de humedad del hormigón.

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 [4]. A humedad más baja, no hay suficiente agua en los poros del hormigón 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, se evita la interfase gas-líquido y se dificulta el paso de CO_2 .

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, pueden variar grandemente en la profundidad de sus frentes de carbonatación. Una fachada expuesta al mar puede tener poca carbonatación debido a su contenido de humedad, mientras que la carbonatación puede haber avanzado a niveles más profundos en otros lugares del edificio.

Permeabilidad del hormigón.

Cuanto más poroso sea el hormigón, más rápidamente se carbonatará. La protección contra la carbonatación se ve beneficiada si los constructores siguen simplemente las prácticas estándar para producir hormigón de baja permeabilidad. Éstas incluyen bajas relaciones de agua / cemento, alrededor de 0.5, 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 hormigón, y dificultando así el ingreso por difusión del dióxido de carbono a través de él.

Recubrimiento del hormigón y defectos de superficie.

La carbonatación puede inclusive causar problemas de corrosión aun en hormigones de alta calidad. Un recubrimiento de poco espesor y defectos de superficie tales como grietas, roturas, fallas, facilitan el ingreso del CO_2 . No pasará mucho tiempo antes de que el acero en el área de la grieta empiece a corroerse debido a la pérdida de pasivación.

Los bordes del recubrimiento de hormigón son notables por su susceptibilidad a la corrosión inducida por carbonatación. Los bordes o las esquinas presentan un mayor contenido en dióxido de carbono que se difunde hacia el acero de refuerzo en dos direcciones, ver la siguiente fotografía de una probeta a la que se le ha realizado la prueba de la fenolftaleína.

Fotografía que muestra una probeta a la que se le ha aplicado la técnica de la fenolftaleína.



Si el acero en estas áreas no tuviera un recubrimiento de hormigón adecuado, la carbonatación conduciría a la corrosión y podría causar astillamiento en los bordes en muy pocos años.

Iones cloruros.

La presencia de iones cloruros destruye la capa pasivante que protege inicialmente a las armaduras de acero. Los cloruros, al alcanzar el acero, causan corrosión por "picado". Los cloruros que se encuentran en el agua de mar y en el aire salino de las zonas cercanas a la costa, igualmente en zonas con revenición, penetran en el hormigón por absorción capilar y difusión desde la superficie hacia el interior de las estructuras. También se

pueden encontrar cloruros en aguas subterráneas, en aguas residuales, en plantas de tratamiento y en efluentes industriales.

Combinación de carbonatación e iones cloruro.

Es muy importante identificar la presencia de la carbonatación cuando hay cloruros en el hormigón. En el hormigón 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. 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 hormigón en proceso de corrosión debe siempre incluir un análisis de la profundidad de carbonatación[5].

Técnicas y métodos.

Técnica para determinar la presencia o no de carbonatación en el hormigón.

Para detectar el grado de carbonatación en una estructura se rompe un pedazo de hormigón (preferentemente cerca de un borde) en donde se sospeche que hay carbonatación. Después de quitar todo el polvo residual del espécimen, se pulveriza una solución de 1 o 2 por ciento de fenolftaleína en alcohol sobre el hormigón. Las áreas carbonatadas del hormigón no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosado brillante [5]. Este cambio, muy apreciable de color, muestra cuán profundamente ha progresado el "frente" de carbonatación dentro del hormigón. Existen otros métodos y otros indicadores para detectar la carbonatación, pero el reseñado es uno de los más utilizados en la práctica.

Técnica electroquímica para determinar el estado de corrosión de las armaduras.

Para determinar potenciales de corrosión en probetas, se utiliza la técnica de "toma de potenciales in situ" por ser la técnica mas probada y utilizada en otros proyectos anteriores. Se utiliza como electrodo de referencia el de Cu/CuSO₄. (ASTM C-876 (1987)) 6]. El valor del potencial registrado permite estimar la posibilidad de corrosión, según el criterio explicitado en esta norma, registrado en la tabla 3 :

Tabla 3: Evaluación del riesgo de corrosión según ASTM C-876

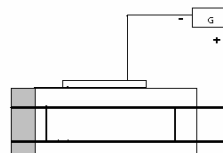
Potencial de corrosión (Volts vs Cu/CuSO ₄)	Probabilidad de Corrosión
>-0.200	<10 %
-0.200 a -0.350	Incierto
<-0.350	>90 %

Esta técnica es cualitativa, informa sobre el riesgo de corrosión, pero no su actividad real.

Técnica de corrosión acelerada.

