

la protección contra la corrosión en los hormigones armado y pretensado

STEFAN SORETZ
Dr. Ingeniero h. c.

Zement und Beton n.º 36, julio 1966

1. introducción

La protección contra la corrosión de las varillas de las armaduras viene guiada por el criterio tradicional (véase, p. e. (1)); de que las mencionadas varillas se ven sometidas a un contacto superficial con el conglomerante en el momento de proceder al hormigonado, el cual envuelve al acero con una capa de protección pasiva. En tanto permanezca esta capa protectora, perdurará también la antedicha protección del acero. Al objeto de hacer más prolongada la acción defensiva de la capa, debe estar protegida, a su vez, por un revestimiento suficientemente espeso y compacto de hormigón u mortero.

El desarrollo de numerosas y constantes experiencias se ha orientado en las dos últimas décadas a la investigación básica de los fundamentos de la corrosión, obteniéndose importantes frutos. El hecho anteriormente mencionado, de la protección pasiva de la armadura por parte del hormigón, ha hecho dedicar principalmente las investigaciones a la determinación de su mecanismo. Solamente en el último coloquio de la Comisión de la RILEM, dedicada al estudio de la corrosión, celebrado en Wexham, en septiembre de 1965, se discutieron y adjugaron informes al respecto, en número superior a los 200 trabajos (véase también en este sentido (2)). El fenómeno general de la corrosión de los metales, se ha mostrado extraordinariamente complejo, ampliándose, en los casos concretos del hormigón armado y hormigón pretensado, en un elevado número de parámetros para cuya determinación se precisan innumerables estudios y experiencias, con la alternativa de alcanzar sólo progresos muy limitados. Esta labor resulta además dificultada por el hecho de que las variaciones en los parámetros que actúan normal y simultáneamente, únicamente pueden conjugarse de forma muy aproximada en los ensayos de laboratorio, y aún entre éstos, sólo una escasa proporción son reproducibles defectuosamente en lo que se refiere a su comportamiento en circunstancias determinadas. Se trata, especialmente en los casos del hormigón armado y del hormigón pretensado, del problema de la protección permanente contra la corrosión, cuya investigación resulta cohibida por el problema complementario de que los estudios, en circuns-

tancias normales, deben prolongarse durante décadas, lo que exige de tales métodos de investigación verdaderos derroches de tiempo, ya que no se dispone de tablas comparativas formuladas en relación con las circunstancias naturales.

Esta oleada de comunicaciones presentadas en la RILEM pudiera llevar al ánimo del interesado la creencia de que esta acción protectora no sea completamente satisfactoria, como imaginaban nuestros antecesores.

Por este motivo, los técnicos responsables y los ingenieros de la construcción, han comenzado a estudiar construcciones de hormigón armado erigidas hace muchos años, con el fin de establecer fundamentos básicos extraídos de los resultados de la experiencia y refrendar los hallazgos constructivos que se han ido produciendo entretanto con los hechos retrospectivos.

CARPENTIER ha informado acerca de sus investigaciones sobre las construcciones de puentes de los ferrocarriles nacionales franceses (3), con el estudio de daños en 3.000 puentes de hormigón armado, debidos principalmente a deterioros por corrosión. En casi el 1 % de los casos, se detectaron daños por corrosión, atribuibles a deficiencias en el proyecto o construcción. En la gran mayoría de los casos de deterioro, la corrosión se debía a escasez en espesor y porosidad en el revestimiento de hormigón, lo que traía por consecuencia la formación de fisuras longitudinales. Aquellas que discurrían en sentido transversal a la armadura, presentaban anchuras de hasta 0,7 mm, si bien, y aún en presencia de atmósferas agresivas, no daban paso a la corrosión en aquellos casos en que la cobertura de hormigón era satisfactoria en cuanto a espesor y compacidad.

La comisión sobre la corrosión del IVBH hizo circular entre los miembros los resultados de una encuesta relativa a los daños causados por la corrosión en hormigón armado y pretensado, acerca de los cuales informó LOUIS (4). Un análisis ponderación, dió como resultado que los daños habían sido ocasionados en su totalidad por fallos de proyecto y construcción. En un 40 % de los casos respondían a deficiencias de espesor, debiéndose un 39 % al empleo de un hormigón poroso y mal compactado como causa próxima de la corrosión sufrida por la armadura. El resto se dividía entre deficiencias diversas de proyecto y de ejecución.

Investigaciones análogas fueron llevadas a cabo por las comisiones holandesa (5) e inglesa (6) de hormigón, alcanzándose los mismos resultados.

SOCOTEC (7) se ha ocupado, desde 1945 hasta la fecha, de 76 casos de deterioro por corrosión en el hormigón armado. El número total podría incrementarse si se añadieran algunos casos en vías de estudio actualmente. La relación de daños se distribuye como sigue, referidos a los diversos motivos de la corrosión:

- 22 construcciones a la intemperie a la orilla del mar;
- 12 construcciones a la intemperie próximas a la costa, en el territorio noroccidental de Francia;
- 6 construcciones a la intemperie en el resto del territorio francés;
- 6 construcciones en presencia de elementos agresivos, en la industria química;
- 30 debido a la adición de Cl_2Ca para acelerar el fraguado del hormigón.

Los tres primeros grupos integran, aproximadamente, el 40 % de los casos de deterioro por corrosión originados por ataques atmosféricos normales. La investigación de los daños registró una cobertura de hormigón demasiado escasa a tenor de las normas actualmente vi-

gentes para las construcciones de hormigón armado. Resulta sorprendente comprobar cómo se dan muchos casos de deterioros en elementos constructivos prefabricados, cuya armadura muestra un recubrimiento insuficiente. El informe hace notar que los gastos de restauración fueron, a menudo, muy elevados, llegando en ocasiones a recomendarse la demolición de la construcción.

Si se comparan estos 76 casos de daños graves producidos en el curso de 20 años a consecuencia de defectos de construcción, con las decenas de miles de construcciones de hormigón armado llevadas a cabo en Francia durante esta época, el porcentaje de casos arroja una frecuencia inferior al uno por mil.

Para concluir, hay que dejar sentado que los daños por corrosión en los hormigones armado y pretensado únicamente se presentan cuando no se observan las reglas habituales en la técnica de la construcción y se cometen, por tanto, errores de ejecución. En lo que se refiere a la repetición de tales fallos, puede establecerse un porcentaje estimativo superior al 1 % de todas las construcciones; en la inmensa mayoría de los casos puede practicarse la restauración a un coste relativamente reducido, en comparación con el valor total de la obra. La frecuencia de deterioros graves con elevados gastos de saneamiento, puede estimarse, como máximo, en un uno por mil.

