

## SECCION HORMIGON

# Corrosión de las armaduras en el hormigón armado

Por el Prof. Ing. PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE

### AGRADECIMIENTOS

*Al Prof. Dr. Francisco Romeu Landi por las enseñanzas que proporcionó en el curso de post-graduados de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo «Diagnóstico del agrietamiento de los edificios», al cual tuve la oportunidad de presentar un seminario, embrión de este trabajo.*

*Al Ing. Stephan Woly nec del Laboratorio de Corrosión del IPT y al Químico Roberto Godinho, de la Gerencia de la Calidad del Aire de la CETESA, por la buena voluntad que en conversaciones informales me suministraron subsidios indispensables para el desarrollo de este trabajo.*

*A los colegas del IPT, María Alba Cincotto y Francisco Di Giorgi, por las valiosas experiencias transmitidas en los trabajos conjuntos.*

### INTRODUCCION

Son varias las veces en que un profesional de la ingeniería civil se ve ante un problema de corrosión de armaduras en las estructuras de hormigón armado.

Puesto que las variables que intervienen en el proceso tienen su origen en diferentes fuentes, en muchos casos no es fácil ni rápido explicar el porqué de una estructura corroída, cuando muchas otras, en todo semejantes y similares, no presentaron dicho problema.

En general, la justificación más cómoda es atribuir el hecho a la carencia de un recubrimiento adecuado del hormigón, tomándose por referencia las recomendaciones de normas y reglamentos oficiales. En el caso del Brasil, en general, se recurre a las recomendaciones de la *NB-1- Proyecto y Ejecución de Obras de Hormigón Armado* publicada en 1978 por la *Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT)*.

Estas recomendaciones son, no obstante, de carácter general y no deben tomarse como únicas ni como las mejores en todas las situaciones. Ello podría, por ejemplo, invalidar algunos procesos constructivos que tan sólo son posibles, técnica y comercialmente, con recubrimientos inferiores a los que en la actualidad recomienda *NB-1/78*.

El recubrimiento de hormigón tiene la finalidad de proteger físicamente la armadura y propiciar un medio alcalino elevado que evite la corrosión por pasivación del acero. Por tanto, esta protección depende esencialmente de las características y propiedades intrínsecas del hormigón. A diferentes hormigones debe corresponder recubrimientos distintos manteniendo un mismo nivel de protección.

De otra parte el medio ambiente en el cual se inserta la estructura y que, en última instancia, es el agente promotor de la eventual corrosión, también debe ser considerado. Es de esperar que regiones con atmósfera seca y «pura» no sean tan agresivas a la estructura como lo son las atmósferas húmedas y muy contaminadas por gases ácidos y hollín.

¿Se puede mantener una misma exigencia de recubrimiento sin considerar estos factores regionales? Aumentar el recubrimiento significa, en general, aumentar las dimensiones de las piezas o mantener las dimensiones aumentando las secciones del acero, o sea, aumentar el coste de la estructura.

También la microrregión donde se asienta el componente estructural y la propia naturaleza del componente, debiendo tomarse en cuenta si es losa, viga o pilar, y paredes. Las losas en ambientes húmedos pueden sufrir más el fenómeno de la condensación que los elementos verticales. Del mismo modo, pilares semi-enterrados podrán corroerse más rápidamente que pilares en ambientes interiores y secos.

Estas consideraciones, pues, tienen la intención de señalar la importancia de tener en cuenta dichos factores y no sólo del recubrimiento, ya que en el problema de la protección de las armaduras de hormigón arma-

do, se puede llegar a sugerir algunos aspectos principales de ingeniería preventiva e ingeniería curativa (plagiando a la medicina preventiva y curativa). A tal fin, se empieza analizando de modo simplificado el mecanismo de la corrosión y algunas propiedades básicas de los hormigones, previendo las herramientas necesarias para la interpretación de los fenómenos y la comprensión de la patología de las estructuras de hormigón armado.

## 1. MECANISMO DE LA CORROSION

### 1.1. Generalidades

La corrosión se puede definir como la interacción destructiva de un material por reacción química o electroquímica con el medio ambiente.

Básicamente son dos los procesos principales de la corrosión que pueden sufrir las armaduras de acero para hormigón armado: la oxidación y la corrosión propiamente dicha.

Por *oxidación* se entiende el ataque provocado por una reacción gas-metal, con formación de una película de óxido. Este tipo de corrosión es muy lento a la temperatura ambiente y no provoca un deterioro substancial de las superficies metálicas, salvo el caso de que existan gases extremadamente agresivos en la atmósfera (1). Es el fenómeno que ocurre preponderantemente durante la fabricación de alambres y barras de acero. A la salida del tren de laminación, con temperaturas del orden de 900 °C, el acero experimenta una fuerte reacción de oxidación con el aire ambiente. Esta película, que se forma sobre la superficie de las barras, es compacta, uniforme y poco permeable, pudiendo hasta servir de protección relativa de las armaduras contra la corrosión húmeda posterior, de naturaleza preponderantemente electroquímica. Cuando el acero todavía se somete a un trefilado en frío, para mejorar sus propiedades, esta película, denominada *calamina del laminado*, tiene que removerse por métodos físicos (chorro de arena o de granalla) o químicos, del tipo decapado con ácidos. La película inicial se substituye entonces por otra de fosfato de zinc o de hidróxido cálcico, que se utilizan como lubricantes del proceso, pudiendo ser, a semejanza de la primera, débiles protectores del acero contra la corrosión húmeda. No siendo éste el fenómeno principal de la corrosión en las estructuras convencionales no profundizaremos en el tema en el presente trabajo.

Por *corrosión* propiamente dicha del acero en el hormigón armado se entiende el ataque de naturaleza electroquímica que se da en un medio acuoso. Ocurre cuando se forma una película de electrólito sobre la super-

ficie de los alambres o barras de acero. Esta película es causada por la presencia de humedad, lo cual ocurre siempre en el hormigón, salvo en situaciones especiales o muy raras, tales como en el interior de estufas o bajo la acción de temperaturas elevadas ( $> 80^{\circ}\text{C}$ ) a ambientes de humedad relativa baja (H.R.  $< 50\%$ ). Este tipo de corrosión también es responsable del ataque que sufren las armaduras antes de su empleo, cuando todavía están almacenadas en el taller. Es el tipo de corrosión que el ingeniero civil debe saber y tener preocupación por ella. Es mejor prevenirla que intentar remediarla después de la iniciación del proceso.

A pesar de que en un proceso corrosivo siempre intervienen reacciones químicas y cristalizaciones de naturaleza compleja, presentaremos seguidamente un modelo simplificado del fenómeno de ataque electroquímico que sirve para explicar la mayor parte de los problemas y facilita herramientas básicas para su prevención.

## 1.2. Corrosión en medio acuoso

El mecanismo de la corrosión del acero en el hormigón es electroquímico, tal como sucede en la mayoría de las reacciones corrosivas en presencia de agua o en ambiente húmedo (H.R.  $\geq 60\%$ ).