Con el objeto de reproducir el estado de las armaduras de las columnas de la escuela , en un tiempo prudencial, acotado por el tiempo estipulado de realización del proyecto, se procede a envejecer artificialmente a las probetas. Para ello se aplica una corriente constante a las armaduras, que actúan como ánodo, mediante un galvanostato, figura 1(no está a escala).

Figura 1: Esquema del proceso envejecimiento de una probeta de hormigón armado



La densidad de corriente aplicada es de unos 100 μA/cm², valor unas diez veces mayor a la densidad de corrosión en estructuras de hormigón con importantes grados de corrosión[7].

La profundidad media teórica de ataque a las barras se determina utilizando las leyes de Faraday, considerando corrosión uniforme en armaduras comunes de la construcción, con la siguiente expresión:

$$x = 0.0116 I_{corr} t$$

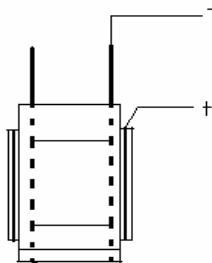
en la que x representa profundidad del ataque, (mm); 0.0116: factor de conversión de unidades; I_{corr}: densidad de corriente de corrosión y t: duración del ataque en (años). Se limita una zona de la probeta para efectuar la corrosión con contraelectrodos de acero inoxidable, colocados externamente cubriendo los 20 cm centrales. El contacto iónico se efectuó utilizando una esponja embebida en NaCl al 3%, el electrolito utilizado es

bicarbonato de sodio, ya que la disolución de la capa pasiva está principalmente controlada por la concentración de este compuesto[8].

Técnica de realcalinización.

La realcalinización es una técnica de rehabilitación de estructuras de hormigón armado carbonatado, con problemas de corrosión en sus armaduras. Es no destructiva y temporal. Consiste en la aplicación de corriente eléctrica, entre la armadura del hormigón y un ánodo colocado en la superficie del hormigón, ver figura 2, (no está a escala).

Figura 2: Esquema del proceso de realcalinización en una probeta de hormigón armado



El ánodo consiste en una malla de acero embebida en una solución electrolítica de pH alcalino. Los iones migran a través del hormigón hacia el refuerzo, donde se produce una reacción catódica dando productos que aumentan el pH, desactivando el proceso de corrosión, que se había originado por carbonatación del hormigón.

Simultáneamente tiene lugar la reacción anódica en el ánodo, colocado externamente. El proceso se monitorea para mantener la densidad de corriente en 1 A/m^2 de superficie de hormigón, con lecturas periódicas y ajustes, de ser necesario de corriente y voltaje (10-40V). Antes de comenzar con la aplicación de la técnica se marcan una serie de puntos, de acuerdo a la extensión a tratar, para obtener núcleos que servirán para realizarles la prueba de la fenolftaleína, y así determinar el progreso de la realcalinización. El proceso se continua hasta que se comprueba la alcalinidad de la interfase acero-hormigón, hecho que evidencia que la armadura se ha repasivado, o sea la corrosión se ha detenido. Posteriormente se procede a dismantelar el sistema instalado, y rellenar los huecos taladrados.

Resultados, Discusión.

Para los primeros ensayos se utilizaron probetas de un trabajo anterior que habían sido enterradas en

zonas revenidas, durante 3 años, disponiendo de 6 probetas de aquellas que se colocaron en el departamento Albardón. En las que se realizaron ensayos de carbonatación resultando que el frente de carbonatación en promedio es de 5 mm en los bordes y de 10 mm en las esquinas de las probetas cuyas medidas son 60 mm x 60 mm x 250 mm. Se registraron los valores de potenciales de las mismas probetas, obteniendo valores que oscilaron entre -100 y - 250 mV. Cantidades que cualitativamente indican una bajísima probabilidad de corrosión. En función de estos resultados es que se implementó una técnica de envejecimiento acelerado, que se aplicó a probetas cilíndricas. Se convino en construir estas probetas semejantes a las columnas de una galería interna del establecimiento escolar, a las que posteriormente se les aplicará la técnica de realcalinización. Se construyeron de acuerdo a las especificaciones de los planos de la escuela. Los materiales utilizados son similares a los utilizados en la construcción del edificio, ya que la calidad ha variado a través del tiempo.

Probetas. Dimensiones: diámetro 300 mm, largo 400 mm; estructura verificada con un pacómetro, 4 hierros ϕ 12 y 2 estribos alambre ϕ 6 espaciados 300 mm; espesor de recubrimiento: 20 mm; composición del hormigón: áridos 66.65% (arena 2/5, piedra 3/5 relación en peso), cemento común 22.25%, agua 11.1 %; fragüe: 28 días con probetas completamente sumergidas; densidad del hormigón 2.19 g/cm^3 , temperatura ambiente.

