



## LA REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO

Fritz Räu Chile\* e Isabel Díaz Tang\*

\* *Instituto de Corrosión y Protección (ICP-PUCP)*

### ANTECEDENTES

Aunque hace muchos años quedó establecido definitivamente el carácter electroquímico de la corrosión húmeda, la lucha contra la corrosión se sirve de los instrumentos electroquímicos con cautela.

Los trabajos clásicos de Evans con Hoar<sup>1</sup> y Blaha<sup>2</sup> sentaron las bases de la aplicación absoluta de las leyes de Faraday al fenómeno de la corrosión, considerándola como un flujo de corriente a través del metal que se corroe en presencia de una fase líquida que sirve de electrólito para cerrar el circuito eléctrico.

El fenómeno de la pasivación del acero y los factores que intervienen en su ruptura son temas conocidos también desde hace ya muchos años.

La realcalinización del concreto y la extracción de cloruros del sistema deteriorado de concreto armado tienen, sorprendentemente, muy pocos años de uso, a pesar de ser constituir soluciones obvias contra la destrucción de una estructura de concreto armado.

*Revisión*

Sorprendentemente decimos porque, desarrollos complejos tales como la protección catódica - aplicada por primera vez mediante corriente impresa por Cohen el año 1902 - son aplicados desde hace tiempo a estructuras enterradas en suelos. H. Geppert obtuvo ya en 1908 una patente para la protección de conducciones de agua y gas mediante corriente impresa. Sin embargo, recién a fines de los años setenta en los E.E.U.U. empezaron los primeros experimentos de la aplicación del principio de la protección catódica a la armadura embebida en concreto. En Alemania la técnica se instaló por primera vez en 1986.

Edeleanu<sup>3</sup> propuso su idea de la protección anódica utilizando el forzamiento del estado pasivo de aleaciones recién el año 1954, aunque la experimentó de forma práctica ya en el año 1950, evitando la corrosión de una bomba de Cr / Ni en ácido sulfúrico concentrado, conociendo perfectamente que el estado pasivo no se logra en presencia de considerables concentraciones de cloruros.

Una de las primeras publicaciones que se refieren a la pasivación de la armadura del concreto data del año 1959<sup>4</sup>. Nuevamente se estableció una correlación entre la corrosión de una armadura por destrucción de la capa pasiva y la eliminación de cloruros.

Desde hace solamente diez años se usan tímidamente los dos principios, realcalinización y extracción de cloruros, para restaurar estructuras dañadas de concreto armado.

## INTRODUCCIÓN

El concreto armado es un material compuesto que empezó a usarse industrialmente a principios de este siglo.

Sus excelentes propiedades físicas se deben a la combinación de la resistencia a la compresión y de la alta resistencia a la tracción que le confiere el acero embebido.

Además de las ventajas estructurales que resultan de la combinación de ambos materiales el concreto u hormigón actúa como barrera física y química de las armaduras respecto del medio ambiente circundante. Posee características químicas que ofrecen al acero una excelente protección contra la corrosión mediante su pasivación.

Sin embargo, a través del tiempo se comprobó que el hormigón armado también se deterioraba, tanto debido a procesos de degradación del propio concreto, cuanto a través de la corrosión de sus armaduras.

La información disponible coincide, en general, en que es fundamental el respeto de las reglas de buena práctica en la fabricación de un hormigón armado para alcanzar una prolongada vida en servicio del mismo.

Se sabe fehacientemente que estructuras de concreto armado que fueron construidas hace más de un siglo estaban en perfectas condiciones antes de su demolición por otras circunstancias.

## CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

El hormigón armado es un material compuesto constituido por una matriz (el hormigón) integrada por una mezcla de cemento, arena, agua y aditivos y por una armadura que normalmente es de acero dulce.

El cemento, componente fundamental del hormigón es una mezcla de minerales, principalmente silicatos y aluminatos de calcio.