Esta corrosión conduce a la formación de óxidos/hidróxidos de hierro, productos rojizos, pulverulentos y porosos, denominados herrumbre u óxido, y tan sólo es posible si concurren las siguientes condiciones (2):

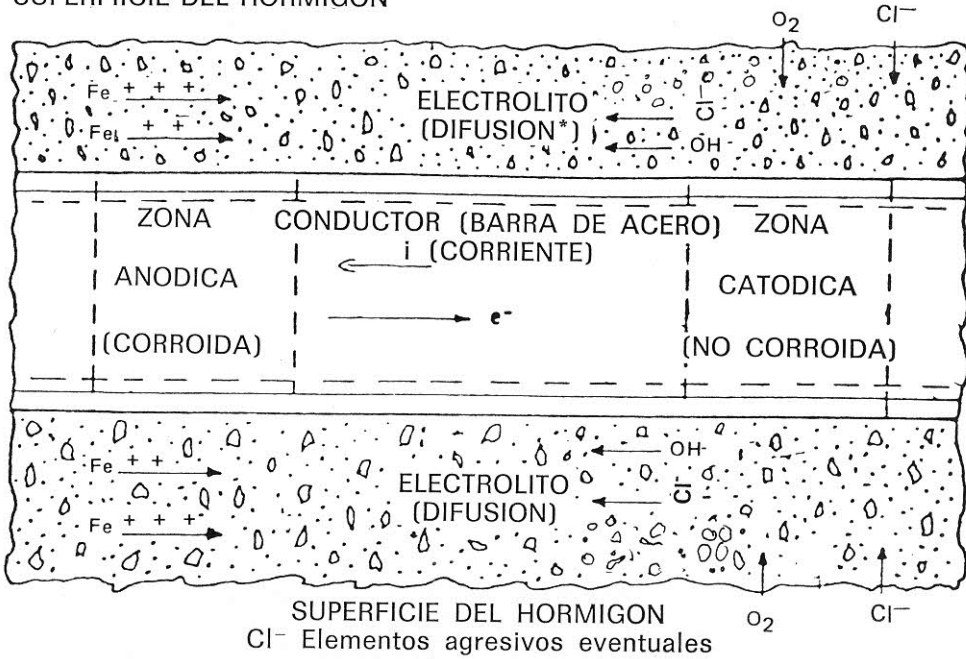
- debe existir un electrólito
- debe existir una diferencia de potencial
- debe existir oxígeno
- pueden existir elementos corrosivos.

La formación de una célula de corrosión, o pila, puede darse como indica la figura 1 (3) que describe gráficamente el fenómeno. Como en cualquier otra célula, hay un ánodo, un cátodo, un conductor metálico y un electrólito. Cualquier diferencia de potencial entre las zonas anódicas y catódicas provoca la aparición de una corriente eléctrica. Dependiente de la intensidad de esta corriente y del acceso de oxígeno podrá haber o no corrosión.

### 1.2.1. Debe existir un electrólito

El agua está presente en el hormigón y generalmente en cantidades suficientes para actuar como electrólito, principalmente en las regiones

SUPERFICIE DEL HORMIGON



(\*) Difusión = proceso espontáneo de transporte de masa en un sistema físico-químico por efecto de gradientes de concentración.

Figura 1. — Célula de corrosión en el hormigón armado.

de la obra expuestas a la intemperie. Además de ella, ciertos productos de hidratación, como por ejemplo la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , hidróxido cálcico), que es soluble en agua, también forma, en los poros y capilares, una solución saturada que constituye un buen electrólito.

Como referencia tenemos los siguientes tenores de humedad en equilibrio (\*\*) en el hormigón normal a  $25^\circ\text{C}$  en relación con la humedad relativa del ambiente:

- para H.R. = 40 % → tenor de humedad de equilibrio = 3 %
- para H.R. = 65 % → tenor de humedad de equilibrio = 4 %
- para H.R. = 95 % → tenor de humedad de equilibrio = 8 %

(\*\*) La humedad de equilibrio se puede calcular moliendo una cierta porción de hormigón, dejándola secar en estufa ventilada a  $105^\circ\text{C}$  hasta peso constante. La humedad en equilibrio, expresada en tanto por ciento, resulta de la diferencia de masa antes de la molienda y después de la molienda y secado.

Como se ve, siempre hay agua en el hormigón y, en consecuencia, siempre puede existir un electrólito.

### 1.2.2. Debe existir una diferencia de potencial

Cuando se sumerge el acero en una solución, parte de los átomos de hierro tienden a pasar a la solución, para lo cual se transforma en cationes hierro ( $\text{Fe}^{++}$ ) con carga eléctrica positiva, dejando la armadura con carga negativa, creándose lo que se conoce como potencial de equilibrio o reversible. Este hecho, por sí solo, no genera una fuerza electromotriz, pero en presencia de reactivos capaces de sufrir una reducción, o sea, capaces de combinarse con el electrón liberado en la reacción que formó el ion ferroso, puede formar una pila o célula de corrosión electroquímica.

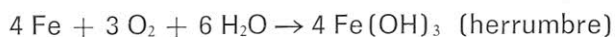
Cualquier diferencia de potencial que se produzca entre dos puntos de la barra, por diferencia de humedad, aireación, concentración salina, tensión en el hormigón o en el acero, etc., es capaz de desencadenar pilas o cadenas de pilas conectadas en serie. En la mayor parte de las veces se forman micropilas que pueden, inclusive, alternar la posición de los polos, ocasionando una *corrosión generalizada* (4).

Cuando los ánodos son de dimensiones reducidas y estables, pueden producir la llamada *corrosión localizada*, intensa y peligrosa.

La corrosión localizada es mucho más rara en hormigón armado, siendo más frecuente en alambres y cables para hormigón pretensado. En algunos casos se puede llamar *corrosión bajo tensión*, cuya principal característica es romper sin avisar, o sea, una rotura frágil en una sección definida, sin que haya previa deformación de la estructura que alerte y permita corregir el problema a tiempo. Fue lo que sucedió en el Puente del Guáiba-RS, según refirió Wolynes (5).

### 1.2.3. Debe existir oxígeno

Es necesario que haya oxígeno para la formación de herrumbre (óxido/hidróxido de hierro), además del electrólito representado por la humedad y el hidróxido cálcico, sin lo cual no es posible la reacción siguiente:

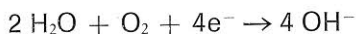


En realidad las reacciones son más complejas y el producto de la corrosión, denominado herrumbre, no es siempre  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , sino antes una gama de óxidos e hidróxidos resultantes de las siguientes etapas de la corrosión (6):

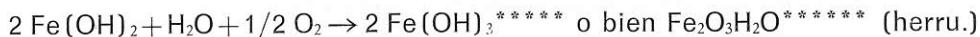
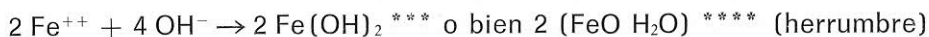
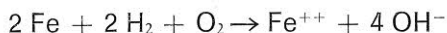
- a) en las zonas anódicas el hierro pierde electrones, ocasionando la disolución del metal: (oxidación) \*



- b) en las zonas catódicas, en medios neutros y aireados ocurre: (reducción) \*\*



- c) acarreado las siguientes reacciones de corrosión con formación de herrumbre:

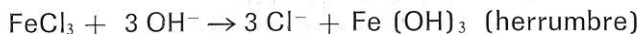


#### 1.2.4. Pueden existir elementos agresivos

La corrosión puede ser acelerada por elementos agresivos contenidos o absorbidos por el hormigón. Entre ellos se pueden señalar los iones sulfuro (S<sup>-</sup>), cloruro (Cl<sup>-</sup>), el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), los nitritos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), el sulfhídrico (SH<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), los óxidos de azufre (SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>), hollín, etc.

