



Corrosión de las armaduras en el hormigón armado

Por el Prof. Ing. PAULO ROBERTO DO LAGO HELENE

(Continuación) (*)

6. CARACTERISTICAS DEL HORMIGON

6.1. Permeabilidad

6.1.1. Permeabilidad al agua

La permeabilidad del recubrimiento de hormigón, cuando se ha preparado con áridos densos, vertido correctamente y adensado de forma que quede prácticamente exento de aire ocluido —salvo cuando existan fisuras o juntas permeables de construcción— queda fuertemente determinada por la permeabilidad de la pasta de cemento (19).

La permeabilidad de la pasta de cemento depende, a su vez, de la relación agua/cemento y de su grado de hidratación. La permeabilidad de una pasta con 1 día de edad puede ser diez mil veces mayor que la permeabilidad de la misma pasta a los 7 días de edad y casi un millón de veces superior que a los 28 días (20). Con 28 días un cemento portland corriente puede que tenga apenas tan sólo un 70 % de fracción hidratada, conteniendo mucha agua libre, capaz de ser transportada por una fuerte presión externa. Entonces se puede decir que la permeabilidad y, por consecuencia, la capacidad de cubrimiento del hormigón será prácticamente la misma

(*) Véase CEMENTO-HORMIGON, n.º 591 febrero 1983, págs. 175 a 195.

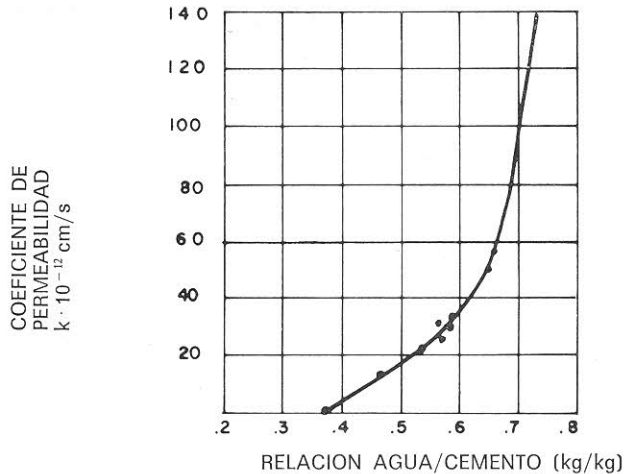


Figura 10.— Influencia de la relación agua/cemento en la permeabilidad de pastas de cemento altamente hidratante (93 %) (Porvers, 1958) (20).

tanto para hormigones con alta relación agua/cemento puestos en contacto con un ambiente agresivo tan sólo después de varios meses de curado húmedo e ideal, como para hormigones de baja relación agua/cemento puestos a corto plazo en contacto con aguas conteniendo sustancias agresivas.

La figura 10 y la tabla 1 (20) indican los coeficientes de permeabilidad (k) en cm/s de pastas con diferentes relaciones agua/cemento y distintos áridos.

TABLA 1.— Comparación entre la permeabilidad de los áridos (rocas) y la pasta de cemento portland (Porvers, 1958) (20).

Arido (naturaleza de la roca matriz)	Coefficiente de permeabilidad k en cm/s · 10 ⁻¹²	Relación agua/cemento (en kg/kg) de pastas de cemento Portland altamente hidratadas de permeabilidad equivalente
Basalto	2,57	0,38
Cuarzo	8,56	0,42
Mármol denso	24,9	0,48
Granito	5.570	0,70
Arenisca	12.800	0,71

Como se advierte, las pastas pueden ser mucho más impermeables que la mayoría de los áridos (rocas) empleados en la preparación de los hormigones.

Por consiguiente los hormigones tendrán una mayor impermeabilidad que la pasta pura y completamente curada, pero generalmente menor que la permeabilidad de los áridos que se usaron en su preparación.

Esta mayor impermeabilidad de las pastas puede —según algunos investigadores— deberse al efecto del taponamiento del gel de cemento y de la menor dimensión de los capilares a pesar de que éstos, por regla general, sean en mayor número que los presentes en las rocas.

Aparentemente, empleando un árido de una naturaleza determinada, no compensaría dosificar hormigones con una relación agua/cemento inferior a los valores de referencia indicados en la tabla n.º 1. Dicha conclusión apresurada puede incurrir en los equívocos principales siguientes:

- 1.º) La tabla nos presenta resultados de pastas casi totalmente hidratadas, o sea con más de un mes de edad, mantenidas en condiciones de un riguroso curado; y,
- 2.º) Considerando que la penetración de agua bajo presión es muy pequeña, se puede y se debe contar con la contribución del mortero y de la pasta que recubren a los áridos y que, por lo tanto, pueden reducir la permeabilidad total del hormigón.

Los hormigones pueden clasificarse, según su impermeabilidad al agua en *buenos*, *normales* y *deficientes*, cuando tengan un coeficiente de permeabilidad k , medido a una edad especificada previamente, de 10^{-10} cm/s, 10^{-8} cm/s y 10^{-6} cm/s, respectivamente (13). De otro modo se podría decir que, para alcanzar una profundidad de 2 cm de cubrimiento, el agua agresiva tardaría 15 meses, 5 días y cerca de 1 h respectivamente, bajo presiones del orden de $5 \cdot 10^{-2}$ MPa (~ 5 m c.a.), corrientes en estructuras convencionales. Los cálculos se efectuaron basándonos en la definición de la ley de Darcy, a saber:

$$V = K \frac{H}{x} = \frac{Q}{S}$$

Donde:

V = velocidad de percolación del agua, en cm/s;

K = coeficiente de permeabilidad del hormigón en cm/s;

H = presión de contacto en cm de columna de agua;

x = espesor de hormigón atravesado en cm;

Q = caudal de agua en cm^3/s ;

S = área de la superficie confinada por donde se percuela el agua en cm^2 .

$$\therefore x = \frac{kH}{V} \rightarrow x = \frac{kH}{\frac{dx}{dt}} \rightarrow x \cdot dx = kHdt$$

$$\int_0^x x \, dx = \int_0^t kHdt \rightarrow \frac{x^2}{2} = kHt$$

$$\therefore x = \sqrt{2 \cdot k \cdot H \cdot t}$$

Los tiempos t corresponden al fenómeno puro de percolación de agua en la masa de hormigón, pudiendo no obstante ser alterados por la interacción con fenómenos capilares de succión de agua en el hormigón.

6.1.2. Permeabilidad a los gases

La permeabilidad de los buenos morteros y hormigones a los gases es baja, tan baja que son raras las determinaciones precisas de esta propiedad. Bajo iguales gradientes de presión, el oxígeno debe penetrar a través del hormigón más rápidamente que el CO_2 , vapor de agua o agua, debido a sus características moleculares, pero difícilmente los gradientes de presión son elevados (19). La presión parcial de los gases agresivos en el aire es muy baja —para el CO_2 de orden de 10^{-4} MPa ($\sim 10^{-3}$ atm)— ya que depende de su concentración en el aire, que también es baja frente al O_2 y al N_2 .

El bióxido de carbono (CO_2) parece que no entra en el hormigón más allá de la zona carbonatada, siendo su presión de contacto proporcional al tenor de CO_2 en la atmósfera. En general, la presión parcial del CO_2 en el aire varía de 0,3 a $1,2 \cdot 10^{-3}$ atmósferas, según la concentración de éste en varios lugares. La permeabilidad del hormigón al CO_2 disminuye con la carbonatación del material, que tiende a colmatar los poros y capilares.

La permeabilidad a los gases agresivos adquiere mayor importancia cuando se trata, por ejemplo, de losas y partes superiores de colectores de aguas residuales. El fluido transportado puede generar sulfuros (S^{--}), inicialmente en forma de gas sulfhídrico (SH_2). En contacto con el hormigón y en presencia de bacterias aerobias dichos gases se pueden oxidar transformándose en H_2SO_4 contribuyendo así a que se acelere la corrosión, según se vio en el párrafo 1.2.4.

La permeabilidad a los gases aumenta con hormigones en ambientes secos, pues además de la formación superficial de microfisuras de retracción, es sabido que la humedad y el agua presente en los poros disminuye

la permeabilidad a los gases. De ahí que se observen mayores profundidades de carbonatación en ambientes secos ($H.R. \leq 80\%$) o en hormigones sometidos a ciclos de secado y humedecimiento (19).