Cuando se considera la ejecución de construcciones de hormigón armado y pretensado como simple labor de montaje de prefabricados, debe establecerse una norma comparativa específica para las industrias de producción de materias primas, elaboración y prefabricación. También aquí pueden presentarse deficiencias que, por lo general, afectan exclusivamente a pequeñas partidas de elementos, o a determinados componentes, que pueden reclamar una selección cuando los defectos excedan a determinado límite o tolerancia. Si se adoptan tolerancias muy rigurosas o la selección se basa en magnitudes de décimas, pueden resultar incrementos de costes considerables, llegando muy rápidamente a los límites tolerables.

Lo mismo puede decirse del hormigón armado y pretensado. Sin embargo, no hemos hecho excesivo hincapié al respecto, ya que la reducida frecuencia en los fallos que actualmente se registra no se incrementará en el futuro; antes bien, se reducirá en mayor medida.

Aun cuando una información general en este sentido será incompleta si se pretende abarcar la totalidad, no quisiéramos pasar por alto el caso de un proceso deficiente en los hormigones armado y pretensado. Entre los más importantes, se indican seguidamente dos que, en opinión del autor, merecen la oportuna consideración.

Ya hace muchos años que viene estudiándose la práctica de calentamiento para el fraguado rápido de las piezas prefabricadas de hormigón armado, al objeto de sustituirlo por cualquier otro producto de resultados sensiblemente análogos, y que, al mismo tiempo, sea más económico. El sistema que cumple este objetivo consiste en la adición de Cl_2Ca para la aceleración del fraguado, aun cuando así se provoca una alteración en la acción protectora del hormigón sobre el acero de la armadura, como seguidamente veremos. Aproximadamente el 40 por ciento de los casos de deterioro que se han presentado en Francia han sido motivados por ello, según se ha demostrado con plena evidencia que refleja un proceso deficiente. Otro sistema para alcanzar esta meta consiste en la utilización de un cemento aluminoso muy acreditado para una función completamente distinta, que tiene la propiedad de poseer un fraguado inicial de extremada rapidez asociado, sin embargo, con el inconveniente de que hace desaparecer la mencionada acción protectora pasiva de la superficie del cemento en circunstancias determinadas, aunque habituales en las construcciones de hormigón armado; haciéndose, por el contrario, tan agresiva que ella misma provoca la aparición de corrosiones.

En tiempos más recientes, se ha insistido en la práctica de sistemas análogos para el fraguado rápido de elementos pretensados de hormigón, dando con ello origen a multitud de deterioros notables, ya que, junto a la corrosión habitual, se registran ataques corrosivos en los hilos tensores, como fue comprobado sin duda de ninguna clase (8). Con la abundante experimentación sobre casos aislados llevada a cabo hoy día, se extendió la problemática generalizada acerca de la garantía anticorrosiva de las construcciones en hormigones armado y pretensado.

Sobre este particular, se han planteado las siguientes cuestiones:

¿Existe una protección pasiva generalizada de la armadura, en virtud del contacto superficial del cemento?

¿Bajo qué condiciones puede asegurarse la vigencia de esta protección, en lo que concierne a la duración de un soporte?

¿Son suficientes nuestras actuales normas para el proyecto y ejecución de soportes de hormigón armado y pretensado con el fin de garantizar la protección de la armadura y la duración de las construcciones y, en caso contrario, qué modificaciones con- vendría introducir?

2. criterios básicos sobre la corrosión y la protección

Las modernas teorías, universalmente aceptadas en la actualidad, explican la corrosión como un proceso electroquímico, para cuya evolución se precisa la presencia de soluciones acuosas de sales, bases o ácidos, y de oxígeno. Si falta alguno de los dos grupos, la corrosión es imposible. En el caso del hormigón armado no existe por ello peligro alguno de corrosión si el ambiente circundante es seco o contiene agua, ya que, en cualquier caso, falta uno de los elementos precisos para el proceso electroquímico, ya sea el agua o el oxígeno.

Si se destruye la cobertura de hormigón de la armadura en un elemento constructivo de hormigón armado, las varillas desnudas presentan una coloración gris cemento. La protección anticorrosiva de esta película superficial, puede comprobarse realizando la siguiente experiencia: Una varilla desnuda y otra que no haya estado en contacto con el hormigón, pero que no presente síntoma alguno de oxidación, se someten a riegos repetidos. Al cabo de un cierto tiempo, la última de ellas presenta una precipitación apreciable de óxido, mientras que la primera continúa ostentando invariablemente su tono gris. La capa superficial de cemento protege de esta corrosión a la porción de armadura que se ha descubierto. Con ello, se demuestra la existencia de la denominada capa protectora.

Esta capa protectora, sin embargo, revela una extraordinaria sensibilidad a los ataques mecánicos y químicos. La protección necesaria es una resultante de la cobertura de hormi- gón y puede considerarse completa si existe estanquidad absoluta contra gases y líquidos, e ilimitada resistencia mecánica. Como quiera que ambos requisitos ideales de cobertura no son susceptibles de cumplirse totalmente, hay que contentarse con una protección limitada, aunque siempre suficiente para asegurar una duración ilimitada de la construcción.