Se fabrica calcinando una mezcla de calcariio (carbonato de calcio) y arcilla (polisilicato) a temperaturas muy por encima de 1000 °C. Su composición química resultante es de 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aproximadamente. El compuesto más importante del clínquer es el silicato de tricalcio (3 CaO· SiO<sub>2</sub>), el cual reacciona rápidamente con el agua dando productos de hidrólisis. Detrás viene el silicato de calcio 2 CaO· SiO<sub>2</sub>, que reacciona lentamente con el agua. De menor abundancia son aluminatos de tricalcio (3 CaO· Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y ferritos del tipo Ca<sub>2</sub>AlFeO<sub>5</sub>. Cuando fragua, en tiempo mínimo de 28 días, se endurece por hidratación de los distintos compuestos que lo constituyen. Durante este proceso (curado) ocurren, entre otros, los siguientes fenómenos:

- conformación de la red de silicatos que determina la resistencia del hormigón.
- segregación de hidróxido de calcio y álcali, los cuales llevan el valor pH de la fase acuosa a 12 y hasta casi 14.
- evaporación del agua en exceso, agregada durante el amasado para hacer trabajables las mezclas, lo cual genera una red de poros y canales que llegan hasta la superficie del concreto.

Estos procesos determinarán en gran medida el desempeño final del material, por lo cual la formulación, ejecución y curado del concreto deben ser cuidadosos. Demasiada agua durante el amasado causa una porosidad apreciable una vez curado el concreto.

Respecto al curado es necesario que el mortero cementante contenga el agua suficiente para alcanzar la resistencia esperada (calculada) por el entrelazado de los cristales. Para ello es conveniente mantener la humedad en el hormigón, mojando de manera adecuada la superficie, por lo menos durante los primeros días del curado. La red de poros y capilares que se establece por ley natural, o sea, inevitablemente, hace que el hormigón sea relativamente permeable a líquidos y gases.

El tamaño de estos poros varía desde unos pocos nanómetros hasta milímetros.

## FACTORES DAÑINOS PARA EL CONCRETO

Si el espesor del recubrimiento del concreto sobre la armadura no es suficiente (según normas o recomendaciones) no se puede esperar un buen desempeño del sistema reforzado.

El deterioro del hormigón puede provenir de los siguientes factores:

1. Fisuración provocada por esfuerzos mecánicos de diversas fuentes.
2. Erosión mecánica
3. Congelamiento durante el cual el agua retenida en la red de poros y canales se solidifica aumentando su volumen en un 9% y ejerciendo presión contra las paredes de los mismos hasta fisurar el hormigón.
4. Ataque ácido que disuelve o neutraliza las fases alcalinas del concreto, lo cual origina el desmoronamiento del concreto.
5. Ataque por sulfatos que reaccionan con componentes del hormigón formando productos muy voluminosos, los cuales ejercen el mismo efecto que el hielo (ver 3.)
6. Ataque biológico provocado por la acción química de los metabolitos de microorganismos.
7. Desalcalinización de las fases del cemento por efecto de un lavado continuo con agua, sobre todo con agua blanda.
8. Carbonatación por la acción del dióxido de carbono atmosférico. El  $\text{CO}_2$  del aire difunde dentro del hormigón a través de la red de cana-

les y poros y reacciona con las sustancias alcalinas del cemento originando un descenso del pH del concreto a valores por debajo de 9.

El frente de carbonatación avanza desde el exterior y cuando alcanza la armadura, la finísima película de pasivación que espontáneamente se forma en la superficie de la armadura protegiéndola muy eficazmente, pierde su estabilidad y el metal sufre un proceso de corrosión generalizada, como lo demuestra el Diagrama de Pourbaix correspondiente, que relaciona la posibilidad de corrosión del hierro con el valor pH del medio circundante.