Considerando la porosidad como una propiedad intrínseca del material, la permeabilidad al aire debiera ser equivalente a la obtenida con agua. En realidad, esta igualdad no ocurre nunca puesto que tanto los gases como, principalmente, el agua se interfieren en sus acciones con el hormigón, modificando su permeabilidad a un tiempo.

La literatura técnica pone de manifiesto que la permeabilidad, tanto al agua como a los gases, depende de la mayor o menor intercomunicación de los poros capilares y no solamente de la porosidad del volumen de huecos totales del hormigón. Es por este motivo que los hormigones con aditivos aireantes —más porosos— son más impermeables a las bajas presiones de agua (≤ 1 mm col. agua) al aire.

Los resultados de la permeabilidad al aire de algunos materiales obtenidos con presiones de succión de aprox. 0,1 MPa (~ 1 m c.a.) son de los órdenes de grandeza siguientes (2):

— basalto	10^{-8} a 10^{-6} cm/s
— granito	10^{-7} a 10^{-5} cm/s
— hormigón	10^{-8} a 10^{-5} cm/s
— tubo de fibrocemento: en dirección perpendicular a las capas de fabricación puede ser 6 veces menos permeable que un tubo cerámico de barro vidriado.	

La permeabilidad al agua y a los gases de pastas y hormigones compactos y con baja relación agua/cemento puede ser inferior a la permeabilidad de rocas densas debido a las pequeñas dimensiones de los capilares y a la acción de taponamiento del gel de cemento, ya comentadas.

6.2. Absorción del agua

La absorción de agua del hormigón es uno de los factores más difícilmente controlables. En principio, cuanto menor sea el diámetro de los capilares mayores serán las presiones capilares y, por consiguiente, mayor y más rápida la absorción del agua.

Reducciones en la relación agua-cemento parece que contribuyan a reducir la absorción, pero, en la medida que vuelven al hormigón más denso y compacto, disminuyen el diámetro de los capilares y, siempre que éstos sean intercomunicables, pueden terminar aumentando la absorción capilar.

En el otro extremo, hormigones porosos absorben poca agua por capilaridad, pero acarrearán otros problemas insuperables de permeabilidad y carbonatación acentuada.

Parece que la mejor solución, cuando nos enfrentamos con problemas de esta naturaleza, como —por ejemplo— en el caso de pilares y de estructuras semienterradas lo mejor es añadir al hormigón agentes aireantes y aditivos de naturaleza hidrófuga. Las burbujitas de aire incorporadas al hormigón —de naturaleza diferente al aire ocluido en el hormigón por compactación deficiente— tienen la propiedad de cortar la comunicación entre los capilares y de disminuir la absorción de agua.

Los aditivos impermeabilizantes incorporados a la masa de hormigón y los revestimientos externos hidrófugos también pueden reducir drásticamente el riesgo de absorción de agua tan perjudicial para las armaduras. De todos modos, siempre es conveniente aumentar los cubrimientos de hormigón cuando se presentan situaciones de riesgo de absorción de aguas agresivas para las armaduras de acero.

En recientes determinaciones experimentales se obtuvieron alturas de absorción capilar, en probetas inmersas en una cubeta con un centímetro de agua, variando de 2 a 6 cm, según la relación agua/cemento, de 0,40 a 0,60, y con una edad de 28 días. Este hecho refuerza la necesidad y la importancia de bases de hormigones espesos y compactos cuando la estructura se asiente en terrenos agresivos.

Finalmente debe considerarse el hecho del mayor o menor grado de saturación del hormigón, o sea, la no absorción de agua por hormigones saturados. Por ello, aparentemente, no habría riesgo de penetración de aguas agresivas —admitidas sin presiones, porque si no el fenómeno pasa a ser permeabilidad— en componentes de hormigón fundidos «in situ» (hormigones saturados). En piezas prefabricadas o en elementos que ya tuvieron la oportunidad de establecer el equilibrio con el ambiente, y por lo tanto, secarse parcialmente, la absorción de agua es inevitable.

No obstante la experiencia ha demostrado que también hay penetración de aguas agresivas en hormigones saturados. El hecho se puede explicar por el fenómeno de *difusión*, o sea, un proceso espontáneo de transporte de masa en un sistema físico-químico por efectos de gradientes de concentración, debidos a la presencia de dos aguas en contacto íntimo: la del hormigón y la del ambiente.

Este fenómeno será tanto más intenso cuanto mayor sea el gradiente de concentraciones de los elementos disueltos en las dos aguas, tendiendo a un equilibrio según se indica en la *figura 11*. De ahí el hecho sobradamente conocido de que los medios muy permeables, donde pueda ser grande la renovación de agua en contacto (arenas, aguas en movimiento), son

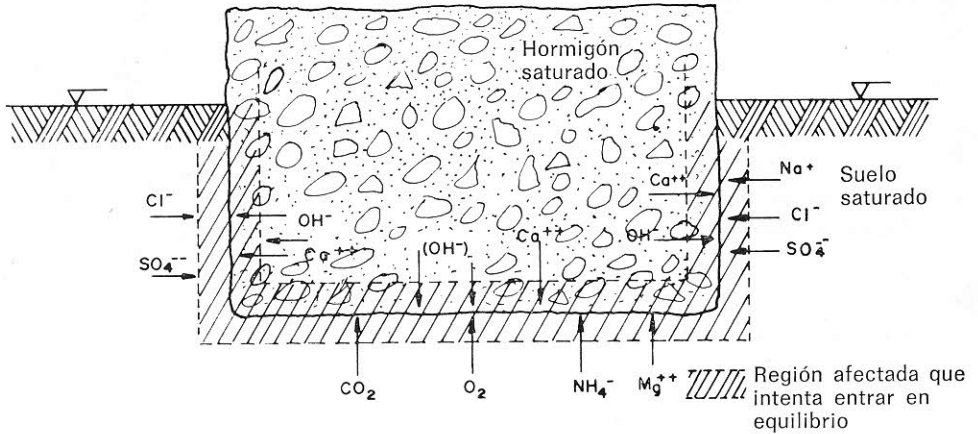


Figura 11. — Penetración de agentes agresivos a la armadura explicado por el fenómeno de difusión.

mucho más agresivos que los ambientes donde la velocidad de renovación es baja o nula (arcillas, aguas estancadas).

Siendo la difusión un fenómeno de transporte de masa a través de un fluido, es de esperar que sea tanto menor cuanto más compacto sea el hormigón.

6.3. Fisuración del hormigón

Según el párrafo 4.2.2 de la NB-1/78, referente a estados de fisuración inaceptables, las estructuras deben ser dimensionadas de modo que no puedan generar fisuras en la superficie del hormigón con aberturas superiores a:

- 0,1 mm para piezas no protegidas, en medio agresivo;
- 0,2 mm para piezas no protegidas, en medios no agresivos; y
- 0,3 mm para piezas protegidas.

No queda muy claro en el texto lo que son piezas protegidas —se da la acción directa de la intemperie a través de revoques y revestimientos impermeables— o no protegidas. Otra dificultad se refiere al problema de la medición de estas fisuras, puesto que además de que la vista humana no distingue prácticamente una fisura de 0,1 mm, las fisuras son irregulares y de aberturas variables.

Además de estas fisuras analíticamente calculadas y previstas por efectos mecánicos a partir del proyecto estructural, deben considerarse

las fisuras de retracción * y de origen térmico **. Estas fisuras, en la mayor parte de las veces de aberturas reducidas, pueden alcanzar profundidades elevadas (cerca de 2.500 veces mayores que la abertura), pudiendo llegar al corte de la pieza (Cánovas, 1977) (12). Además, pueden actuar como factor de concentración de tensiones, siendo conocido el hecho de que es suficiente que actúe cerca del 50 % de cada una de las sollicitaciones mecánicas generadoras de fisuras para proseguir una fisura ya iniciada por retracción o efecto térmico.

Según el 12-CRC Committee (19), Caironi (13) y otros autores la presencia de fisuras contribuye al deterioro de la protección que ofrece a la armadura el cubrimiento de hormigón.

Beeby (22) en un excelente trabajo donde resume una serie de experiencias realizadas por diferentes investigadores en diversos países y épocas, señala que el asunto todavía no está bien aclarado. No se puede definir con claridad a partir de qué abertura de fisura se producirá un aumento significativo de la velocidad de corrosión. Observando las recomendaciones de distintas entidades internacionales, se nota que las aberturas de las fisuras no deben superar 0,3 mm en los casos generales y 0,1 mm en las situaciones especiales de agresividad elevadas y en elementos pretensados. Es probable que dichas exigencias se inclinen bastante a favor de la seguridad para la mayoría de las situaciones, siendo, no obstante, temerarias ante situaciones particulares de agresividad como se expone seguidamente.