Los elementos agresivos actúan como catalizadores según se ejemplifica seguidamente:

ion cloruro (Cl<sup>-</sup>): Fe<sup>+++</sup> + 3 Cl<sup>-</sup> → FeCl<sub>3</sub> y, por *hidrólisis* Φ\*\*\*\*\*



y la reacción continua sin consumirse el ion cloruro. Por tanto, pequeñas cantidades de cloruros pueden ser responsables de grandes corrosiones (2).

(\*) **Oxidación** = proceso en el que se da un aumento de cargas positivas de un ion, proceso de combinación de una substancia con el oxígeno, o sea una pérdida de electrones.

(\*\*) **Reducción** = proceso en el que se da la disminución de cargas positivas de un ion, una ganancia de electrones.

(\*\*\*) Hidróxido ferroso, débilmente soluble e incoloro.

(\*\*\*\*) Oxido ferroso hidratado (expansivo).

(\*\*\*\*\*) Hidróxido férrico (expansivo).

(\*\*\*\*\*) Oxido férrico hidratado-goetita o lepidocrocita (expansivo).

(\*\*\*\*\*) Φ **Hidrólisis** = reacción de fijación de iones hidroxilo e hidrógeno en un compuesto, en presencia de agua.



A partir del instante en que la armadura se expone a la atmósfera, por desmochadura y fisuración del hormigón, puede también sufrir la acción del ion sulfato, según se expone a continuación:



continuando la reacción sin consumir el ion sulfato, siendo las formas  $\text{FeSO}_4$  y  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  intermediarias e inestables (7).

En principio, cualquier sustancia ácida (gases, líquidos y sólidos) que penetre en la estructura porosa del hormigón o vaya a depositarse en la superficie de las armaduras total o parcialmente expuestas, contribuye al aumento del riesgo de corrosión. Cuando se trata de una armadura ya corroida, estas sustancias pueden acelerar el proceso de corrosión.

## 2. PAPEL DE RECUBRIMIENTO DE HORMIGON

Una de las grandes ventajas del hormigón armado es que él mismo puede, por su naturaleza y desde que esté bien ejecutado, proteger la armadura de la corrosión. Esta protección se basa en impedir la formación de células electroquímicas, por dos modos:

- protección física
- protección química.

### 2.1. Protección física

Un buen cubrimiento de las armaduras, con un hormigón de elevada compacidad, sin «nidos», con tenor de mortero adecuado y homogéneo, garantiza por impermeabilidad del acero el ataque de agentes agresivos externos. Estos agentes pueden hallarse en la atmósfera, en aguas residuales, aguas de mar, aguas industriales, deyecciones orgánicas, etc. Tampoco debe contener agentes o elementos agresivos internos, eventualmente utilizados en la preparación del hormigón con absoluto desconocimiento por parte de los responsables, so pena de perder o ni siquiera alcanzar dicha capacidad física de protección contra la acción del medio ambiente.

### 2.2. Protección química

En ambiente altamente alcalino se forma una capa o película protectora de carácter pasivo. La alcalinidad del hormigón proviene de las reaccio-



POTENCIAL DE ELECTRODO (RELATIVO AL ELECTRODO DE HIDROGENO DE REFERENCIA)  
 POTENCIAL EN VOLTIOS

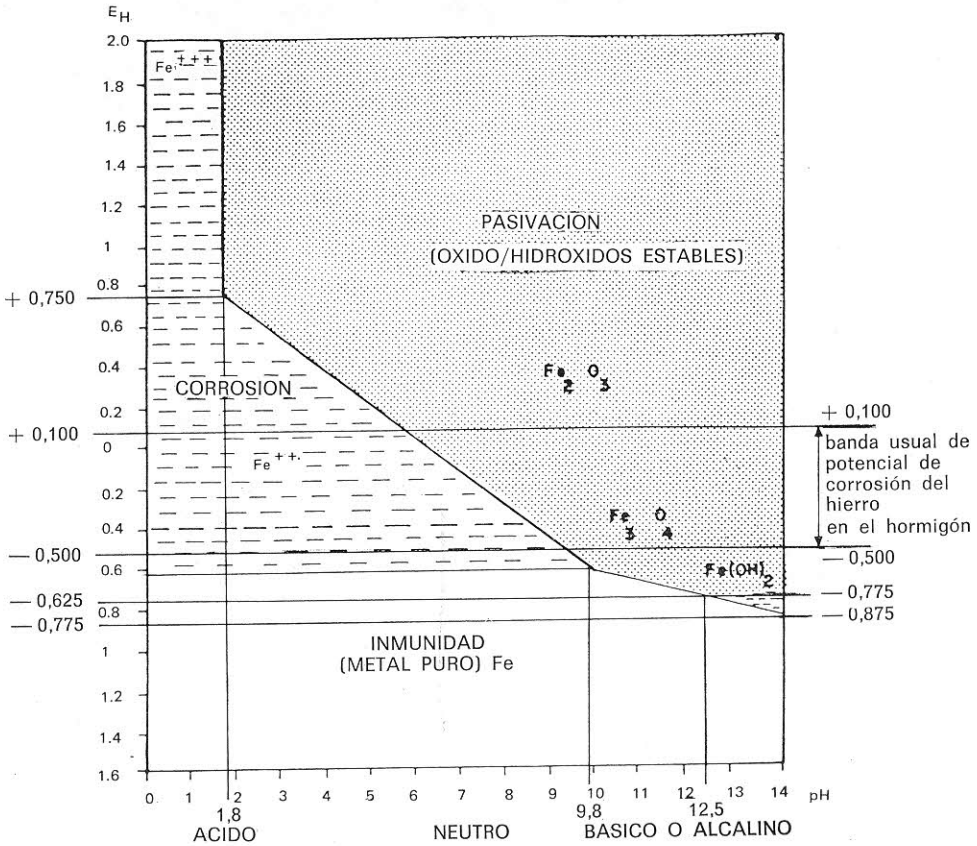


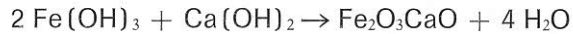
Figura 2. — Diagrama de Pourbaix (Diagrama de equilibrio termodinámico). Potencial × pH para el sistema Fe — HO a 25 ° C delimitando las zonas de corrosión, pasivación e inmunidad en función de la diferencia de potencial en la célula de corrosión (Pourbaix, 1961) (9).

nes de hidratación de los silicatos de calcio (C<sub>3</sub>S y C<sub>2</sub>S) en las cuales se libera una cierta cantidad de Ca(OH)<sub>2</sub> que puede alcanzar hasta cerca de 25 % de la masa total de compuestos hidratados presentes en la pasta (8). Esta base fuerte, Ca(OH)<sub>2</sub>, se disuelve en agua y rellena los poros y capilares del hormigón confiriéndole un carácter alcalino. El hidróxido de calcio tiene un pH del orden del 12,6 (a la temperatura normal ambiente) lo cual proporciona una pasivación del acero según se representa en la figura 2 (9).