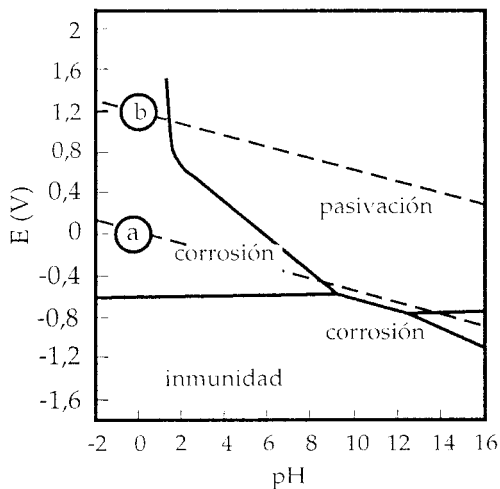


Fig. 1. Diagrama simplificado de Pourbaix para Fe a 25°C.

Las líneas a y b delimitan la existencia electroquímica del agua y sirven de referencia.

Si no hay variación de la alcalinidad el acero permanece en su estado pasivo todo el tiempo.

Una vez iniciada la corrosión los productos de la misma presionan fuertemente contra el concreto, porque el volumen que ocupan es seis mayor que aquél a partir del cual se formaron. Aparecen fisuras y descascaramientos.

La velocidad de avance del frente carbonatado depende de la calidad del concreto; es mínima cuando el mismo es preparado con una baja relación agua / cemento y es máxima cuando la humedad del aire oscila entre 50 y 70 %.

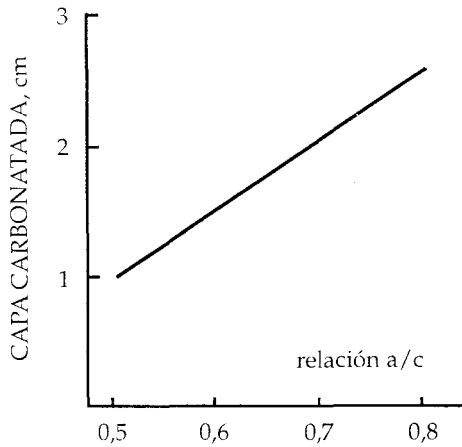


Fig. 2. El avance de la carbonatación hacia el interior en función de la relación agua/cemento usada para el amasado

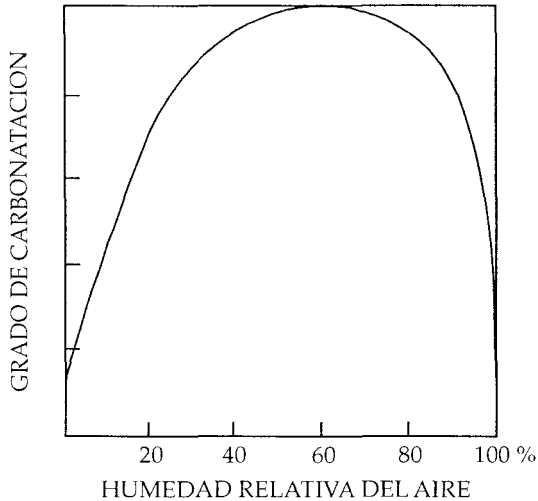
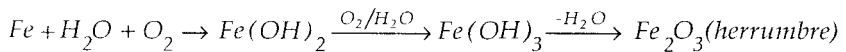


Fig. 3. La carbonatación es función de la humedad relativa del aire y es máxima para valores del 50 - 70 %

En forma genérica se realizan las siguientes reacciones al corroerse el acero:



La deducción a partir de esta experiencia es evidente: impidiendo la desalcalinización o restaurándola podemos confiar plenamente en una estructura de concreto armado.

## FACTORES QUE AFECTAN DIRECTAMENTE EL ACERO

### *Presencia de iones cloruro*

Después de la carbonatación es la presencia de iones cloruro el factor determinante de posibles fallas en el sistema compuesto que forma el concreto armado y por eso merece también un trato un poco extensivo.