A estas probetas así preparadas se las dejó secar a temperatura ambiente durante un lapso de unos dos meses, tiempo suficiente por las altas temperaturas reinantes; posteriormente se procedió a envejecerlas calculando el tiempo necesario para obtener un ataque generalizado de las barras de acero de aproximadamente un milímetro, utilizando para ello la ecuación señalada en la técnica respectiva, que corresponde a una pérdida de sección del acero de alrededor del 5%.

El tiempo de exposición fue de once meses, se observó las llamadas fisuras por corrosión, ocasionadas por los productos de corrosión que generan tensiones internas por ocupar mayor volumen que los óxidos de la capa pasivante. Para seguir la evolución del ataque, se realizaron medidas de potenciales de las probetas en proceso de envejecimiento, los valores promedios se consignan en la tabla 4:

Tabla 4: Potenciales de corrosión de las

probetas.

tiempo (meses)	2	4	6	8	10	11
E_{corr} (mV)	- 298	- 375	- 462	- 512	- 560	- 620

De acuerdo a los valores de potencial registrados, y al aspecto físico de las probetas, coloración ocre y fisuras longitudinales, estimamos que se produjo corrosión en la armadura de las mismas. Esta estimación fue corroborada al aplicarle el método de la fenolftaleína a una de las probetas ensayadas.

Con respecto al proceso de realcalinización, se ha diseñado y confeccionado el ánodo externo con alambre de acero AISI 316, ϕ 1.25, formando una malla que se encuentra entre dos capas armadas con tela de gasa y pulpa de fibra de celulosa. Se cuenta con la fuente de alimentación estabilizada en tensión y corriente 1A /40 V, la que debió ser fabricada por no existir en plaza una fuente con estas especificaciones. El electrolito seleccionado es el hidróxido de calcio. Los ensayos de realcalinización, se han iniciado, a destiempo de unos seis meses con respecto a lo programado, debido a que en el desarrollo del trabajo debimos implementar la técnica de envejecimiento artificial de las probetas, tarea no contemplada en la presentación, para aplicar posteriormente la realcalinización. Es debido a ello que al momento no se cuenta con suficientes valores de los ensayos de realcalinización para emitir una opinión sobre las bondades o no de la técnica.

Conclusiones parciales.

Referencias bibliográficas.

- 1- Cytel, "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado". Brasil, 1997
- 2- Solorza, B; Ocampo, I; Vuanello, O. "Corrosión Del Acero En Estructuras De Hormigón Armado En Zonas De Revenición" 15ª Reunión Técnica. Seminario De Hormigones Especiales. Santa Fe Argentina 2003
- 3- Feliú, S. y Andrade, C "Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras" Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) y el Instituto Eduardo Torraja de Ciencias de la Construcción, Madrid, España. 1989.
- 4- "Assesment of concrete and design procedures for up-grading (Redesign)" Boletín N° 162 CEB

En general el estado que presentan los tres edificios escolares inspeccionados, del Departamento Albardón, van de medianamente aceptables a condiciones inhabitables.

La escuela seleccionada presenta elementos estructurales con corrosión severa en el hierro de las armaduras, producto del alto contenido de sales, especialmente sulfatos y cloruros del medio circundante, y por carbonatación del hormigón. A esto se suma las condiciones climáticas imperantes, heladas en suelos, bruscas variaciones de temperatura, fuertes vientos y sismos, que someten al hormigón a fuertes sollicitaciones localizadas.

El sistema de drenaje del establecimiento no es adecuado para la zona, que presenta niveles freáticos muy elevados, con agua de revenición superficial por zonas, por lo que sería necesario construir sistemas de drenajes convenientes para minimizar las fluctuaciones de la napa freática y evitar concentraciones de sales.

Con la aplicación de la técnica de envejecimiento artificial a las probetas, se logró crear las condiciones del estado de deterioro de la armadura de las columnas seleccionadas. La importancia de este logro práctico, reside en que a nivel de laboratorio se podrá ensayar la restauración por realcalinización, en condiciones muy similares a las reales, favoreciendo la implementación de la técnica en las columnas de la escuela.

- 5- Campbell, D.H., R.D. Sturm y S.H. Kosmatka, "Detecting Carbonation", Concrete Technology Today, marzo de 1991.
- 6- ASTM C876 Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 1983.
- 7- Rodríguez J, Ortega L.M., García A.M. "Medida de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón, mediante un equipo desarrollado dentro del proyecto Eureka401" Hormigón y Acero 1993.
- 8- Gassa L.M., Martinic M.I.; Traversa L.P. "Corrosión de aceros de armadura" 15ª Reunión Técnica. Seminario De Hormigones Especiales. Santa Fe Argentina 2003