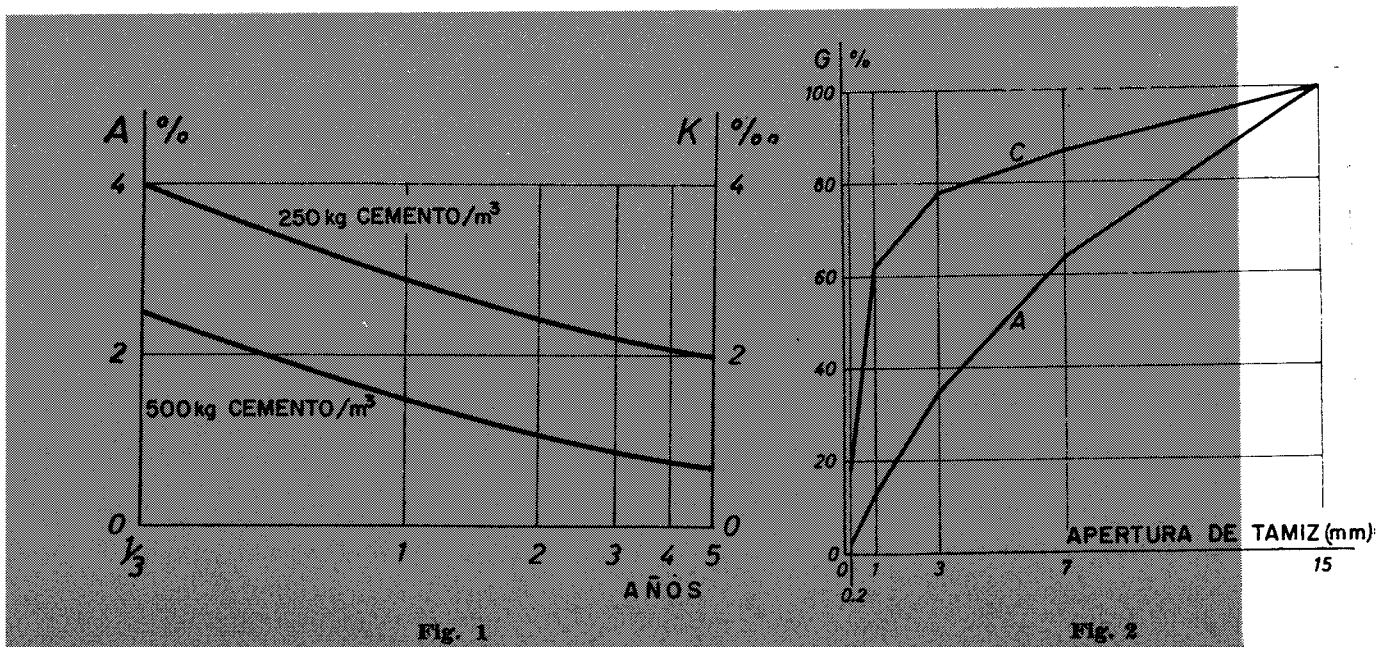
Prácticamente, todos los productos de hidratación del cemento son fuertemente alcali- nos y comunican al agua alojada en los poros del hormigón una reacción básica con un $\text{pH} = 12,5$. En soluciones fuertemente alcalinas, con un $\text{pH} \geq 10$, el acero se mantiene pasivo

ante la corrosión y queda protegido ante la misma, en tanto perdure tal situación. A causa de las influencias ambientales, puede verse tan seriamente reducida la alcalinidad de la fase líquida, que llega a desaparecer su acción protectora. Haremos referencia, más concretamente, a las circunstancias que pueden conducir a tal situación.

El deterioro mecánico de la capa protectora en el hormigón armado puede proceder, en primer lugar, de la existencia de fisuras, cuya existencia debe siempre inducir a la desconfianza, por lo cual volveremos sobre ello más adelante.

3. estanquidad de la cobertura de hormigón

La estanquidad de la cobertura de hormigón, de importancia capital para la protección anticorrosiva de la armadura, depende, además, del espesor, y sobre todo, de la capacidad de absorción de agua, de la penetrabilidad al aire del hormigón. Cuanto más compacto resulte el hormigón frente a la penetración de humedad y gases, tanto mayor será su eficacia protectora.



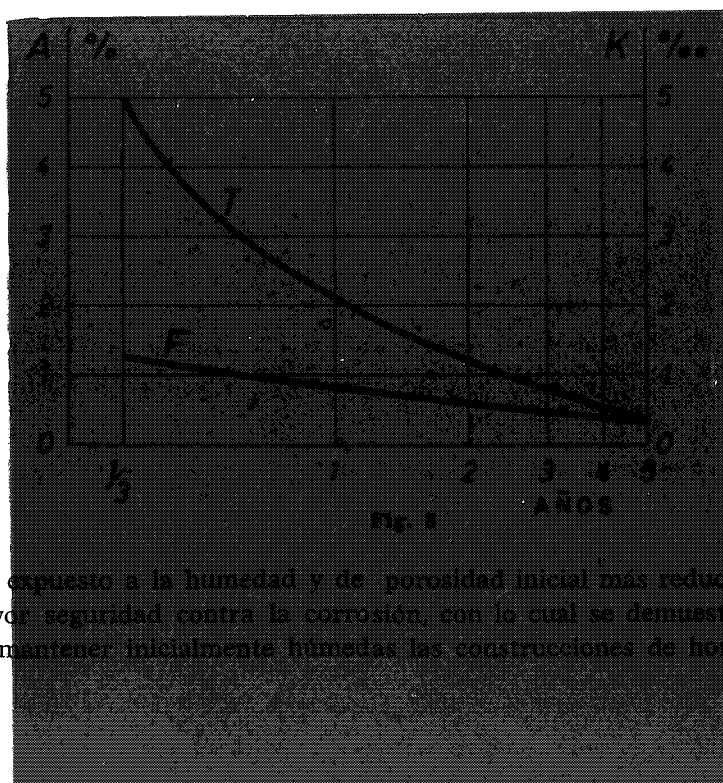
En la figura 1 se representa la capacidad de absorción de agua por inmersión (A) y por capilaridad (K) de hormigones con distinto contenido de cemento y áridos de granulometría bien estudiada, en función de su período de endurecimiento. Las probetas se mantuvieron inicialmente en ambiente húmedo durante 28 días, sometiéndose después a la intemperie. El grado de absorción de agua se determinó al cabo de 4 días de secado a 40° C (9).

La capacidad de absorción de agua del hormigón de buena calidad disminuye al aumentar el contenido de cemento y al crecer el endurecimiento. El incremento de compactación del hormigón en el transcurso del tiempo, puede explicarse, por una parte, por la progresiva hidratación y, por otra, a causa de la llamada carbonatación, que estudiaremos con detalle más adelante.

En la figura 2 se representan las curvas granulométricas de dos clases de áridos para hormigón, que difieren entre sí en el contenido de partículas de grano fino 0/1. Así pueden prepararse dos hormigones con la misma consistencia e idéntica relación agua/cemento (0,6), en los cuales para un árido A, pobre en arena fina, se necesitarían 250 kg/m³ de cemento, y para uno C, rico en ésta, 400 kg/m³. La densidad del hormigón A, con sus 2.350 kg/m³, se encuentra dentro de los límites de un buen hormigón, mientras que el C asciende solamente a 2.050 kg/m³. El hormigón C contenía, por lo tanto, un 15 % más de poros que el hormigón A. La absorción de agua del hormigón C es varias veces superior a la que corresponde, según el ejemplo anterior, a un buen hormigón.