El potencial de corrosión del hierro puede variar de (+0,1) a (-0,4) V según la permeabilidad y el tenor de cloruros, Cl<sup>-</sup>, en el hormigón para temperaturas de 25 ° C (10).

Por lo tanto la función del cubrimiento de hormigón es proteger esta capa o película protectora de la armadura contra daños mecánicos al propio tiempo que mantiene su estabilidad.

Puede decirse que la película pasivante de ferrato cálcico, resultante de la combinación de la herrumbre superficial  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  con el hidróxido cálcico  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , según la reacción:



Consecuentemente, la protección del acero en el hormigón puede asegurarse por (11):

- a) elevación de su potencial de equilibrio en cualquier medio de  $\text{pH} > 2$  de modo que se sitúe en la región de pasivación (inhibidores anódicos);
- b) reducción de su potencial de equilibrio con el fin de pasar al dominio de la inmunidad (protección catódica), y
- c) mantener el medio con  $\text{pH}$  por encima de 10 y por debajo de 13, que es el medio natural proporcionado por el hormigón, desde que éste sea homogéneo y compacto.

### 3. SINTOMATOLOGIA

En las zonas donde el hormigón no es apropiado o no recubre, o recubre deficientemente, a la armadura, la corrosión se vuelve progresiva con la consiguiente formación de oxi-hidróxidos de hierro que alcanzan volúmenes de 3 a 10 veces superiores al volumen primitivo del acero de la armadura, pudiendo ocasionar presiones de expansión superiores a 15 MPa ( $\approx 150 \text{ kp/cm}^2$ ) (12).

Tales tensiones provocan inicialmente la fisuración del hormigón en una dirección paralela a la armadura corroída, favoreciendo la carbonatación y la penetración del  $\text{CO}_2$  y de agentes agresivos, pudiendo provocar el paso siguiente: la desmochadura del hormigón (Foto 1).

Esta fisuración acompaña, en general, la dirección de la armadura principal y más raramente la dirección de los estribos, a no ser que estén en la superficie. Debe considerarse que los estribos están, generalmente, en dirección perpendicular al mayor esfuerzo de compresión lo cual puede impedir la aparición de fisuras profundas en el elemento de hormigón. Los estribos en la región central de una viga pueden agrietar al hormigón en su cara inferior, pero difícilmente lo conseguirán en la zona próxima

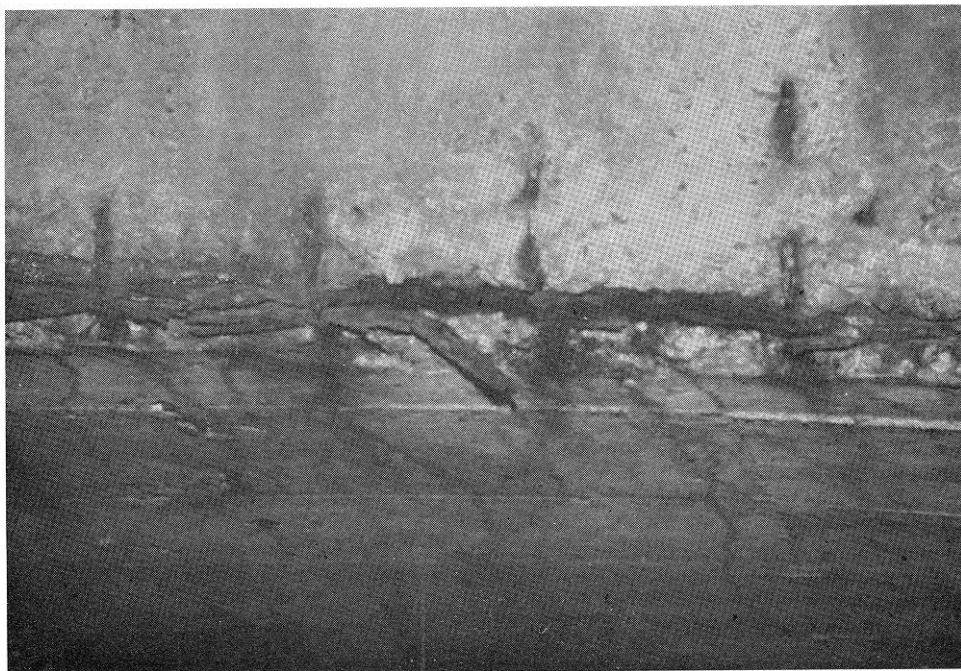


Foto 1. — Desmochadura del hormigón debida a las fuerzas de expansión de los productos de corrosión.

a los apoyos (foto 2). Normalmente lo que se observa en estribos es la desmochadura directa del hormigón, sin fisuras iniciales.

En la mayor parte de los casos aparecen manchas castaño-rojizas en la superficie del hormigón y bordes de las fisuras completando el cuadro patológico, según se presenta en la figura 3 (13, 14) considerando la dificultad natural que impide el cubrimiento adecuado de las armaduras, principalmente en las losas —ya que cubren grandes áreas, son delgadas y durante el hormigonado constituyen una «pista» para el movimiento del personal y de los equipos—, siendo en estos componentes estructurales donde, en general, se nota con mayor rapidez el comienzo de la corrosión \*. En pilares y vigas el primer indicio, generalmente, no es dado en la armadura principal, sino más bien por los estribos que, a veces, se apoyan directamente sobre los moldes, sin cubrimiento suficiente. No obstante, bajo las mismas «malas» condiciones «constructivas», la corrosión se iniciará en los sitios más calientes y húmedos y donde el riesgo de condensación sea mayor. El proceso es claramente visible, pues los productos de la

---

(\*) A pesar de que, bajo el punto de vista de la seguridad estructural, es más grave la corrosión de las armaduras principales de pilares, de vigas y placas de forjado, según este orden.