Ya se vio que la alcalinidad del hormigón produce la pasivación del acero y que son justamente los cloruros los que sensibilizan el acero a pesar del ambiente básico que le permite entrar en su estado activo. Pero hay una diferencia muy marcada entre la corrosión iniciada por la carbonatación y aquella fomentada por los cloruros. La corrosión generalizada cede el paso a otra en forma de picaduras, lo cual es gravísimo. La picadura, como lo expresa su nombre, perfora la barra del hierro y la debilita severamente en cuanto a su resistencia física, finalizando el concreto armado en fisuras y derrumbe.

Un estudio de Hausmann<sup>5</sup> establece la relación de actividades entre cloruros e hidroxilos en 0,6 como límite en la estimación de riesgo. Si la relación es mayor entonces existe un riesgo real de que comience la corrosión en la armadura.

La introducción de los indeseables cloruros en el hormigón puede ocurrir en diversas circunstancias; durante su manufactura como contaminante del cemento, con el agua de amasado, si se usan aguas salobres o hasta agua del mar, como aditivo de fraguado, con los áridos o pueden finalmente penetrar desde el exterior, cuando la estructura está ya en servicio a través de la red de poros.

De manera adicional mencionamos que en caso de un incendio de PVC, por ejemplo, las paredes se impregnan de HCl provenientes de los humos, lo cual también puede ser una fuente de cloruros.

## REHABILITACIÓN DEL CONCRETO ARMADO

Después de haber expuesto las diversas posibles formas de deterioro del hormigón armado podemos pasar a las alternativas para ser rehabilitada.

Basándonos en el Diagrama de Pourbaix para el hierro la solución consiste en restaurar el ambiente básico natural del cemento en el contorno de la armadura, si estamos seguros de la ausencia de cloruros.

### *Realcalinización electroquímica*

La técnica consiste en hacer pasar una corriente continua a través del hormigón hacia la armadura mediante un ánodo externamente fijado, el cual ha sido montado sobre la superficie del concreto. Para facilitar la penetración de la corriente se usa un electrólito, en nuestro caso carbonato de sodio, con la ventaja de que esta sal es de por sí también básica al mezclarla con agua. Este electrólito se coloca en forma de pasta sobre el exterior del concreto. La armadura del concreto sirve de cátodo.

Durante el tratamiento electroquímico, cuyas especificaciones son  $0,8 - 2$  A/m<sup>2</sup> como densidad de corriente y 3 - 4 días como duración, tienen lugar los siguientes fenómenos:

- Migración de iones
- Electrólisis
- Electro - ósmosis (migración de un líquido a través de un diafragma bajo los efectos de un campo eléctrico fuerte)

Iones oxhidrilo se generan en el cátodo debido a la electrólisis del agua, desapareciendo los protones por descarga en forma de hidrógeno elemental. El electrólito (carbonato de sodio) penetra desde el exterior en los poros del concreto, previniendo de esta forma un futuro descenso del pH que podría causar el reinicio de la corrosión.

Después de haber realizado el ensayo con distintas densidades de corriente y variando los tiempos de tratamiento existen ciertas experiencias sobre los valores pH exigidos en la práctica. Siempre se puede controlar midiendo la alcalinidad con fenolftaleína (solución alcohólica al 1%); de esta forma obtenemos una información gruesa sobre el grado de



la realcalinización. Sin embargo, la fenolftaleína muestra sólo a partir de un pH 9 una coloración rosa, pero no indica si estamos ya en una región más básica, por ejemplo. Una información más precisa la conseguimos utilizando como indicador la timolftaleína (un metil-terbutil-derivado de la fenolftaleína) que pasa a partir de un valor pH 10,5 a mostrar una coloración púrpura. Usando los dos indicadores se puede emitir una opinión bastante más fundamentada.

Como se puede esperar, la realcalinización es, en el inicio de la operación, mayor en la región superficial que a mayor profundidad. El  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  está penetrando evidentemente desde la superficie por electro-ósmosis y difusión, hasta llegar a una profundidad que sorprendentemente en la práctica no depende de la densidad de corriente aplicada.