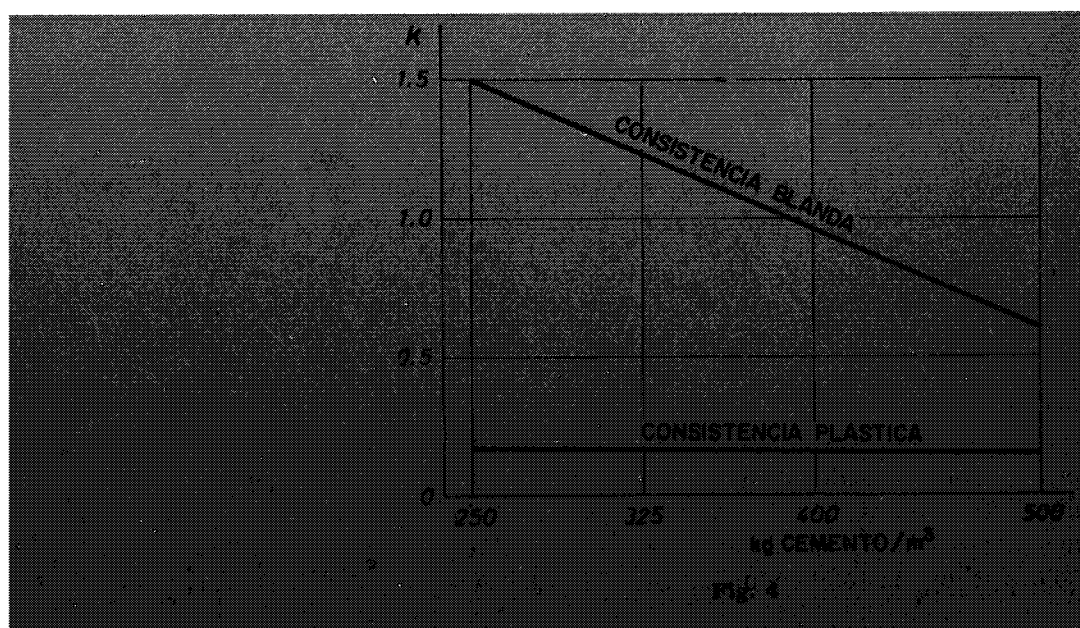
El hormigón rico en arena fina, y muy poroso, no es adecuado para las armaduras, a pesar de su elevado contenido en cemento, y la buena resistencia a la compresión de su capa protectora. Gracias a los métodos actualmente utilizados para la elaboración y compactación del hormigón es posible prepararlo, sin dificultades, con un peso específico de 2.300 a 2.400 kg/m³. En las normas antiguas encontramos, por el contrario, que se da una relación peso/volumen, para el hormigón, de 2.200 kg/m³. La diferencia es el fruto del progreso en la técnica del hormigón, y lo confirma el hecho de que los conceptos acerca de la duración del hormigón armado, establecidos basándose en las antiguas construcciones, pueden ser de aplicación a las obras modernas porque el hormigón es realmente más compacto.

La influencia de las condiciones iniciales de endurecimiento sobre la capacidad de absorción de agua por inmersión (A) y por capilaridad (K), se representa según (9) en la figura 3. El hormigón F fue sometido durante los tres primeros meses al aire, con una humedad relativa del 90 %, mientras que el hormigón T se desecó al aire con humedad relativa del 50 por ciento. A continuación, se expusieron las probetas a la intemperie y a los ataques atmosféricos. La capacidad de absorción de agua del hormigón sometido a la prueba en seco, es inicialmente cuatro veces superior, aproximadamente, a la que corresponde al otro. La compactación natural del hormigón mantenido inicialmente en seco, es al final de su exposición a la intemperie, especialmente elevado y habría de atribuirse, en principio, a las consecuencias de la desecación inicial sobre el retraso en el endurecimiento, e incluso en parte también a la carbonatación reforzada en el período inicial.



El hormigón expuesto a la humedad y de porosidad inicial más reducida, ofrece a la armadura una mayor seguridad contra la corrosión, con lo cual se demuestra una vez más la conveniencia de mantener inicialmente húmedas las construcciones de hormigón.

Al lado de la capacidad de absorción de agua, también desempeña un importante papel en la protección anticorrosiva de la armadura la penetrabilidad del hormigón al aire; cuanto más pequeña sea tanto más completa es la acción protectora del recubrimiento. Ya hemos comentado en este sentido que no existe un hormigón absolutamente impermeable al aire. En hormigones con árido de granulometría cuidada, el distinto contenido de cemento y los diversos tipos de consistencia entre plástica y blanda determinan, según los diversos contenidos de humedad, el coeficiente (k) de penetrabilidad del aire. Los resultados, según (9), se representan en la figura 4.



La línea inferior corresponde a un hormigón plástico bien compactado, mantenido con anterioridad a la experiencia, durante tres días, en un 65 % de humedad relativa del aire, con lo cual presentó el grado más reducido de penetrabilidad del aire. La línea superior se refiere a un hormigón blando desecado con anterioridad al ensayo, durante doce días, a 40° C, el cual presenta un mayor grado de penetración del aire. Un hormigón bien compactado, y sometido a un grado de humedad adecuado, es prácticamente impenetrable al aire, y asegura al acero la mejor protección antioxidante. Al aumentar la porosidad del hormigón, se acrecienta su penetrabilidad al aire y, al mismo tiempo, se atenúa su acción protectora de la armadura. Mediante la elevación del contenido de cemento puede neutralizarse, sólo dentro de límites estrechos, la penetrabilidad del aire. La falta de resistencia al aire del hormigón blando, así como su porosidad, aumentan con el nivel creciente del hormigonado.

Para resumir lo expuesto hay que dejar establecido que un hormigón con áridos de granulometría adecuada, elaborado como una masa plástica, con el mínimo posible de agua, bien compactado y mantenido, al menos inicialmente, en estado suficientemente húmedo, presentará una estabilidad máxima a los ataques de la humedad y de los gases, condición precisa para una protección ideal contra la formación de capas de óxido en su armadura.

4. carbonatación

Se ha venido diciendo que el acero de la armadura, situado en el seno de un hormigón compacto y de buena calidad, se encuentra en un medio altamente alcalino que le hace mantenerse en un estado electroquímico pasivo, manteniéndose protegido contra la posible oxidación provocada por la agresión de la humedad o del oxígeno. Los álcalis presentes en el cemento tienen desgraciadamente la tendencia a asociarse con ácidos o sales (por ejemplo CO_2 , SO_3 , ClNa , Cl_2Ca), en forma más o menos completa, hasta alcanzar un pH más reducido. Si el pH cae por debajo de 8, la capa de cobertura pierde su influencia pasiva sobre el acero, y éste puede llegar a oxidarse por entrada de humedad u oxígeno.