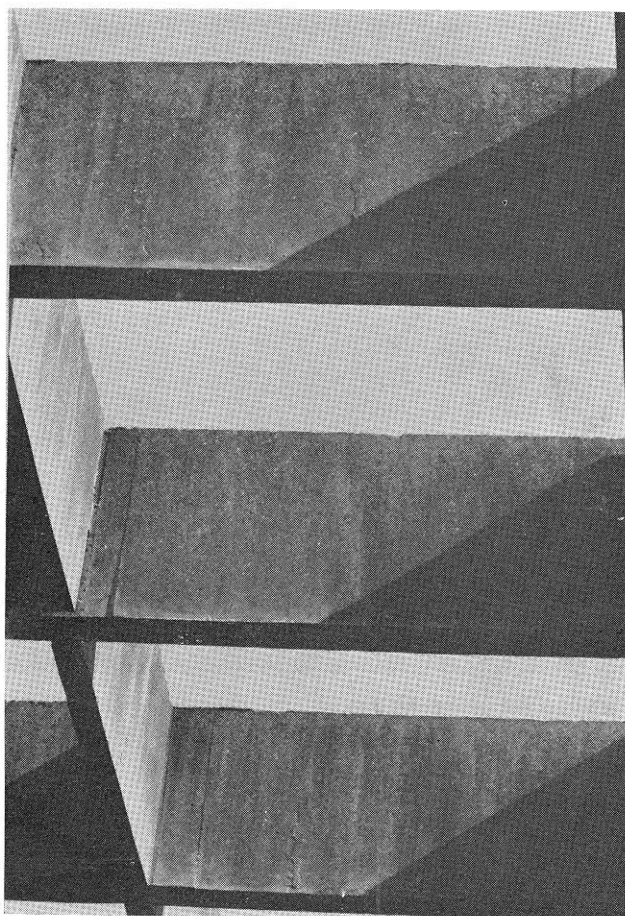


Foto 2. — Corrosión acentuada de los estribos en una viga de hormigón armado. En general aparece la desmochadura de cubrimiento de hormigón, sin fisuras profundas y sin que las hendiduras que alcancen toda la altura de la viga.

corrosión tienen una coloración predominantemente rojizo-pardo-acastañado y, siendo relativamente solubles, se «escorren» manchando la superficie del hormigón.

En elementos de estructura donde el hormigón pueda sufrir tracciones y fisuras, como en forjados y vigas, el riesgo de corrosión es más acentuado que en paneles y otros componentes que trabajan predominantemente a compresión, según se expone en la figura 4, producto de la observación de estructuras marítimas.

El riesgo de corrosión también aumenta en las zonas angulosas, aristas y esquinas, según se advierte en la foto 3. Es siempre aconsejable que las estructuras sean con cantos y aristas redondeadas, así como aumentar el cubrimiento en situaciones de agresividad acentuada.

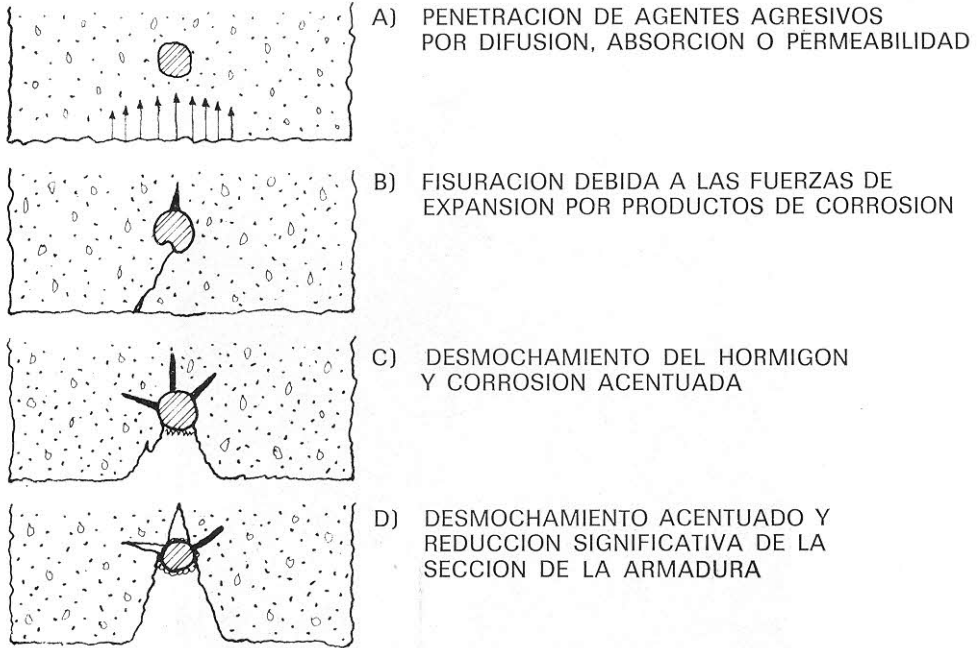


Figura 3. — Deterioración progresiva debida a la corrosión de las armaduras (Shaffer, 1975; Caironi, 1977) (13, 14).

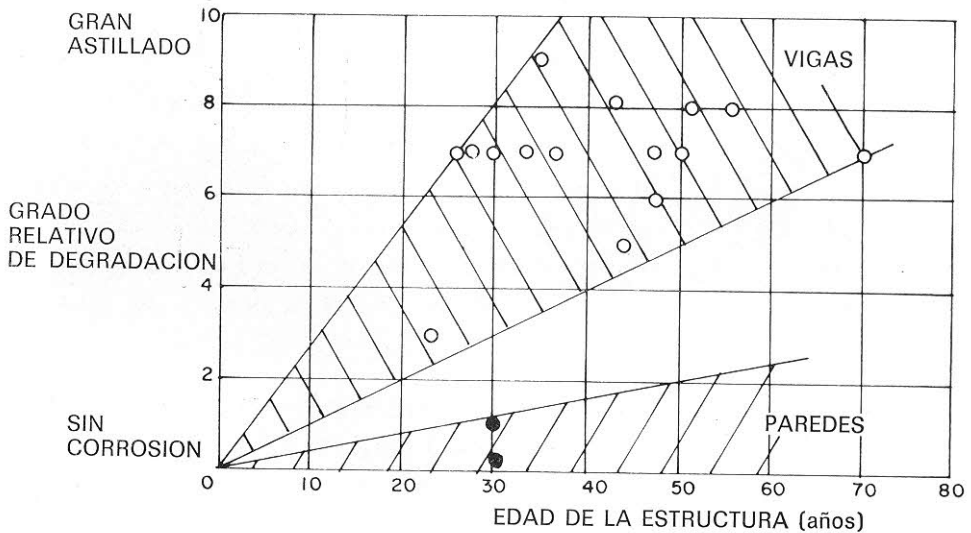


Figura 4. — Grado de degradación de las estructuras en la zona de oleaje y variación de la marea (Burg y Domone, 1974) (15).

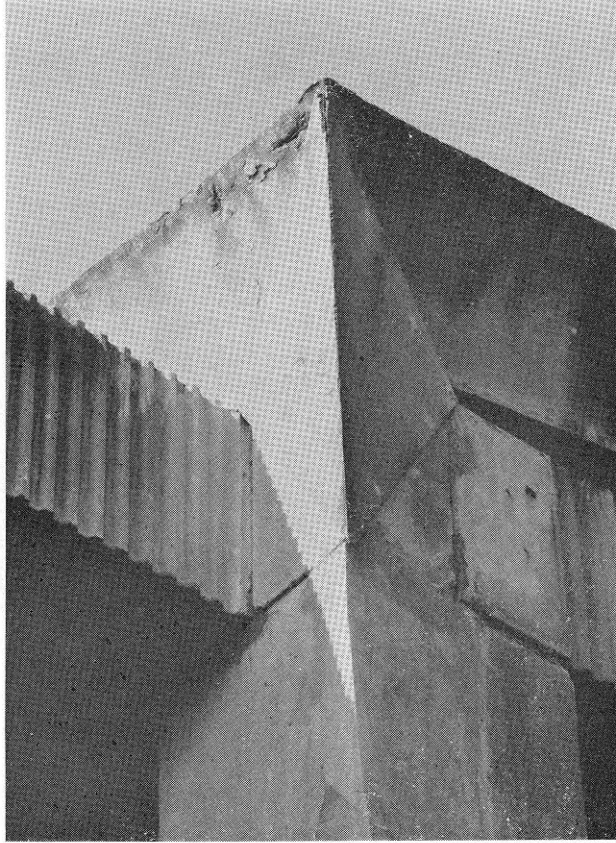


Foto 3.— Las zonas angulosas, aristas y cantos vivos de las estructuras aumentan los riesgos de corrosión.