Por el contrario, el influjo de la corriente sobre el valor pH alcanzado, alrededor de las barras y la extensión de esta capa realcalinizada, es muy pronunciado.

Como el test con la fenolftaleína sólo nos da un valor límite, por encima de nueve o no, y no nos da ningún valor sobre la existencia de pasivación, se han realizado los ensayos correspondientes aplicando una polarización anódica, los cuales proporcionan información más completa acerca del estado de pasivación alcanzado.

Mediante análisis cuantitativo se siguió el desarrollo de la realcalinización determinando el contenido en sodio y del valor pH en los poros de muestras extraídas a diversas profundidades y pulverizadas, antes y después del ensayo tomado de Jungwirth<sup>5</sup>.

Distribución del valor pH según la profundidad

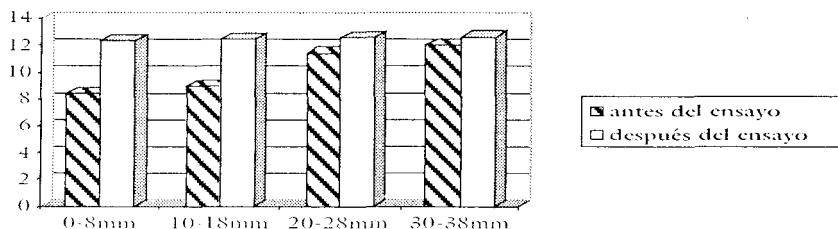


Fig. 4. Distribución del valor pH según la profundidad del testigo extraído del concreto

Es evidente que un valor pH 12 conseguido después de haber aplicado el tratamiento electroquímico es una garantía para la repasivación de la armadura, según el diagrama de Pourbaix.

Todavía no está resuelto del todo el problema de la duración de la repasivación, ya que aún faltan datos experimentales. Tampoco ha sido estudiado a fondo si es posible repasivar estructuras con una corrosión bastante avanzada, aunque se supone que siempre se puede repasivar mientras haya suficiente diámetro de la barra para garantizar los valores mecánicos de resistencia.

### *Realcalinizar sin aplicación de corriente*

Se basa en el hecho de la alta movilidad de los iones  $\text{OH}^-$ , en virtud de la cual son capaces de difundir fácilmente desde zonas de elevada concentración a otras de menor valor. Su tamaño pequeño y el mecanismo de poder formar puentes de hidrógeno favorecen la difusión considerablemente. La velocidad de difusión del ion hidroxilo es aproximadamente tres veces mayor que la del ion cloruro. Así, en un hormigón carbonatado se procede a un recrecido mediante una preparación con mortero rico en cemento muy alcalino; se puede realcalinizar el interior del concreto a una profundidad de hasta 1-2 cm. Para ello es necesario mantener húmeda esta capa de recrecido y así favorecer la difusión de los iones  $\text{OH}^-$  desde el exterior al interior.

### *Campos de aplicación*

Naturalmente esta complicada técnica no se emplea en casos cotidianos en los cuales se procede, por ser más económica, a una simple sustitución de concreto. Situaciones específicas<sup>6,7,8</sup> serían:

- fachadas de concreto que no pueden (o no deben) ser removidas
- silos o torres de refrigeración
- estructuras de hormigón que no soportan un peso adicional (por la reparación convencional de un recubrimiento adicional) o donde es imposible colocarlo.

## **EXTRACCIÓN DE CLORUROS**

Mientras que la corrosión que resulta a causa del concreto carbonatado es principalmente provocada por la mala calidad del hor-

migón o por insuficiente espesor de recubrimiento sobre la armadura, la corrosión inducida por los iones cloruro tiene su origen adicionalmente en circunstancias medioambientales. Ya se ha explicado que los cloruros destruyen localmente la capa pasiva de muy poco espesor que protege normalmente el acero y se inicia la corrosión en presencia de la humedad y oxígeno.