En presencia de agua de mar, incluso en presencia de su propia bruma, de sustancias de la industria química de acción análoga en estado fluido (gas, vapor o líquido), o de aguas con alto contenido en yeso (cuando se trata de construcciones profundas), es posible proteger el hormigón, eligiendo cementos adecuados y de elevada resistencia.

La única protección eficaz de la armadura contra la ya mencionada acción agresiva del Cl_2Ca , cuando éste se aplica al hormigón como acelerante del fraguado, consiste en evitar la adición de tal sustancia al hormigón armado o pretensado, ya que no parece posible conseguir una distribución uniforme sobre la totalidad del volumen del hormigón. Las inevitables irregularidades, llevan fatalmente a la formación de células de corrosión, que con su evolución en el futuro llevarán el acero a su destrucción.

Durante el secado, el hormigón expulsa el agua contenida en sus poros. En este momento los poros se llenan de aire y entonces el dióxido de carbono contenido en el mismo puede reaccionar con los compuestos alcalinos existentes en el cemento. Este proceso se acentúa con el tiempo, en profundidad e intensidad, al aumentar la desecación. En la transformación puede disminuir la alcalinidad del hormigón, y con ello perderse la acción pasiva de protección del acero. Esta transformación recibe el nombre de carbonatación, aun cuando en ella no solamente resulta afectada la cal libre contenida en el cemento, sino también el hormigón, incluso aquel que haya sido preparado con cementos que no contengan prácticamente nada de cal libre.

Por este motivo, la transformación puede realizarse con intensidad máxima cuando el hormigón permanece normalmente expuesto al aire seco, o no provocarse, con un hormigón mantenido en ambiente húmedo.

Para un hormigón armado mantenido en ambiente seco no es necesaria la acción protectora química de la cobertura sobre el armazón, ya que el riesgo de oxidación no existe. El hormigón mantenido en seco durante un período prolongado posee, no obstante, a consecuencia de la disminuida alcalinidad en caso de humedecimiento ocasional, una eficacia de protección química nula o muy reducida contra la oxidación del acero situado en su seno. Esta es una circunstancia a tener en cuenta en caso de modificaciones, previstas o inesperadas, que puedan incidir sobre las construcciones de hormigón armado.

En cuanto a un hormigón situado normalmente en ambiente húmedo, la acción química protectora de la cobertura no es específicamente necesaria a la armadura, incluso cuando se presenta en amplia medida, y constituye un elemento complementario de seguridad. Este hecho es de la mayor importancia, aun cuando entre muy amplios círculos existen graves interrogantes acerca de la protección de la armadura en construcciones de hormigón armado sometidas a la acción del agua.

La transformación será tanto menor en profundidad e intensidad cuanto más compacto sea el hormigón, creciendo en ambos sentidos con la elevación de la porosidad. El hormigón más compacto posible, reitera también aquí su garantía de una mejor protección química. Los resultados del ensayo que sigue, proporcionarán alguna luz aclaratoria en este proceso.

A consecuencia de profundas diferencias en la composición del hormigón, o en su elaboración, la profundidad y período de la carbonatación puede oscilar dentro de muy amplios límites. En la figura 5 se representa la evolución de las profundidades de carbonatación en función del tiempo, para una serie de hormigones de buena calidad, de distinta composición y con áridos normales, aunque también con el suplemento de materiales ligeros de relleno. Los hormigones sometidos a las influencias climatológicas de la intemperie se vieron afectados por el ritmo natural cambiante con el clima, de humedecimientos y desecaciones. Las profundidades de carbonatación (t) aumentan inicialmente con gran rapidez, y en todos los casos prosiguen después con mayor lentitud, hasta alcanzar, al cabo de algunos años, una posición estacionaria. La tendencia al estacionamiento puede explicarse, por una parte, como ya se describió en la figura 1, por la hidratación creciente del cemento, que hace aumentar la compacidad del hormigón. Por otro lado, los productos de transformación, como por ejemplo el CO_3Ca , por efecto de su mayor volumen, pueden influir en mayor o menor medida en el relleno de los poros. Este objetivo final podría lograrse por aplicación selectiva de los productos de hidratación transformables, cuando la resistencia a la desecación y penetración aumentasen paralelamente a la profundidad, de manera que sólo pueda abarcarse una limitada profundidad de transformación.

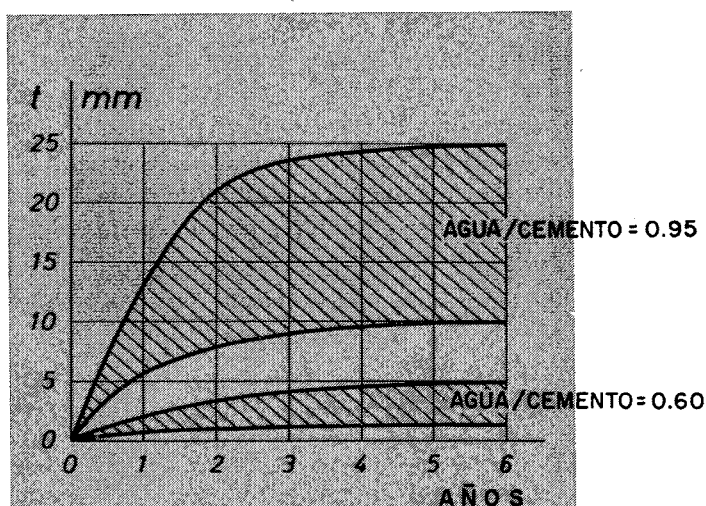


Fig. 5

Para un hormigón de porosidad normal, de acuerdo con los esquemas precedentes, con unos 175 kg/m^3 de cemento, y una relación agua/cemento de 0,95, la profundidad de carbonatación en la posición final de 10 a 25 mm será de 5 a 10 veces la de un hormigón compactado normalmente, con 300 kg/m^3 de cemento aproximadamente, y una relación agua/cemento de 0,6, en la que sólo se medirán profundidades de carbonatación de 1 a 5 milímetros.

Para hormigones con áridos naturales de buena calidad, los valores medios se encuentran en la mitad inferior de las zonas rayadas, mientras que, por el contrario, los hormigones preparados con áridos artificiales ligeros abarcan la totalidad de la misma.

En un ensayo de hormigones preparados con áridos normales, con relaciones agua/cemento diversas y sometidos durante dos décadas a la intemperie atmosférica industrial, se obtuvieron resultados análogos. La figura 6 muestra que la profundidad (t) de carbonatación, en un hormigón con una relación agua/cemento reducida, alcanzó solamente escasos milímetros, valor que creció considerablemente para relaciones agua/cemento mayores. Con relaciones agua/cemento superiores a 1,0, los hormigones resultantes alcanzan una profundidad de carbonatación de casi 2 cm sobre la profundidad válida normal para la protección de la armadura.