En algunas situaciones especiales de corrosión de armaduras inmersas en hormigones ligeros y porosos (volumen de huecos del orden de 60 % cuando en el hormigón normal es de 10 %) puede darse la aparición de manchas externas de herrumbre, sin fisuración. Es el caso ocurrido en unos «parasoles» de hormigón ligero, empleados en la fachada de un edificio situado en una ciudad del litoral del Brasil, según se presenta en la foto 4.

Finalmente, es típico de la corrosión preponderantemente electroquímica en medio acuoso, la no continuidad perfecta del fenómeno en toda la extensión de las armaduras consideradas. Generalmente se presentan trechos sanos alternados con trechos fuertemente corroídos según se muestra en la foto 5.



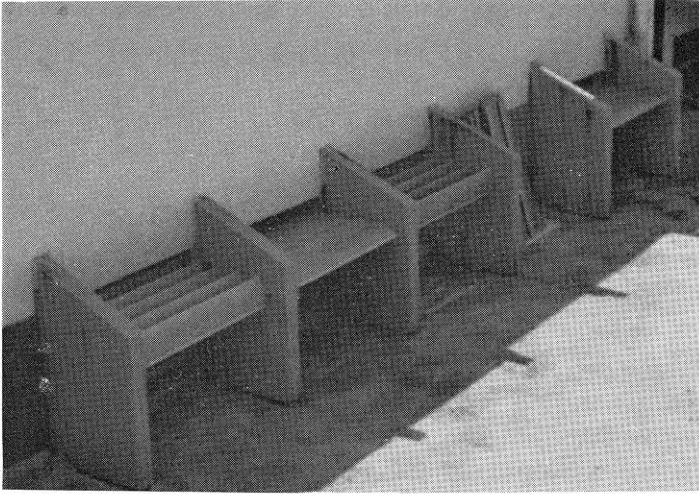


Foto 4. — Aparición de productos de corrosión sin fisuración (Hormigón ligero y poroso).

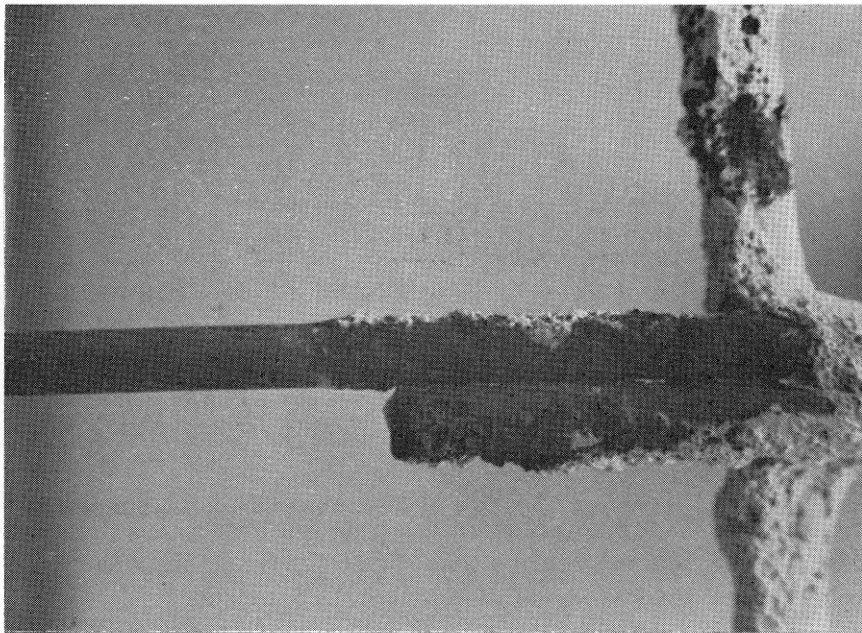


Foto 5. — El proceso esencialmente electroquímico de corrosión, genera trechos alternados. Zonas anódicas corroídas y zonas catódicas sanas.



#### 4. FACTORES QUE AUMENTAN EL RIESGO DE CORROSION

La diferencia de tensión entre puntos de la armadura puede tener origen en varias causas, tales como:

- sollicitaciones mecánicas distintas en el acero y en el hormigón de zonas próximas;
- diferencias en la composición química y en la superficie del acero;
- diferencias de aireación debidas a la mayor o menor compacidad y calidad del hormigón, etc.

No siempre estas discontinuidades son suficientes para ocasionar la corrosión. En general no producen la corrosión directamente, pero contribuyen —en la medida en que el hormigón deje de proteger la armadura o haya una fuerte acción del medio ambiente capaz de destruir total o parcialmente dicha protección— al aumento del riesgo de corrosión o a favorecer la aceleración de una corrosión ya iniciada.

En la figura 5 se representa esquemáticamente la influencia de la composición química y el estado de la superficie del acero.

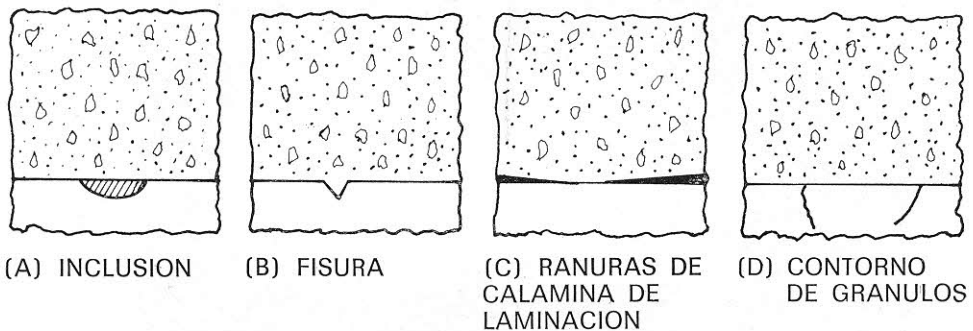


Figura 5.— Diferencia de potencial originadas por alteraciones en la composición y estado superficial de los alambres y barras de acero. (Shaffer, 1971) (14).

En la figura 6 (14) se presenta la acción de hormigones de diferente calidad. Se cree que la aireación superficial pueda ser la mayor y la más frecuente causa generadora de diferencias de potencial.

A pesar de ser imprescindible la presencia de oxígeno para que haya corrosión es justamente en los sitios de menor acceso, próximos a lugares más aireados, donde se forman zonas anódicas, con mayor intensidad de corrosión, según se puede ver en la figura 7.