Por otra parte parece que sea más importante conocer la profundidad de la fisura ***, si ésta alcanza la armadura o no y con qué anchura lo hace, que tan sólo su abertura en la superficie del hormigón.

Está comprobado experimentalmente que el proceso de carbonatación se da, preponderantemente, a lo largo de los bordes de las fisuras y esta carbonatación, más rápida que la corriente, contribuirá a la aceleración de la aparición de células de corrosión (pilas) debido a las diferencias de pH y a la aireación concurrentes.

(*) Variable de 15 a $40 \cdot 10^{-5}$ mm/segundo según disminuya la H.R. del ambiente y aumente la relación superficie/volumen de la pieza considerada.

(**) En la franja de 0°C a 80°C es frecuente admitir un coeficiente de dilatación térmica, α_c , variable de $8 \cdot 10^{-6}$ a $20 \cdot 10^{-6}$, según la dosificación de cemento en kg/m^3 y las características térmicas de los áridos. La NB-1/78 recomienda $\alpha_c = 10^{-5}$ $\text{mm}/^\circ\text{C}$, siempre que no se disponga de resultados experimentales específicos del hormigón en cuestión.

(***) La determinación de la profundidad de las fisuras siempre es compleja y conlleva una cierta incertidumbre. Se pueden emplear aparatos de ultrasonidos que constituyen técnicas no destructivas, o líquidos como el azul de metileno o la fenoltaleína, rompiéndose seguidamente una zona del hormigón. Lo más fiable, sin embargo, es la extracción y observación de testigos de diámetro adecuado.

Esta es una de las conclusiones que se desprenden de los estudios experimentales de *Carpentier y Soretz* (23), quienes, ensayando vigas armadas (sometidas a ambientes corrosivos durante 2 años) con fisuras de aberturas de orden de 0,2 a 0,3 mm comprobaron que la corrosión es más intensa cuanto mayor es la abertura de las fisuras y cuanto antes éstas aparecen. También se comprueba que las cargas alternadas contribuyen al aumento de la velocidad de corrosión, comparativamente con los casos de cargas permanentes, lo cual nos introduce una variable más a considerar en el estudio de la corrosión de las armaduras del hormigón y de su prevención.

Nuestra experiencia nos enseña que la corrosión de las armaduras acompaña el trazado de las fisuras y llega, inclusive, en algunos casos extremos como los que se presentan en las fotos 7, 8, 9 y 10, a seccionar la armadura y, eventualmente, a romper la estructura.

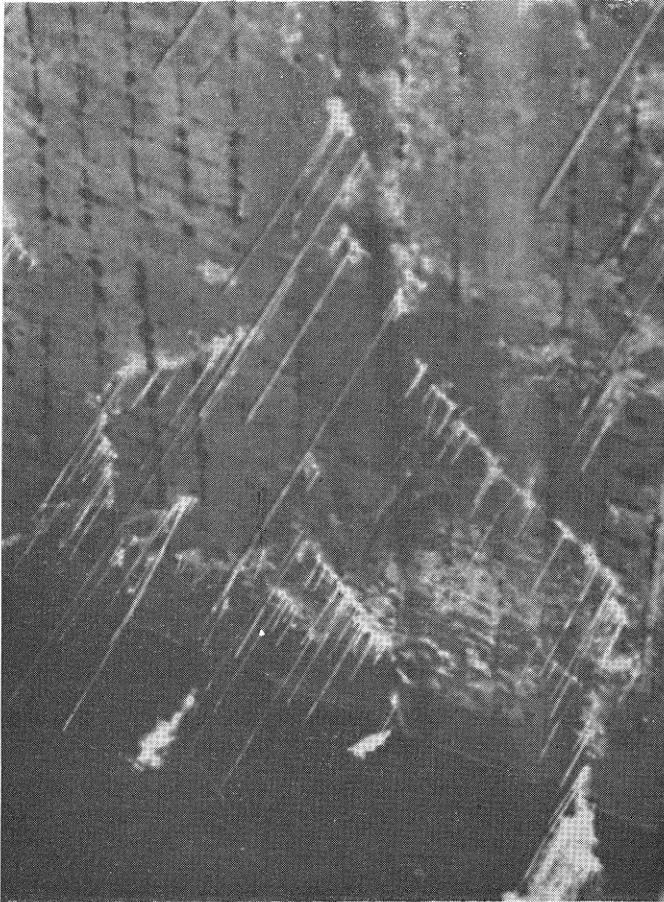


Foto 7. — Fisuras en una placa de cubierta de unos depósitos. Partes sujetas a la condensación. Se nota lixiviación y carbonatación, predominantemente en las fisuras. También se nota una generalizada corrosión de las armaduras.

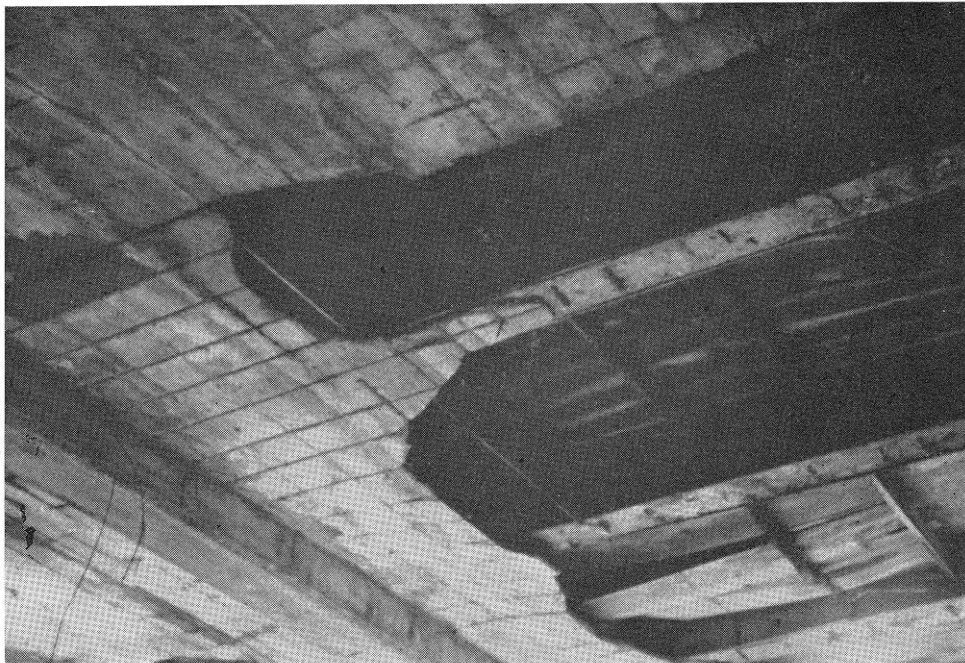


Foto 8.—Derrumbamiento, a trechos, de una placa del tipo de cajón perdido. Se trata de placas de cubierta sometidas a la condensación. La armadura fue corroída intensamente en las fisuras, llegando al colapso.

6.4. Resistividad del hormigón

El hormigón húmedo se comporta como un semiconductor con resistividad del orden de $10^2 \Omega \text{ m}$ (24), mientras que, una vez seco en una estufa, puede considerarse aislante con resistencia del orden de $10^9 \Omega \text{ m}$ (24).

Se puede establecer que la corriente eléctrica en el hormigón se mueve siguiendo un proceso electrolítico con resistividad tanto menor cuanto mejor sea el electrólito. Por lo tanto a un aumento de la relación agua/cemento, de la humedad relativa del ambiente y de la eventual presencia de iones, tales como Cl^- , SO_4^{2-} , H^+ , etc., corresponderá una disminución de la resistividad del hormigón.

La resistividad * del hierro es del orden de $1,2 \cdot 10^{-7} \Omega \text{ m}$, mientras que la del agua puede ser de $0,2 \Omega \text{ m}$; aguas pantanosas de $1 \Omega \text{ m}$; agua dulce $10^2 \Omega \text{ m}$; basaltos $10^4 \Omega \text{ m}$; calizas densas $10^7 \Omega \text{ m}$ y hormigones de buena calidad en equilibrio con ambientes secos del orden de 10^4 a $10^5 \Omega \text{ m}$ (10).

(*) **Resistividad**, también llamada resistencia específica es la resistencia eléctrica de un material homogéneo e isótropo de sección recta, con área y longitud unitaria.