Uno podría pensar en reparar localmente la zona más afectada por la corrosión sustituyendo toda esta zona. Pero el efecto es lamentablemente sólo temporal, porque los cloruros existentes en las regiones adyacentes suministran por difusión más cloruros al centro de ataque y se repite el proceso anterior.

La extracción, como lo expresa su nombre, elimina los cloruros (o al menos reduce la concentración a niveles inofensivos) y pertenece a los procedimientos no destructivos.

La remoción de los cloruros se basa en la migración forzada de los mismos.

De forma similar a la realcalinización electroquímica se conecta la armadura al polo negativo (cátodo), mientras que el positivo (ánodo), que está dentro de un electrólito situado en la superficie del concreto, se une al positivo de un rectificador.

Dentro del campo eléctrico los iones cloruro se mueven a lo largo de las líneas de corriente, dejando la armadura cargada negativamente y acercándose al ánodo fuera del hormigón. Simultáneamente se generan iones hidroxilo alrededor de las barras por electrólisis. Este efecto permite la repasivación del acero al mismo tiempo que la remoción de los iones cloruro hasta un valor límite (según Hausmann).

Esta remoción electroquímica de los cloruros ha sido exitosamente aplicada en diferentes estructuras de concreto armado. Existen diversas publicaciones al respecto <sup>9,10,11</sup>.

El método de la extracción es semejante al de la realcalinización, con sólo dos detalles diferentes: se trabaja con altas densidades de corriente, hasta con 20 amperios por m<sup>2</sup>, y el tiempo de la aplicación es de hasta diez semanas. Tiene que ser así, porque son los iones mismos los que

transportan la corriente eléctrica. La remoción de los cloruros es naturalmente proporcional al flujo de corriente.

A medida que crece la densidad de corriente aumenta también el efecto de un calentamiento por la resistencia óhmica y el concreto aumenta su temperatura hasta a 100 °C lo cual causa una tensión térmica al hormigón que debe ser evitado a toda costa. Adicionalmente el hidrógeno que se forma alrededor de las barras podría debilitar las fuerzas de unión entre acero y concreto. Por las dos razones es preferible trabajar con densidades menores de corriente y más tiempo que al revés.

El electrólito auxiliar que recibe los cloruros se remueve con un chorro de agua y finaliza la operación.

Por supuesto que se ha controlado la eficiencia del método mediante análisis de cloruros antes y después del experimento y se han obtenido las curvas mostradas en la Fig. 5.

Como se puede apreciar el contenido de cloruros desciende más que el 50% después de una aplicación de ocho semanas independientemente de la profundidad.

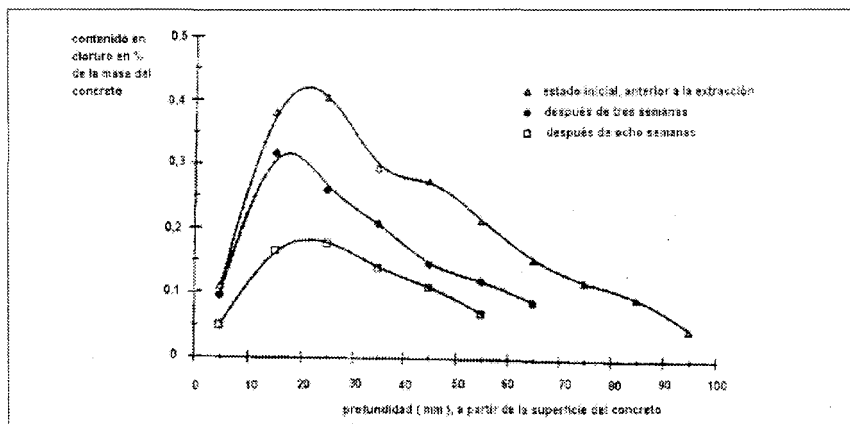


Fig. 5. Perfil de la concentración de cloruros antes y después de la extracción.