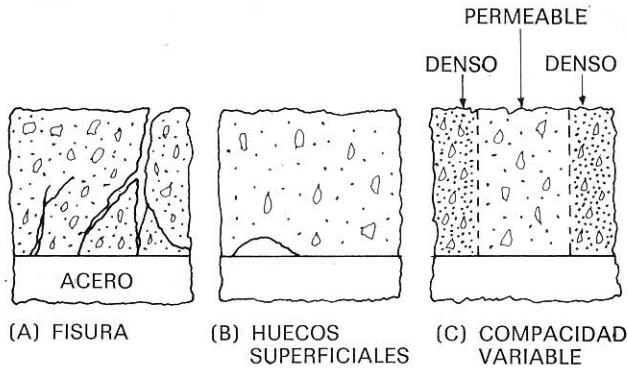


Figura 6.—Diferencias de potencial originadas por fisuras, compacidad variable y diferencias en la calidad del hormigón en un mismo componente estructural, comportan diferencias de acceso de oxígeno y diferencias de alcalinidad. (Shaffer, 1971) (14).

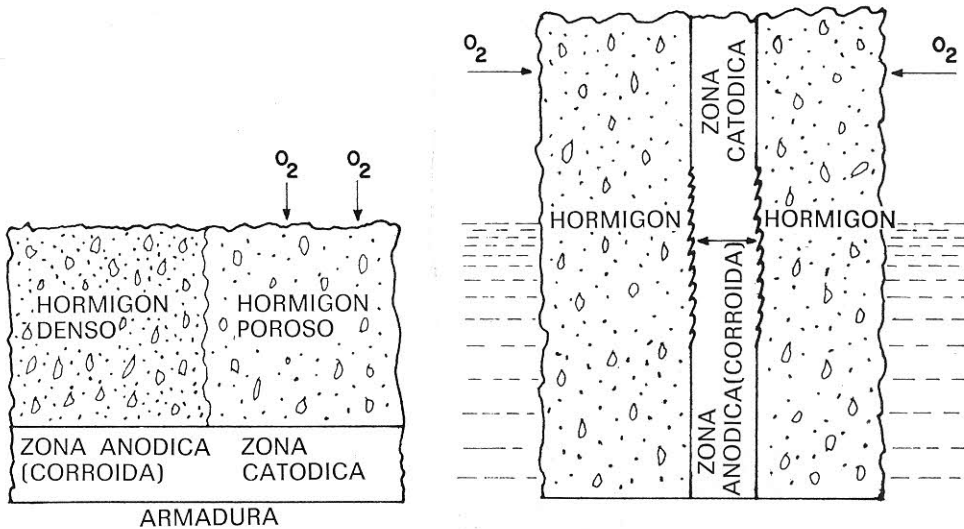


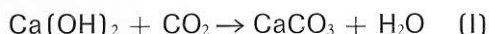
Figura 7.—Efecto del mayor o menor acceso de oxígeno.

## 5. CARBONATACION DEL HORMIGÓN — Pérdida de protección

### 5.1. El fenómeno — Consecuencias

En las superficies expuestas de las estructuras de hormigón, la alta alcalinidad obtenida principalmente a costa de la presencia de hidróxido cálcico,  $Ca(OH)_2$ , liberado por las reacciones de hidratación del cemento, puede reducirse con el tiempo. Esta reducción resulta, esencialmente, de la acción del  $CO_2$  presente en la atmósfera y otros gases ácidos tales como  $SO_2$ ,  $H_2S$ , etc.

Este proceso, denominado carbonatación del hormigón, se produce lentamente según la reacción principal: \*



El pH de precipitación del  $\text{CaCO}_3$  es próximo a 9,4 (a la temperatura ambiente) lo que altera substancialmente las condiciones de estabilidad química de la capa de película pasivadora del acero según se ha visto en el párrafo 2.2. Siendo, por lo tanto, un fenómeno ligado a la permeabilidad a los gases, debe estudiarse con la composición ideal del hormigón, de modo que por ella se pueda reducir el riesgo y la velocidad de carbonatación.

## 5.2. Influencia de la relación agua/cemento

La carbonatación superficial de los hormigones varía según la naturaleza de sus componentes, el medio ambiente (rural, industrial, urbano) y con las técnicas constructivas de transporte, vertido, compactación, curado, etc. En consecuencia la profundidad de la carbonatación es de difícil previsión y, asimismo, variable entre límites muy amplios.

Las profundidades de carbonatación aumentan inicialmente con gran rapidez, continuando más lentamente, tendiendo a una asíntota para la profundidad máxima. Esta tendencia al establecimiento del fenómeno se puede explicar por la hidratación creciente del cemento, que aumenta gradualmente —desde que haya agua suficiente y generalmente lo es el agua libre por la reacción (1)— la compacidad del hormigón. A ello se une la acción de los productos de transformación, que también colmatan los poros superficiales dificultando el acceso del  $\text{CO}_2$ , presente en el aire, al interior del hormigón.

Dado el papel preponderante de la relación agua/cemento en la permeabilidad de los gases es natural que tenga gran influencia en la velocidad de carbonatación. Según *Gregger* (17) la profundidad de carbonatación de hormigones con relación agua/cemento de 0,80, 0,60 y 0,45, están en relación, en media, de 4 : 2 : 1, independientemente de la naturaleza de la atmósfera a que se expongan. El mismo autor resalta que la carbonatación puede ser cerca de 10 veces más intensa en ambientes climatizados ( $\text{H.R.} \leq 85^\circ \text{C}$  y temperaturas de  $23^\circ \text{C}$ ) que en ambientes húmedos, debido a la disminución de la permeabilidad al  $\text{CO}_2$  del hormigón por efecto de la presencia de agua.

---

(\*) Los hidróxidos de sodio y potasio pueden reaccionar de forma semejante. A largo plazo los silicatos y aluminatos también pueden ser atacados y transformados en carbonato cálcico, alúmina y sílice hidratada (16).