Foto 9. — Trozos de una placa de cubierta donde se nota claramente el corte de la armadura por corrosión acentuada. El hecho ocurre preponderantemente acompañando la fisura de la placa. Se trata de un trozo de placa, retirado cuando su demolición con fines de recuperación.

La resistividad de un líquido es inversamente proporcional a la proporción de sales disueltas, mientras que la de materiales porosos es inversamente proporcional a la humedad salina absorbida.

La resistividad del hormigón varía según la naturaleza de la corriente eléctrica que lo atraviesa. La corriente alterna nos da para la resistividad resultados ligeramente menores que la corriente continua, debido al fenómeno de polarización provocado por la última.

Bury y Domone (15) refieren ensayos efectuados en estructuras marítimas, en las cuales se midieron las diferencias de potencial entre zonas

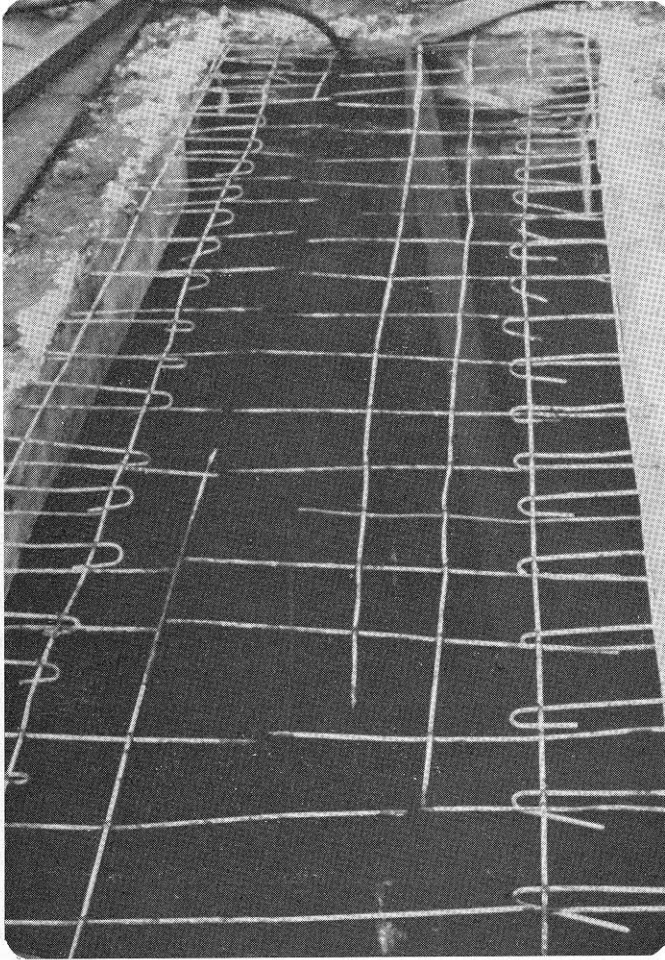


Foto 10. — Parte de una placa de cubierta demolida por presentarse excesivamente corroída. La armadura se reimplantó en su posición inicial, notándose que ya estaba cortada donde había la fisura del hormigón.

corroídas y no corroídas. En ellas también se midió la resistividad del hormigón, resultando:

- altas diferencias de potencial ~ 300 mV en diferentes zonas de una estructura corroída comparada con baja diferencia de potencial, ~ 30 mV entre diferentes zonas de una estructura no corroída.
- baja resistividad, 30 a 50Ω m en el hormigón, de zonas corroídas, comparada con una resistividad de 130 a 150Ω m en las zonas no corroídas.

Contenidos en cloruros de apenas 0,6 % Cl^- son suficientes para reducir la resistividad de un mortero en casi unas 15 veces (24). Peores pare-

cen ser diferentes concentraciones de cloruros en una misma masa, puesto que pueden generar diferencias de potencial significativas y promover la corrosión. De ello se desprende que no es conveniente alterar la dosificación de aditivos aceleradores del fraguado y endurecimiento en una misma estructura o aún suspender su empleo sin planeamiento anticipado.

La *figura 12* representa la influencia del contenido de cloruros y de la humedad de equilibrio del hormigón sobre el valor de la resistividad.

Finalmente podemos decir que la calidad, o mejor, la porosidad permeable de un hormigón es un factor de gran influencia en la alteración de la resistividad. Por ejemplo, un hormigón normal, puede ver alterada su resistividad tan sólo 1,4 veces (de 9 a $12 \cdot 10^2 \Omega m$) al pasar, al cabo de 5 días, de unas condiciones iniciales de $30^\circ C$ y 37% de H.R., a otras condiciones finales de $31^\circ C$ y 27% de H.R., mientras que un hormigón de tipo celular, altamente poroso (60% de volumen de huecos) puede tener una variación de 8,6 veces (de $2,6$ a $23,3 \cdot 10^2 \Omega m$), para igual alteración de las condiciones termogravimétricas ambientales (25).

Esto nos permite concluir que los hormigones porosos hasta pueden ser mejores —desde el punto de vista de la resistividad— que los hormigones densos, desde que se mantengan permanentemente en ambientes secos.

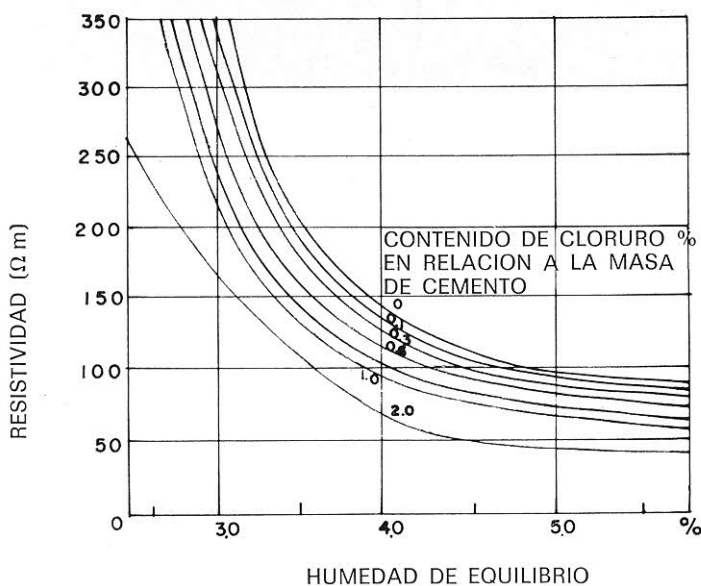


Figura 12. — Influencia de la humedad de equilibrio y del contenido de cloruros en la resistividad del hormigón (Bury y Domone, 1974) (15).

7. ELEMENTOS AGRESIVOS INCORPORADOS AL HORMIGÓN

Es usual, en la mayoría de los casos por absoluto desconocimiento de los técnicos implicados, la incorporación de elementos agresivos durante la misma preparación del hormigón.

El agente agresivo más común es el cloruro (ion Cl^-) que puede ser añadido involuntariamente al hormigón, a partir de agentes acelerantes del endurecimiento, áridos en aguas contaminadas o hasta a partir de tratamientos de limpieza.

Una gran mayoría de los aditivos acelerantes del fraguado y del endurecimiento tienen cloruro cálcico (Cl_2Ca) en su composición. Esta sal se disuelve, liberando aniones Cl^- , que pueden destruir la película pasivadora proporcionada por el medio alcalino y acelerar permanentemente la corrosión, sin consumirse, según se vio en el párrafo 1.2.4. Según Hausmann (26), concentraciones de cloruros iguales o superiores a 700 mg/l despasivan el acero sumergido en agua de cal a $\text{pH} = 12,5$, aparte de reducir significativamente la resistividad del hormigón.

Los datos aportados por la literatura técnica sobre cuál es el contenido de cloruros que puede causar perjuicios a las armaduras no son uniformes. Las recomendaciones van desde un máximo de 0,03 % para el hormigón pretensado a 2,0 % para el hormigón armado en relación a la dosificación de cemento empleada en el hormigón, lo cual puede ser equivalente a concentraciones que irían desde 600 a 40.000 mg/l en relación al agua de amasado, para una relación agua/cemento de 0,5. Estos contenidos, por sí solos, serían prohibidos para su empleo en estructuras de hormigón armado, según las recomendaciones de la NB-1/78 (27) que limitan a 500 mg/l la concentración total de cloruros, expresados en iones Cl^- en el agua de amasado.