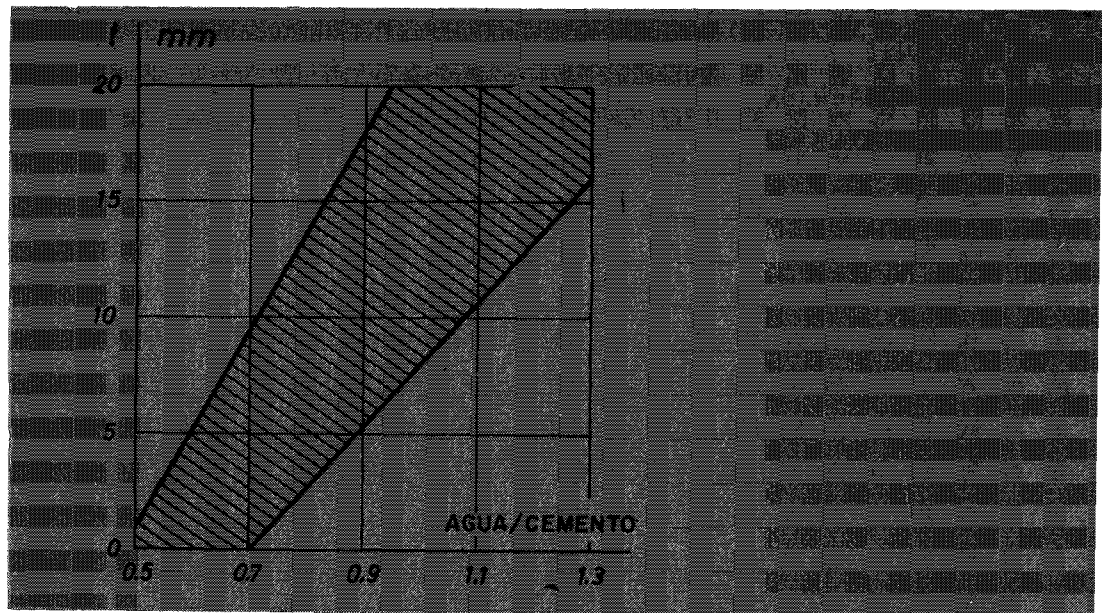


Fig. 6

El progreso de la carbonatación en función del clima al que está expuesto el hormigón se ilustra en la figura 7, y se resume en (10). Las construcciones estudiadas fueron de 5 a 54, con un promedio de antigüedad de 20 años. Como ordenadas, se situaron las frecuencias (H) de los factores medios indicativos de las profundidades (t) de carbonatación, distribuidas según clases.

A la intemperie, y bajo la influencia de la humedad (línea FF), la profundidad de carbonatación es lo más pequeña posible, lo cual indica que la cobertura de hormigón proporciona en estas condiciones al acero la máxima protección química. El 85 % de todos los valores medidos indican una profundidad de carbonatación inferior a 1 cm. Las piezas situadas a la intemperie, aunque protegidas contra la lluvia (línea F), presentaron profundidades de carbonatación ligeramente superiores. El 85 % de los valores medidos muestran profundidades de carbonatación inferiores a los 2 cm, resultando, en todos los casos —con un espesor normal de cobertura de hormigón de 2 cm para construcciones a la intemperie—, una protección química del acero, todavía superior.

En recintos interiores en seco (línea I) se midieron carbonataciones de la máxima profundidad, según era de esperar por el efecto de la desecación. Solamente en el 38 % de los casos, la profundidad de carbonatación fue inferior a los 2 cm. En dos tercios de los casos,

la cobertura de hormigón puede perder por esto su poder como capa de protección pasiva del acero. Sin embargo, la armadura puede estar protegida, como en los casos anteriores, contra la oxidación como consecuencia de la sequedad circundante. Sólo puede, por tanto, existir riesgo de oxidación cuando se someten repentinamente estos elementos constructivos a la lluvia, o a consecuencia de grandes concentraciones humanas en centros de reunión, lo cual determina una subida temporal considerable en la humedad relativa del aire, con posible penetración de la misma en el hormigón. No obstante, un hormigón espeso puede oponer suficiente resistencia a este humedecimiento ocasional, sustituyendo, con su compacidad, la desaparecida protección química del acero, por acción de la alcalinidad de la capa de cobertura.

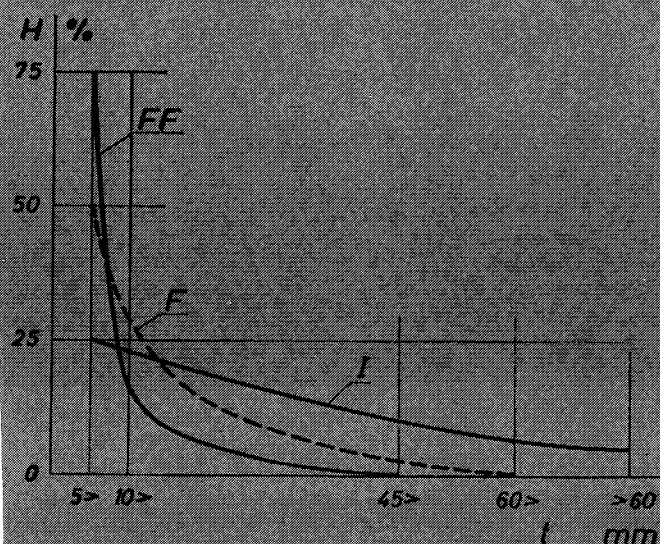
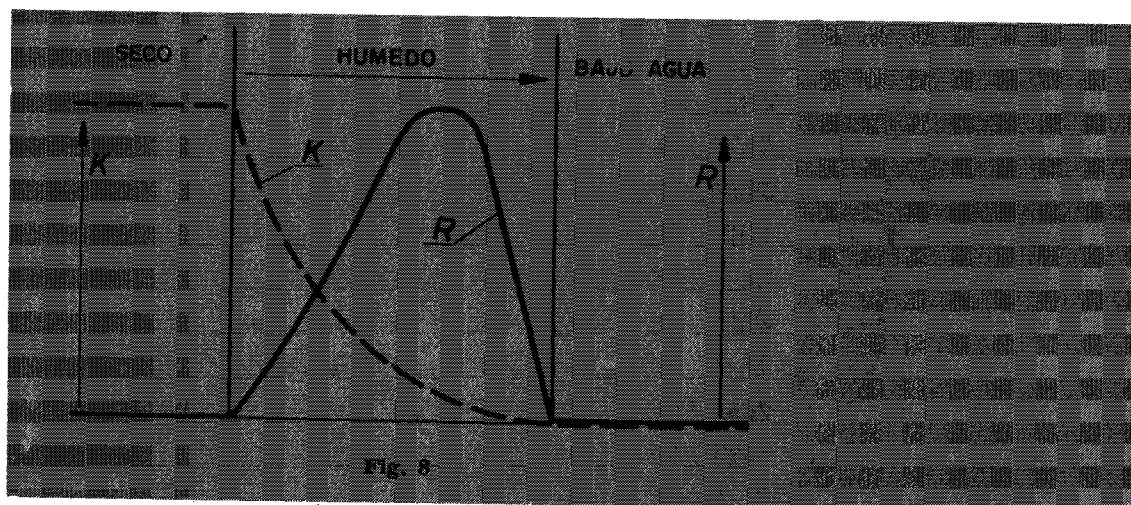