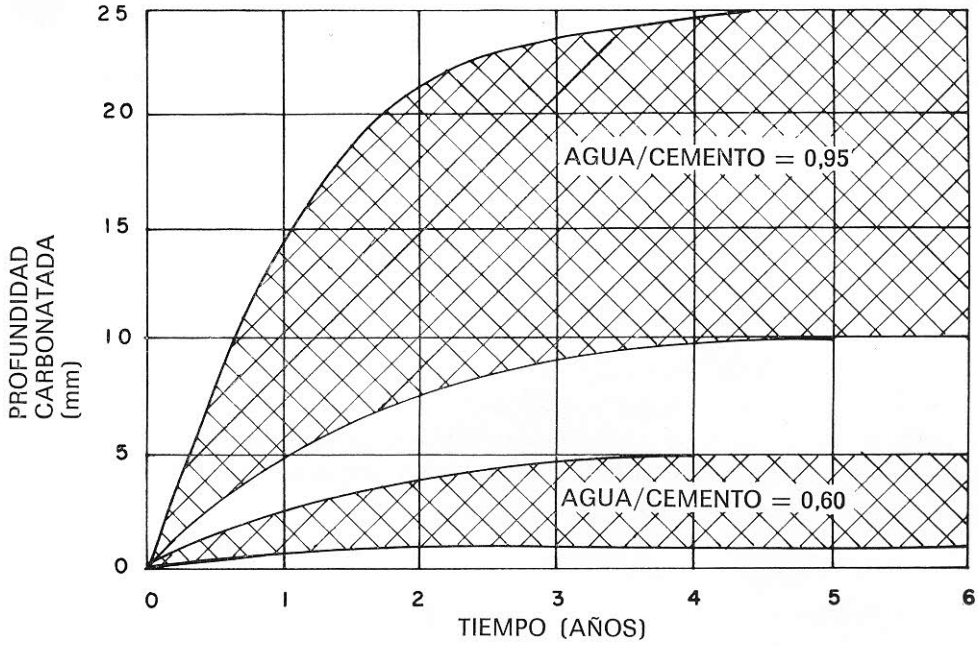


Figura 8. — Variación de la profundidad de carbonatación con el tiempo e con la relación agua/cemento. (Soretz, 1967) (18).

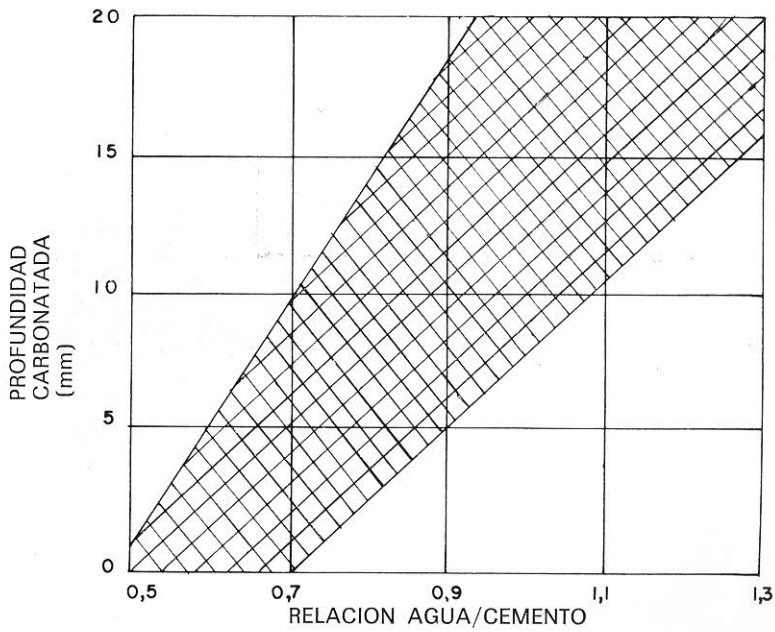


Figura 9. — Influencia de la relación agua/cemento en la profundidad de carbonatación. (Soretz, 1967) (18).

La figura 8 presenta los resultados de la observación de *Soretz* (18) realizada en una serie de hormigones de buena calidad preparados a base de áridos normales. La figura 9 presenta los resultados, obtenidos por el mismo autor, de hormigones preparados con áridos normales y con diferentes relaciones agua/cemento y sometidos durante 20 años al ambiente (atmósfera) industrial.

Según el *12-CRC Committee* (19) es posible producir hormigones que, prácticamente, no sufran el fenómeno de la carbonatación y, por consecuencia, protegerán la armadura cualquiera que sea el cubrimiento.

De estas consecuencias ya se puede concluir que el cubrimiento del hormigón no puede ni debe ser absoluto, cualquiera que sea el hormigón empleado en el moldeo del componente estructural. Cada hormigón, así como cada estructura, y según sea el medio ambiente, conjuntamente, podrán exigir el cubrimiento más adecuado.

### 5.3. Métodos para medir el espesor carbonatado

Una determinación muy exacta tan sólo es posible mediante el estudio de secciones microscópicas, con el auxilio de prismas de nicol. La doble refracción sufrida por el carbonato cálcico que produce un color claro, contrastando con la pasta de cemento endurecida, que aparece oscura por ser un material ópticamente isótropo (19).

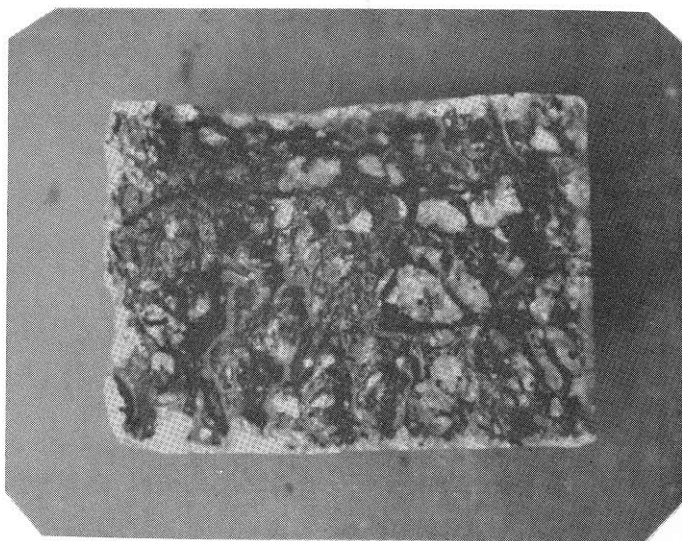


Foto 6.— Aspecto de una superficie de hormigón tratada con la solución de fenolftaleína. Nótese que en los ángulos y en la parte más externa en la carbonatación alcanza profundidades mayores.

No obstante siendo el mayor problema la caída del pH, indicadores a base de fenolftaleína o equivalentes, que indiquen la variación de pH entre 8 y 11, pueden emplearse con éxito. Cualquier determinación de este tipo debe ser cuidadosa y nunca se hará sobre hormigones aserrados, mojados o alterados por deficiencias en las técnicas de muestreo. Lo ideal es quebrar una porción dada e inmediatamente aplicar el indicador en la misma obra. Nuestra experiencia nos ha demostrado que es corriente hallar regiones más alcalinas (fenolftaleína violeta) alternando con zonas menos alcalinas (fenolftaleína incolora a poco violeta), en los morteros y hormigones que cubren una misma barra de acero. El pH teórico del viraje de la fenolftaleína, a 25 ° C, es 9,3 (color violeta) siendo incolora por debajo de 8,3 (17). En general se aplica una solución de 1 g de fenolftaleína disuelta en 50 g de alcohol y 50 g de agua. La foto 6 muestra el aspecto de la determinación de la profundidad de la carbonatación empleando la fenolftaleína.

(Concluirá.)

---

## **INTERESANTE OPORTUNIDAD**

Se ofrecen 4 autoclaves esféricos mezcladores, de 14 metros cúbicos cada uno, aptos para toda clase de mezclas para prefabricados de hormigón, así como las naves en las que puedan instalarse su manipulación.

Para más información dirigirse a

**D. Salvador Durall, o al Sr. Comas**

Teléfonos 247 15 38 o 849 26 29. De 11 a 13 horas de lunes a viernes.