En realidad el problema de la corrosión es bastante complejo comprendiendo una serie de factores varios que hacen que tanto ocurra como no ocurra corrosión para contenidos iguales de cloruros. Uno de los factores que parece alterar las condiciones favorables a la corrosión es la migración —por acción de secado, mojado alternativo, temperaturas, aireación diferencial, etc.— de los iones Cl^- en la masa de hormigón. Esta migración puede generar diferencias de concentración y ahí sí que pequeños contenidos, concentrados, pueden ser más peligrosos que altos contenidos homogénea y uniformemente distribuidos. Hallamos una estructura fuertemente atacada por corrosión, donde el contenido de cloruros medido en el producto de corrosión tan sólo era 0,3 % de la masa de cemento * (28).

(*) Evaluar correctamente el contenido de cloruros en morteros y hormigones endurecidos es siempre bastante complicado dando lugar a un determinado margen de incer-

Otro efecto que aminora el efecto de la acción agresiva de los cloruros puede ser su capacidad de combinación con los aluminatos. La difusión de los cloruros en la masa del hormigón es generalmente retardada por la formación de cloroaluminato cálcico, poco soluble. Esta reacción reduce la concentración de cloruros y favorece la protección de las armaduras. De ahí el hecho ya consagrado de que los cementos con altos contenidos de aluminato tricálcico C_3A son los más indicados cuando se está ante la presencia inevitable ** de cloruros (4).

Los áridos de terrenos próximos al mar y las aguas contaminadas o salobres pueden contener cloruros, la mayor parte de las veces bajo la forma de cloruro sódico, $NaCl$. Los tenores admisibles son del mismo orden que en el caso del $CaCl_2$, puesto que las exigencias siempre se dan con respecto al anión Cl^- . Finalmente, los cloruros se pueden incorporar al hormigón, sin querer, a través de tratamientos superficiales de limpieza con ácido muriático, que no es más que una formulación comercial de ácido clorhídrico. Nuestra experiencia nos ha demostrado que este hecho es bastante común, puesto que la mayor parte de las recomendaciones de los fabricantes de baldosas y pavimentos aconsejan la limpieza con ácidos. Siempre que haya riesgo de impregnación de esta solución en la estructura de hormigón —y casi siempre lo hay— debe estudiarse otra forma de limpieza o prever, en el proyecto y ejecución, el hormigón y el cubrimiento más adecuados.

Sin ser muy común, también pueden plantearse problemas derivados del empleo de áridos con concreciones ferruginosas, en la mayoría de los casos resultante de rocas en alteración. Ciertos áridos contienen piritas (sulfuro de hierro FeS_2 hallado en granitos, gneis, rocas sedimentarias y algunas arenas), goetita (óxido de hierro hidratado hallado en concreciones lateríticas), marcasita, pirrotina y concreciones ferruginosas, pueden dar compuestos expansivos y solubles al oxidarse (29). Ello conlleva la formación de huecos en el hormigón que contribuyen al aumento de la permeabilidad y a reducir la protección física del cubrimiento. Los productos de las reacciones también pueden ser ácidos (las marcasitas y piritas pueden generar ácido sulfúrico y sulfatos) que contribuirán a la acelera-

tidumbre. Es necesario conocer o estimar la dosificación del hormigón con cierta precisión y, por consecuencia, el consumo de cemento por metro cúbico de mezcla. El tenor de cloruros se determinará en p.p.m. o en % en relación con una cierta masa de hormigón molido perteneciente a una zona próxima al producto de corrosión, incluyendo parte de éste. En realidad el aspecto cualitativo, o sea, los cloruros están presentes y contribuirán a la corrosión, es más importante que el cuantitativo.

(**) Algunos métodos constructivos, generalmente prefabricados de desmolde rápido, tan sólo son viables con la adición de aceleradores del fraguado y del endurecimiento, a base de $CaCl_2$. Por fortuna, en estas condiciones, los cementos más adecuados por sus características mecánicas son precisamente los que contienen altas proporciones de C_3A y C_3S .

ción del fenómeno de la carbonatación superficial del hormigón, reduciendo la protección química del cubrimiento.

De modo general, todos los elementos que al incorporarse al hormigón contribuyan al aumento de su permeabilidad, podrán considerarse agresivos a la armadura. Entre ellos se puede citar: elevado tenor de materia orgánica en los áridos, alto contenido de fracciones pulverulentas, proporción elevada de grumos arcillosos, materias carbonosas, sulfuros y azufre eventualmente presentes en exceso en las adiciones de escoria, etc. Los límites prescritos por la *EB-4 - Aridos para Hormigón* y por las *Especificaciones Brasileñas de Cementos (EB-1; EB-2; EB-208; EB-758 y EB-903)*, desde que sean respetados, parecen ser suficientes.

Con respecto al agua de amasado, las recomendaciones sobre su calidad del párrafo 8.1.3 de la *NB-1/78* parecen ser seguras en relación con el problema de la corrosión de las armaduras.

Prácticamente todos los revestimientos en los cuales predominen la cal y el cemento portland como conglomerantes, no causan problemas a la armadura, por el contrario, hasta pueden auxiliar a su protección. No es el caso de otros revestimientos de base, como, por ejemplo, el yeso. El sulfato cálcico semihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ y el producto resultante de la reacción de su endurecimiento $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ tienen carácter ácido, principalmente en los yesos procedentes de la fabricación de fertilizantes (fosfogypsum). Este subproducto industrial puede dar lugar a pastas con pH próximo a 6 y, por consecuencia, siendo porosas e higroscópicas, contribuyen al aumento del riesgo de corrosión de las armaduras.

Del mismo modo hay que precaverse sobre el empleo indiscriminado de morteros preparados. La mayor parte de las normas y recomendaciones internacionales (véanse *anexos I a VIII*) y especialmente la *NB-1/78* cuentan con esta protección suplementaria que algunos tipos de morteros y revestimientos directamente aplicables sobre el hormigón puede que no posean.

8. INFLUENCIA DEL MEDIO AMBIENTE

Entre los principales tipos de medio ambiente característicos según la atmósfera donde se halla una estructura de hormigón se pueden citar (1):

8.1. Atmósfera rural

Región al aire libre, a gran distancia de las fuentes contaminantes del aire. Se caracterizan por su baja proporción de contaminantes. Tiene una

débil acción agresiva a las armaduras envueltas por hormigón siendo bastante lento el proceso de reducción de la protección química que proporciona el cubrimiento de hormigón por efecto de su alta alcalinidad. No existen gases ácidos en cantidad suficiente para penetrar a través de las superficies expuestas y, por consiguiente, acelerar el proceso de carbonatación que resulta más lento que el que se observa en otras regiones.

Los contenidos de SO_2 , H_2S , NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) y NH_3 (gases), SO_4^{--} , Cl^- , NO_3^- y NH_4^+ (sólidos) son prácticamente despreciables, a menos que haya una fuente natural, como por ejemplo estercoleros, que liberan NH_3 y SO_2 en su fermentación, o ríos y lagos fétidos que desprenden SH_2 . Normalmente tienen bajos contenidos de partículas en suspensión, de orden de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, eventualmente puede ser mayor la cantidad de partículas sedimentables, pero no son de material ácido y por lo tanto no aceleran obligatoriamente la corrosión. La lluvia en regiones rurales (ciudades pequeñas y sin industrias) tienen un pH «natural» del orden de 6,5.

8.2. Atmósfera urbana

Región al aire libre, pero dentro de centros de población mayores. Estas atmósferas de ciudades contienen, normalmente, impurezas bajo la forma de óxidos de azufre (SO_2), hollín ácido y otros agresivos tales como CO_2 , NO_x , H_2S , SO_4 , etc. Experiencias de *Vernon (1, 30)* comprobaron el notable efecto pernicioso del SO_2 en concentraciones de tan sólo 0,01 %, según se presenta en la figura 13.