Fig. 7

También aquí hay que hacer presente, una vez más, que las experiencias sobre las construcciones de hormigón armado están basadas en datos abundantemente repetidos en el tiempo, y que la técnica del hormigón, en sus primeros pasos, preparaba un producto que, en general, era considerablemente más poroso de lo que hoy se estima como normal, tal como hemos expresado en el punto anterior. La protección anticorrosiva propia de las características constructivas es, por ello, tanto mayor cuanto más moderna es la construcción. Las experiencias desarrolladas sobre obras antiguas han de servir, a la hora de aplicarlas a las modernas, sólo como un mínimo título indicativo. Hay que considerar que las construcciones actuales gozan de una protección efectiva a la corrosión muy superior.

Las acciones del debilitamiento provocado por la carbonatación en la protección química de la cobertura de hormigón, se representan de modo esquemático en la figura 8. En aire seco, la carbonatación (K), y con ella la disminución de la acción química protectora alcanza su grado más enérgico aún cuando pueda no darse la oxidación en ausencia de humedad (R). Con una humedad media creciente, aumenta consiguientemente el riesgo de oxidación; pero si, al mismo tiempo, se refuerza la acción química protectora, la carbonatación decrece en profundidad e intensidad, dada una humedad creciente. En presencia del agua, no se produce carbonatación alguna, por ausencia de CO_2 , ni formación de óxido, al no concu-

rrir el O_2 . El debilitamiento de la acción protectora química de la cobertura de hormigón, por causa de la carbonatación, es, por consiguiente, reducido, en circunstancias de máximo riesgo de oxidación, debido a la actividad química del oxígeno y la humedad.



5. formación de herrumbre u orín

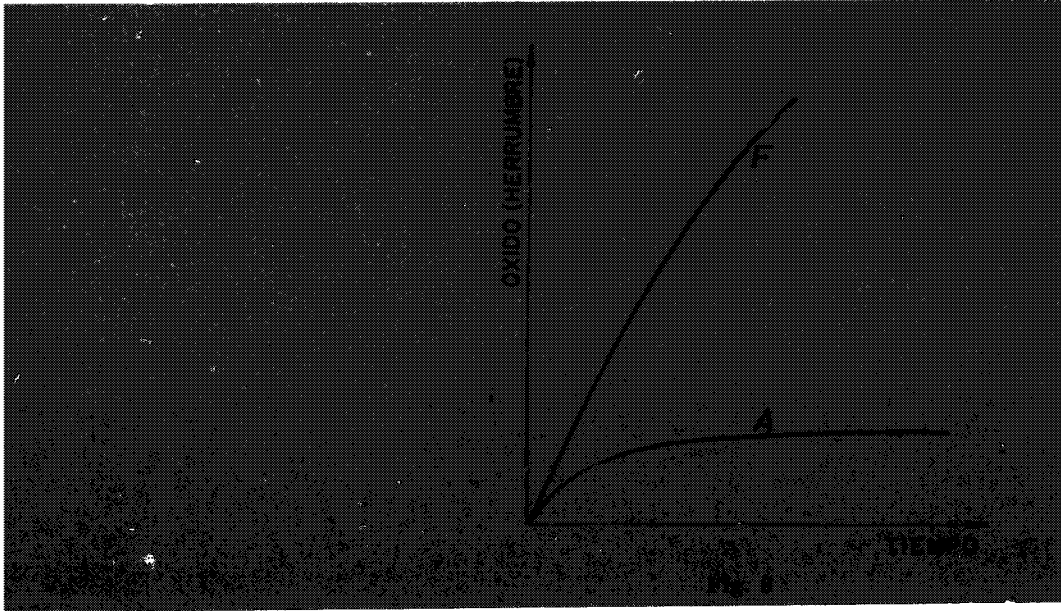
Se ha dicho anteriormente, que el hormigón envolvente proporciona al acero de la armadura un cierto grado de protección anticorrosiva. El problema reside en lo que puede suceder cuando no se dan las condiciones precisas para un efecto protector duradero. ¿Sufrirá entonces la construcción el ataque de la herrumbre y se destruirá?

Basándonos en la experiencia, y mediante el establecimiento de una analogía fundada en la investigación de los hechos generales de la corrosión, pueden darse dos casos extremos en la oxidación de la armadura del hormigón armado, naturalmente con una amplia serie de variaciones intermedias. En la figura 9 se representa esquemáticamente la oxidación, en función del tiempo.

En uno de los casos límite (*A*), en virtud de una concurrencia casual de las condiciones propicias a la corrosión, un elemento activo de oxidación, más o menos localizado y temporalmente limitado, deja de actuar como tal por modificación de dichas condiciones, con lo que la corrosión se detiene. Este fenómeno puede presentarse en cualquier momento; pero puede existir ya durante el fraguado inicial del hormigón, antes de alcanzarse el equilibrio físico-químico en el líquido alojado en los poros del hormigón o del cemento situado en proximidad a la armadura, y a cuya pasividad contribuye. A título de ejemplo, pudiera mencionarse la observación de focos de oxidación en la armadura de piezas prefabricadas de hormigón armado, fraguadas al vapor, los cuales pueden atribuirse a tal proceso. Este caso límite carece de importancia, a efectos de la durabilidad de los soportes, y no constituye motivo suficiente para una restauración.