## *Campos de aplicación*

Esta técnica de aplicación está restringida a zonas con una concentración de cloruros previsible, como en:

- Carreteras de concreto a lo largo de la costa
- Estructuras de concreto en plantas químicas con emanaciones cloruríferas
- Estructuras de concreto contaminadas con sales de deshielo (puentes de autopistas)
- Contaminación del concreto debida a un incendio de material orgánico clorurífero (por ejemplo, PVC ).

## *Protección catódica*

Sabiendo que la corrosión húmeda se rige por la salida de iones ferrosos del acero el principio de la protección catódica consiste en aplicar un potencial negativo al metal de tal forma que es imposible para los iones salir de la estructura reticular del metal.

Como se mencionó en los antecedentes, la protección catódica es ahora una ciencia técnicamente dominada por los años transcurridos y no requiere instrumentos adicionales para su aplicación a la armadura del hormigón.

Como efectos laterales aparecen dentro del sistema del concreto los mismos fenómenos que hemos discutido al explicar la realcalinización y la extracción de cloruros.

El potencial negativo de la armadura alcaliniza el rededor de la barra y aleja posibles cloruros presentes del hierro, aunque ése no era el objetivo principal de la protección catódica, que sólo se ciene a que el hierro no pueda oxidarse por encontrarse debajo de su potencial de oxidación.

Las densidades de corriente en el caso de la protección catódica son sensiblemente más pequeñas que en la realcalinización y en la extracción de cloruros ( $3 - 20 \text{ mA} / \text{m}^2$ ) y su aplicación es permanente.

Al colocar la armadura a este potencial el proceso dura aproximadamente 100 horas hasta conseguir el estado de seguridad, o sea, que el hierro

se encuentre en su estado de inmunidad (véase el Diagrama de Pourbaix, Fig. 1)

## CONCLUSIONES

La selección de uno de los tres métodos presentados para la reparación de daños en la estructura de la armadura de un concreto depende del grado y de la causa del daño y adicionalmente de la futura vida útil de la edificación.

Está claro que la reparación local por simple sustitución de un daño producido por cloruros o carbonatación en un principio es más barato que el uso de uno de los tres métodos presentados, sin embargo, se trata de una solución temporaria. Cada caso debe ser estudiado por separado, tomando en cuenta, sobre todo, la vida útil restante de la edificación.

Existen estudios económicos detallados en algunos países, pero sus resultados no son transferibles.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) U. R. Evans, T. P. Hoar, *Proc. Roy. Soc. (A)* **137** 343 ( 1932 )
- 2) F. Blaha, *Nature (London)*, **166** 607 ( 1950 )
- 3) C. Edeleanu, *Metallurgia*, **50** 113 ( 1954 )
- 4) A. Bäumel y H.-J. Engell, *Arch. Eisenhüttenw.* **30** 417 ( 1959 )
- 5) D. A. Hausmann, *Mat. Prot.* **6** ( 11 ) 19 ( 1967 ).
- 6) D. Jungwirth, P. Grübl y A. Windisch *Beton- und Stahlbetonbau* **86**. H. 8 190/192. (1991 )
- 7) W. K. Green y K. W. J. Treadaway, COMETT Course, " The Corrosion of Steel in Concrete ", 17. – 19.2.RWTH Aachen ( 1992 ).
- 8) C. Andrade, *Proc. Int. Conf. On Structural Improvement through Corrosion Protection of Reinforced Concrete*, 2 – 3 June 1992. E 7190 London.
- 9) B. Isecke y J. Mietz, *Proc. EUROCORR 91*, Budapest, Vol. II, 732 738, 1991
- 10) J. E. Slater, D. R. Lankard y P. J. Moreland, *Mater. Perf.*, **15** ( 11 ), 1 – 26, (1976).
- 11) I. Uherkovich, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, SIA-Dokumentation D 065, Korrosion und Korrosionsschutz, **5**, 71 – 76, ( 1990 )

Referencia general:

Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de la Armadura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid, España); Coordinadores: S. Feliú y C. Andrade (1989).