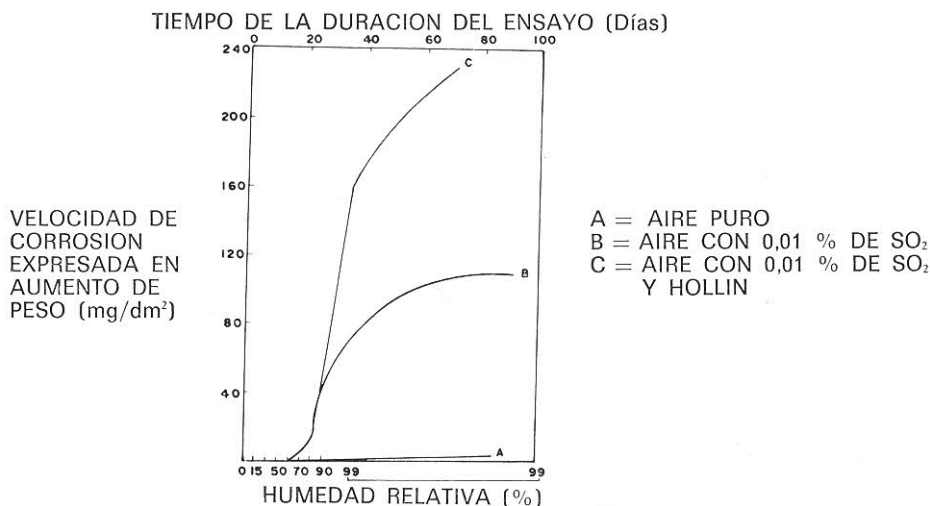


Figura 13.— Efecto de la humedad relativa y las impurezas del aire en la velocidad de corrosión atmosférica del hierro (Wexler, Finili y Wolynec, 1976) (1).

El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor de agua presente en el aire es variable, pero, para una temperatura dada se tiene un valor máximo de vapor de agua que un volumen de aire dado pueda contener. Dicho valor máximo, llamado saturación, varía con la temperatura, siendo mayor cuando ésta aumenta. La relación entre el valor real del contenido de vapor de agua en la atmósfera y el valor de la saturación para una temperatura dada se denomina humedad relativa (H.R.).

Según su humedad relativa, el aire se puede caracterizar como:

- a) aire seco H.R. hasta 30 %
- b) aire normal H.R. entre 50 % y 60 %
- c) aire húmedo H.R. entre 80 % y 90 %
- d) aire saturado H.R. de 100 %

La humedad es uno de los factores más importantes que afectan la velocidad de la corrosión atmosférica. Con todo, la simple presencia de agua en el aire no es causa de corrosión y un aire puro, saturado de vapor de agua, tan sólo determina una corrosión muy ligera en metales tales como, por ejemplo el hierro y el cobre. En la figura 13, la curva «A» representa la variación de la velocidad de corrosión del hierro en aire puro, en función de la variación de la humedad relativa y del tiempo de exposición. Se puede observar que, aun siendo la humedad muy elevada, 99 %, por un tiempo apreciable, la velocidad de corrosión del hierro se mantiene baja. Por el contrario —curva «B»— cuando se introduce en el aire 0,01 de SO_2 , la velocidad de corrosión aumenta considerablemente al alcanzar una humedad relativa de 75 %. Este valor, denominado *humedad crítica*, definida como la humedad relativa por encima de la cual el metal empieza a corroerse de forma apreciable. Dicho valor depende, además, de la presencia de contaminantes.

Los contenidos de SO_2 , en la Gran São Paulo varían de cerca 0,01 a un máximo de aproximadamente 1,0 p.p.m. y proceden de la quema de combustibles que contienen azufre (p.e., aceites combustibles o «fuel-oil»). La presencia de H_2S (gas sulfhídrico) se atribuye a la acción bacteriológica en ríos y pantanos, siendo de mayor concentración en estos lugares (márgenes) pudiendo alcanzar de 0,01 a cerca de 1 p.p.m. Los tenores de CO_2 pueden ser de 300 p.p.m. (natural en zona rural) a 600 p.p.m. El SO_4^{--} resulta, básicamente, de la oxidación del SO_2 , principalmente en presencia de amoníaco (NH_3 gas). Se forma una sal, el sulfato amónico $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, sólido que se mantiene en suspensión, pudiendo depositarse por impacto en las superficies de las estructuras. En atmósferas industriales donde haya mayores concentraciones de amoníaco (p.e.: resultantes de la obten-

ción de fertilizantes) el riesgo será mayor. En las superficies de hormigón, la citada sal puede dar origen a H_2SO_4 (ácido sulfúrico) y promover la despasivación del acero. Los tenores de NO_3^- y Cl^- son del orden de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los tenores de O_4^- varían de 10 a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las partículas en suspensión pueden ser del orden de 50 a $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y, siendo ácidas (hollín) no tan sólo contribuyen a la corrosión directa, sino también a una mayor retención de agua en las superficies de las estructuras a las cuales se adhieren por impacto. El agua de lluvia, en este caso, al transportar materias en suspensión, puede tener hasta $\text{pH} < 4$. Las partículas sedimentadas pueden llegar a cerca de $10 \text{ g}/\text{m}^2$ mes.

Los productos de corrosión en atmósferas rurales (puras) pueden ser protectores y hasta reducir la intensidad de corrosión, pues, en general, son compactos y adherentes. No es lo que sucede en atmósferas marinas, urbanas e industriales donde no hay formación de barreras protectoras y el proceso puede incluso autoacelerarse ya que la herrumbre promueve un aumento de la superficie expuesta y, por consiguiente, un aumento de condensación de la humedad y hollín que en un proceso cíclico vuelve a aumentar la corrosión.

8.3. Atmósfera marina

Se da en zonas al aire libre, sobre el mar, o cerca de la costa. La atmósfera marina contiene cloruros de sodio y de magnesio, bien sea en forma de cristales, o bien en forma de gotículas de agua salada; también puede contener sulfatos. Los contenidos medios en el océano Atlántico son del orden (31):

- iones sulfato (SO_4^{--}) $\approx 2.800 \text{ mg}/\text{l}$
- iones cloruro (Cl^-) $\approx 20.000 \text{ mg}/\text{l}$
- iones magnesio (Mg^{++}) $\approx 1.400 \text{ mg}/\text{l}$

Estos elementos son extremadamente agresivos y contribuyen, según vimos en el párrafo 1.2.4. a la aceleración del proceso de corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón, aun cuando se den en proporciones pequeñas.

Como punto de referencia se puede decir que la velocidad de corrosión en atmósfera marina puede ser del orden de 30 a 40 veces superior a la que se da en atmósfera rural (pura). De donde se deduce el hecho de que, procesos constructivos para obras situadas en el interior —donde una eventual corrosión tan sólo se nota al cabo de 8 años— no dan resul-

tado en zonas, litorales, donde se observan señales de corrosión a los dos o tres meses, y aún antes de concluidas las obras.

Los contenidos de gases agresivos en la atmósfera, aparte de los iones sólidos SO_4^{--} y Cl^- , dependen de las industrias locales, de la concentración urbana y de eventuales fuentes aisladas.

8.4. Atmósfera industrial

Región de aire libre en zonas industriales contaminadas por gases y cenizas, siendo más frecuentes y agresivos el H_2S , SO_2 y NO_x . El SO_2 se puede oxidar generando H_2SO_4 con todos los inconvenientes expuestos en el párrafo 1.2.4.

Los demás gases ácidos contribuyen a reducir la alcalinidad del hormigón y aumentan la velocidad de carbonatación destruyendo la película pasivadora del acero.

Las atmósferas industriales pueden acelerar de 60 a 80 veces más el proceso de corrosión que cuando se comparan con atmósferas rurales (puras) en situaciones equivalentes.

La acción dañina de estas atmósferas debe considerarse siempre conjuntamente con la humedad relativa de la región puesto que si ella no se alcanzara no habría riesgo de corrosión acentuada. Esta humedad crítica para el acero, a 25°C es próxima a 65-85 %.

Se puede concluir que las exigencias de cubrimiento y de protección de las armaduras embebidas en hormigón de estructuras situadas en ciudades «secas», tales como Brasilia y Belo Horizonte con H.R. $< 70\%$, no podrán ser las mismas de ciudades como São Paulo y Recife, donde la H.R. es superior a 80% , llegando a algunos casos como en Vitória (en la costa, estado de Espírito Santo) que en el año 1978 se mantuvo permanentemente por encima de 90% .

Cerrado el ciclo de factores regionales, también debe considerarse la acción de la temperatura. El efecto más sobresaliente de la temperatura se relaciona con la posibilidad de condensación de agua en las superficies expuestas, aparte de que un aumento de temperatura actúa como un catalizador o acelerador de cualquier proceso químico.

Para un tenor dado de vapor de agua en el aire, una disminución brusca de temperatura puede acarrear la condensación o, por lo menos, aumentar la H.R. pudiendo entonces sobrepasar la humedad crítica.

La *Fundación Instituto Brasileño de Geografía y Estadística* - IBGE publica periódicamente datos del Brasil, dando la humedad relativa media

anual y las isotermas de las temperaturas que pueden orientar un programa general de protección de las armaduras del hormigón, siendo, no obstante, más indicado obtener directamente los datos de la región donde deba implantarse la estructura.

Como regiones industriales típicas pueden citarse, en Brasil, Capuava, Santo André, Cubatão, Votorantin, donde el tenor de partículas en suspensión puede llegar a $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de partículas sedimentables a cerca de $100 \text{ g}/\text{m}^2$ mes. Los tenores de SO_2 , H_2S , NH_3 son del orden de 1 p.p.m. y SO_4^{--} , Cl^- y NO_2^- son de unos $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Puede comprobarse que estos contenidos todavía están muy por debajo de los límites que para los agentes corrosivos se señalan en la bibliografía especializada.

En realidad los estudios experimentales tienen como restricción principal el tiempo y, por lo tanto, no siempre son capaces de cuantificar las influencias de los tenores bajos. Lo cierto es que la acción permanente de los tenores bajos es tanto o más perniciosa que la acción de altos tenores por breve tiempo. Debe considerarse además el hecho de ser porosas las estructuras de hormigón, por lo cual absorben y retienen los elementos agresivos, aumentando así, de continuo, la concentración superficial de sustancias corrosivas.

8.5. Atmósfera viciada

Se presenta en locales cerrados con baja tasa de renovación del aire. En estos locales puede que se intensifique la concentración y hasta que se generen gases agresivos para las armaduras de hormigón.

El ejemplo más significativo es la acción del ácido sulfúrico generado en colectores y sifones de las aguas residuales, a partir de la presencia de sulfuros (S^{--}). A medida que los desagües fluyen por la red colectora disminuye gradualmente la concentración del oxígeno disuelto, debido a una demanda superior al aprovisionamiento. En algún punto del sistema el oxígeno queda agotado y aparecen los sulfuros.

Según *Ludwig y Almeida* (32), el alto contenido de sulfuros en los colectores puede tener su origen en dos causas:

- a) Descarga de algunos desagües industriales en los colectores; y
- b) Productos resultantes de la acción bacteriológica, siendo éste el factor principal.

El agua potable contiene una cierta proporción de sulfatos que es grandemente aumentado después de su uso. Las bacterias necesitan oxígeno para asimilar la materia orgánica y cuando no existe oxígeno libre dispo-

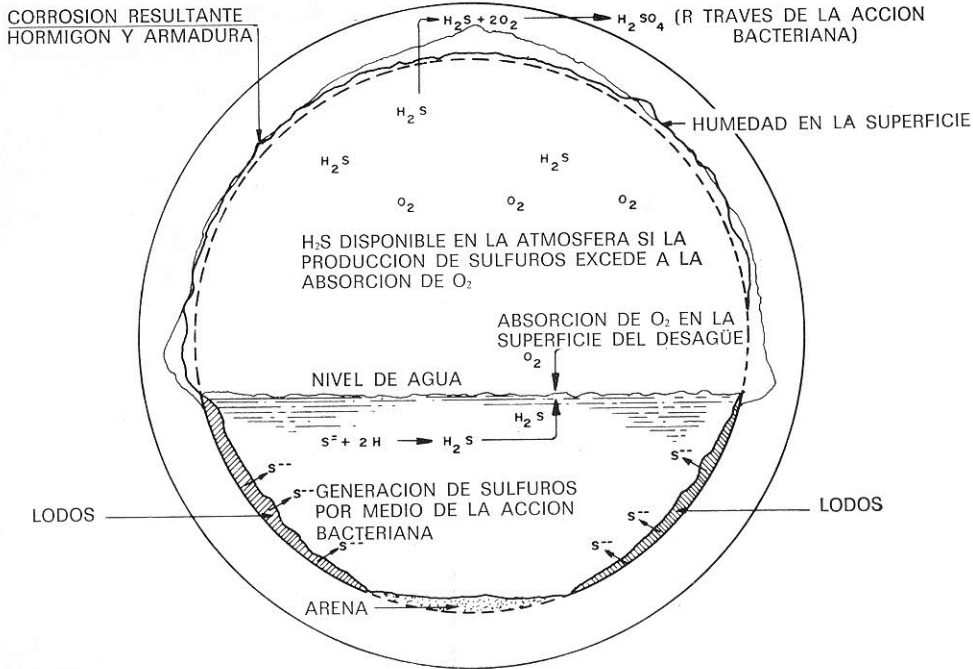


Figura 14.—Formación de ácido sulfúrico en colectores de aguas residuales (Ludwig y Almeida, 1979) (12).

nible, ciertas especies lo obtienen de los iones sulfato, SO_4^{--} , dejando libre el ion sulfuro, S^{--} . De la reacción del sulfuro con el agua resultan el ion HS^- y el gas sulfhídrico H_2S .

Este gas, liberado, es absorbido en las partes superiores del colector siendo nuevamente oxidado por acción de bacterias aerobias, transformándose en ácido sulfúrico, según se indica en la figura 14 (24).

La formación de sulfuros depende esencialmente de la presencia de lodos, de la existencia de bacterias aerobias y anaerobias y de la baja proporción de oxígeno disuelto. En conducciones con gran pendiente, o bajo presión, o aun conteniendo compuestos químicos que actúen como bactericidas (cal, agua oxigenada, etc.) no hay formación de sulfuros (33).

La acción del ácido sulfúrico, así como la de otros ácidos, no se limita únicamente al ataque de la armadura de acero, que debe estar bastante apartada y protegida, sino también al mismo hormigón, disgregándolo por efecto de la disolución química. Bajo este aspecto parece ser un punto determinante la medida de la alcalinidad total del hormigón, que será función no tan sólo de la naturaleza del cemento, sino también de la naturaleza de los áridos, pudiéndose obtener una previsión de la velocidad de disgregación del hormigón (32). Faltaría entonces dotar a la armadura de un recubrimiento total que sería la suma de dos:

- a) un cierto espesor de cubrimiento que la proteja de la acción de gases agresivos (ácido sulfúrico) que penetren por permeabilidad, absorción o difusión; y además,
- b) un cierto espesor de hormigón que actuara como «capa de sacrificio» pudiendo consumirse después de un determinado plazo de vida útil de la obra.

La presencia de sulfuros y de gas o ácido sulfúrico puede dar origen a hidrógeno naciente (solamente con pH de 5 a 8,8), que, en estado atómico, se introduce en la estructura del acero, volviéndolo más frágil y provocando un ataque intergranular. Este ataque lleva a la formación en la barra de fisuras localizadas y siendo la armadura pre o postensada puede romperse bruscamente.

Este riesgo de corrosión bajo tensión hace que en las atmósferas viciadas, donde predominen S^{2-} y H_2S , no sean aconsejables las estructuras de hormigón pretensado.

Otros ambientes viciados, donde predomina la acción bacteriológica, son citados por *Petrocokino* (10), debiendo ser considerados como casos especiales.

Algunas naves industriales que abrigan a ciertos procesos químicos también pueden considerarse como atmósferas viciadas. Las concentraciones de SO_2 , NH_3 , H_2S , etc. pueden ser más de 100 veces mayores a las observadas en la atmósfera al aire libre de la comunidad circunvecina. En determinados casos como fábricas de papel y celulosa, elaboración de rayón, fertilizantes, galvanoplastia, quemadores de aceites combustibles para hornos, etc., los cuidados en la prevención de la corrosión deben intensificarse, pudiendo inclusive ser necesario revestir las estructuras con productos inertes e impermeables.

9. INFLUENCIA DE LA MICRORREGION DE LA ESTRUCTURA

La humedad relativa en una obra puede ser variable según la microregión que se considere. Por ejemplo, la humedad relativa varía dentro de un mismo local, disminuyendo con el aumento de la distancia al suelo o aumentando con la distancia a las fuentes de calor. Junto al piso la H.R. puede ser 10 % a 20 % más alta que junto al forro de la techumbre (1). Es más frecuente que surja la corrosión en los «pies» de los pilares, arras-trándose lentamente hacia las regiones más altas, que su comienzo sea con mayor intensidad en las partes superiores.

Las construcciones nuevas, recién terminadas, tienen una H.R. más alta que estructuras antiguas, debido a la humedad natural de los materia-

les y a los procesos constructivos usados en la edificación convencional. Afortunadamente este período coincide con la mayor capacidad de protección química del recubrimiento de hormigón que todavía no estará fuertemente carbonatado. En el caso de almacenaje de aceros este hecho debe observarse cuidadosamente, pues desde que el plazo sea largo, se corre el riesgo de la corrosión acentuada de las armaduras.

Lugares por naturaleza más húmedos y con mayor riesgo de condensación, tales como cuartos de baño, cocinas, áreas de servicio, pasarelas, escaleras, etc. suelen, principalmente en estructuras de hormigón aparente, presentar síntomas de corrosión más rápida e intensamente que en lugares más secos de la obra.

Es lo que se nota en las placas de cubierta, expuestas a la radiación solar durante el día y luego al enfriamiento nocturno. Hay siempre el riesgo de condensaciones, principalmente en la parte inferior de la placa, cuando se trata de depósitos de agua, y aun en la parte superior. Estos ciclos de mojado y secado alternados contribuyen a acelerar la velocidad de lixiviación del hidróxido cálcico, siendo causa de una carbonatación precoz y de un descenso de la alcalinidad del hormigón. Generalmente la corrosión es inevitable, pudiendo aparecer tanto al terminarse la construcción como pasados 10 o más años, según se puede ver en la *foto 11*.

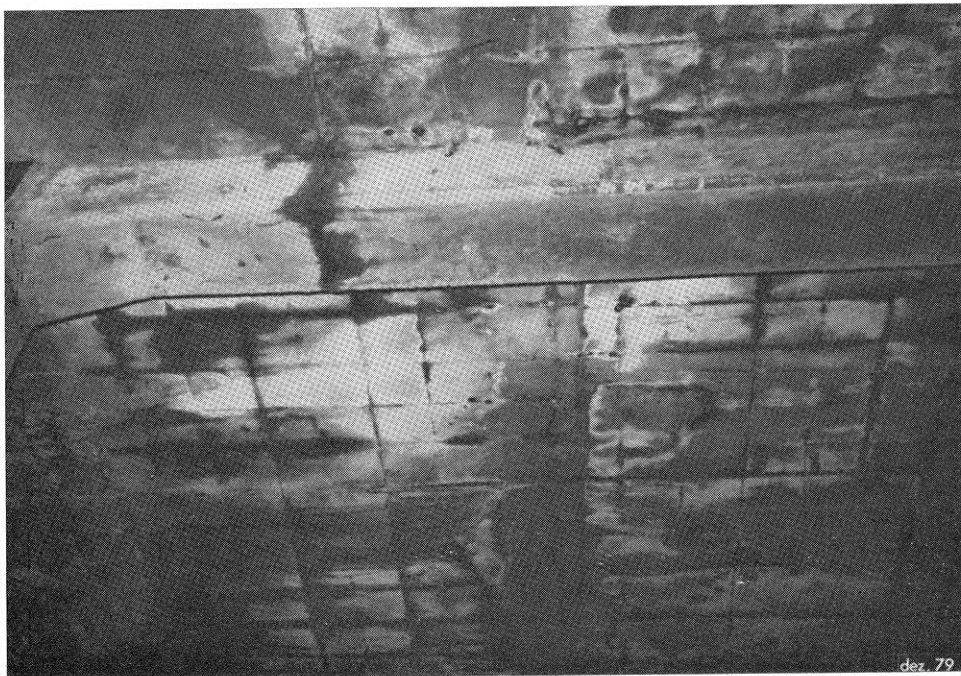


Foto 11.— Corrosión de las armaduras en una placa de cubierta de depósitos.

Los lugares húmedos y con poca ventilación también están más propensos a la corrosión puesto que pueden dar origen a mohos y hongos que, en su metabolismo, liberan productos orgánicos ácidos que contribuirán al aumento de la carbonatación y descenso del pH del recubrimiento de hormigón.

En las tuberías de hormigón armado que no trabajen a plena sección, son la región superior y la de contacto aire/fluido las que corren más riesgo de ataque, debido a las diferencias de aireación y concentración de sales. La parte sumergida, generalmente, se comporta bien debido a la protección natural que le ofrece el propio fluido al dificultar el acceso de oxígeno.



Foto 12.— Corrosión y degradación de estructuras de hormigón armado en ambientes industriales. Los gases y líquidos ácidos (proceso de galvanoplastia) que penetran en el piso y suelo destruyeron el hormigón y parte de la estructura. Nótese la comprobación de la alcalinidad con auxilio de la fenolftaleína, apreciándose trechos alcalinos alternando con trechos ácidos.

En las instalaciones industriales se debe considerar la acción de algunos tratamientos químicos como, por ejemplo, la galvanoplastia. Las inevitables salpicaduras de los baños ácidos y alcalinos pueden impregnar la estructura y contribuir, unidos a los gases emanados, a la corrosión según se ve en la *foto 12*.

El mayor o menor acceso de oxígeno también puede ser un hecho que contribuya a las diferencias de grado de corrosión en un mismo elemento estructural, como, por ejemplo, se indica en la *figura 15*.

Según se observa las zonas sometidas a alta concentración de sales (variación de mareas y salpicaduras) son las más críticas en las estructuras marinas, así como las zonas sometidas a condiciones alternas de aireación y humedad. En las zonas de menor acceso de oxígeno (que actuarán como ánodo) próximas a otras zonas de mayor acceso de oxígeno (que actuarán como cátodo) es donde se localizan los mayores riesgos de intensidad y problemas de corrosión de las armaduras en estructuras semienterradas.

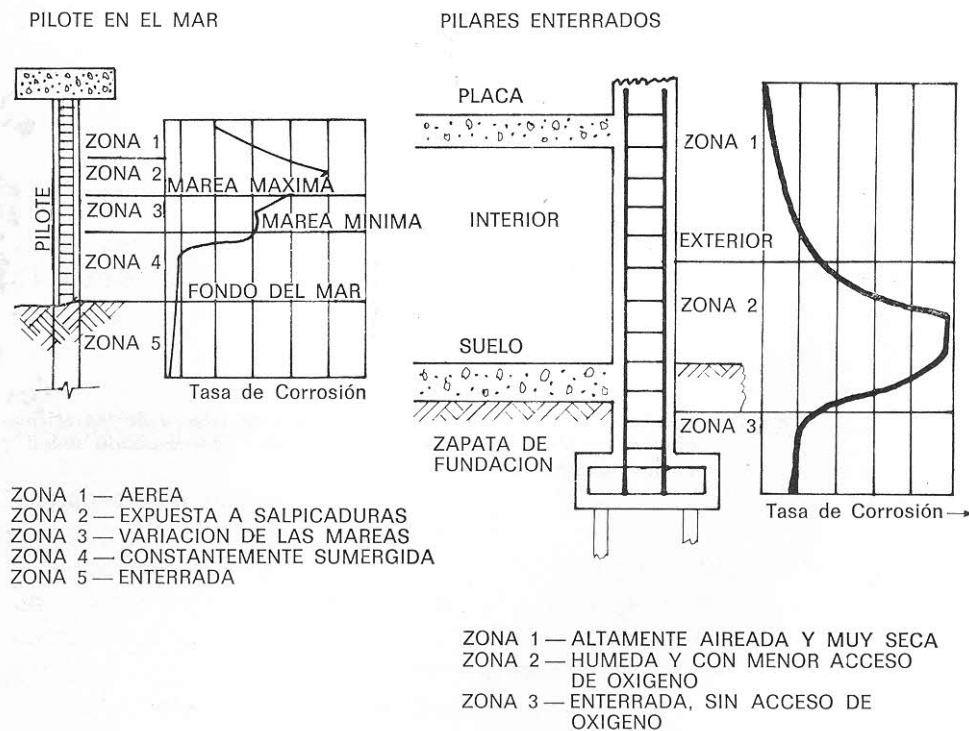


Figura 15.—Variación de las tasas de corrosión según la posición relativa de la región de un mismo elemento estructural.

El aumento de la temperatura ambiente y la disminución de la humedad relativa hace que las aguas salinas que penetraron en el hormigón transporten parte de las sales a la superficie de éste, causando las eflorescencias. Posteriormente, con el aumento de la humedad relativa y la acción del agua, dichas sales se disuelven de nuevo y reingresan al interior del hormigón. Después de varios ciclos se forma una costra con gran concentración salina que puede contaminar, según la permeabilidad del hormigón, hasta un espesor de 3 cm. Esta alteración y deterioración superficial, que puede alcanzar la armadura, viene facilitada por las características de algunas sales que presentan alta higroscopicidad y pueden aumentar de volumen disgregando el hormigón superficialmente. De ahí la necesidad de recubrimientos y de hormigones adecuados, estudiados especialmente para las partes de la estructura sujetas a la acción de las mareas.

(Concluirá)

La responsabilidad de las opiniones sustentadas y de las afirmaciones vertidas en los artículos firmados, corresponde única y exclusivamente a sus autores.