En el otro caso, (*F*), se registra con el tiempo una corrosión progresiva, y puede acontecer con el hormigón armado en un medio agresivo, constituyendo la situación más peligrosa. Hay que explicar también que este caso desfavorable sólo se produce por la acción simultánea de varios factores de acción negativa, aunque las células de corrosión resultantes pue-

den mantenerse en actividad permanente, favorecida por un medio agresivo, y conducir a una oxidación progresiva. La evolución puede manifestarse por ligeras dilataciones superficiales, y progresar en profundidad hasta llegar a constituir verdaderas corrosiones disgregantes. Este caso se ha descubierto, por ejemplo, en un hormigón armado al que se aplicó Cl_2Ca como acelerador de fraguado, sin distribuirse de una manera uniforme.



La corrosión puede evolucionar en forma superficial, llegando a ocasionar la explosión de la cobertura de hormigón. Este caso se da, por ejemplo, en hormigones de porosidad regular situados en zonas de flujo y refluo marinos, o de brumas salinas.

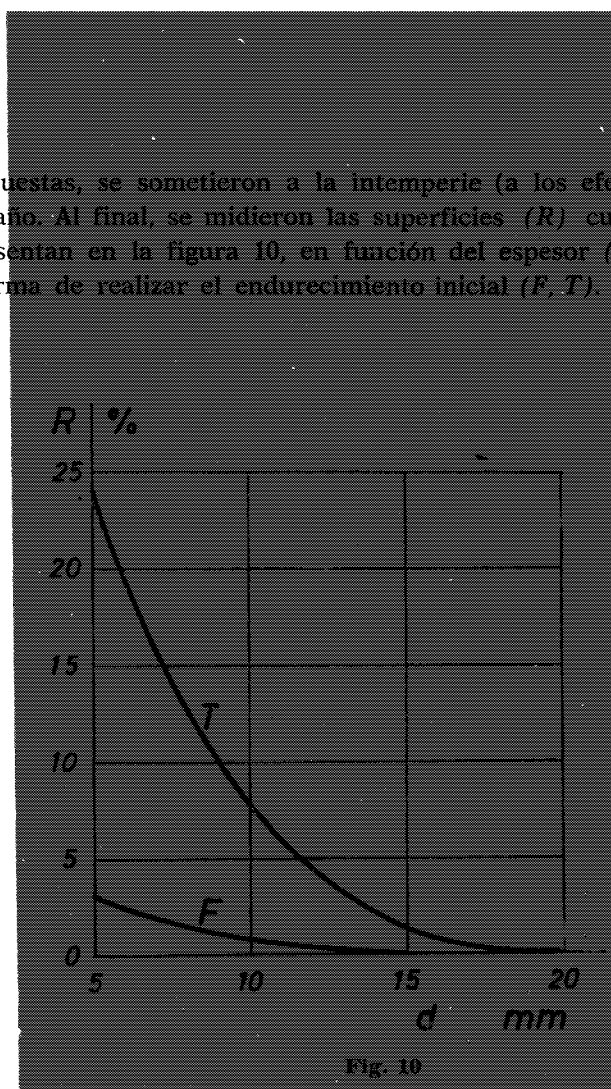
El caso de la corrosión progresiva es el de peligro máximo para los soportes, y deben adoptarse todas las medidas precisas para neutralizarlo, desde la planificación de la obra hasta el endurecimiento final del hormigón.

6. espesor necesario de la cobertura de hormigón

La cobertura de hormigón debe asegurar a la armadura una protección duradera, de índole química y mecánica. Como hemos indicado anteriormente, esta protección sólo podrá tener un efecto determinado, aunque suficiente para las posibles agresiones, y será tanto mejor cuanto más compacto sea el hormigón. Hemos comentado, además, que en el transcurso del tiempo puede disminuir esta acción protectora en cierto grado o desaparecer completamente como resultado de procesos químicos desarrollados en la capa de cobertura. Por este motivo, la cubierta de hormigón debe tener un espesor mínimo determinado para que pueda garantizar una protección constante anticorrosiva de la armadura.

Se han confeccionado probetas introduciendo varillas como armadura en el seno de un hormigón de buena calidad, y de espesor variable. Al cabo de 1 mes de conservación en las

condiciones expuestas, se sometieron a la intemperie (a los efectos del viento y de la lluvia) durante 1 año. Al final, se midieron las superficies (R) cubiertas con herrumbre, las cuales se representan en la figura 10, en función del espesor (d) de la cubierta de hormigón, y de la forma de realizar el endurecimiento inicial (F, T).



Las probetas (T), secadas inicialmente en aire con un 50 % de humedad relativa, mostraron, con 5 mm de cobertura de hormigón, un 24 % de herrumbre que disminuía rápidamente al aumentar el espesor de cubierta, para desaparecer con 20 mm de espesor. Las probetas (F), endurecidas inicialmente en atmósfera húmeda (90 % de humedad relativa del aire), registraron, incluso con 5 mm de espesor de cobertura, únicamente un 3 % de óxido. Con 10 mm de cubierta, ya no aparecieron señales, y las varillas con 15 mm de recubrimiento se mostraron completamente libres de herrumbre.

Resulta pues, evidente, que un espesor de hormigón de 20 mm es suficiente para asegurar al acero una protección anticorrosiva constante, incluso en condiciones de endurecimiento desfavorables. Si se practica una manipulación conveniente del hormigón, con un mantenimiento inicialmente prolongado de la humedad, pueden bastar incluso 10-15 mm de cobertura de hormigón, siempre que se estuviese en condiciones de realizar esta reducida cubierta con una absoluta uniformidad. Resulta especialmente peligroso para la durabilidad de los soportes, hacerse excesivas ilusiones sobre la viabilidad de las coberturas demasiado delgadas.

La cobertura de hormigón puede agrietarse por las tensiones de la construcción, con lo que se llegaría a una disminución o interrupción de la eficacia de la misma. Unos tirantes de hormigón armado, con un recubrimiento de armadura comprendido entre 5 y 20 mm, en situación de carga, y con fisuras abiertas a consecuencia de la misma, después de 7 meses de exposición en ambiente seco, con ciclos de humedecimiento y desecación propicios a la formación de óxido, se destruyen a los 2 años, y se miden los focos de oxidación limitados por

las fisuras. El resultado (11) obtenido se refleja en la figura 11: por (R), la longitud de los focos de oxidación entre fisuras, y por (d), el espesor de la cobertura de hormigón en la localización de las grietas; ambos factores resumidos en su valor medio. Hay que considerar aquí, que la longitud de los focos de oxidación disminuye con un espesor creciente de la cobertura de hormigón, y que la herrumbre desaparece por encima de los 15 mm de espesor de la misma, incluso aunque existan grietas.

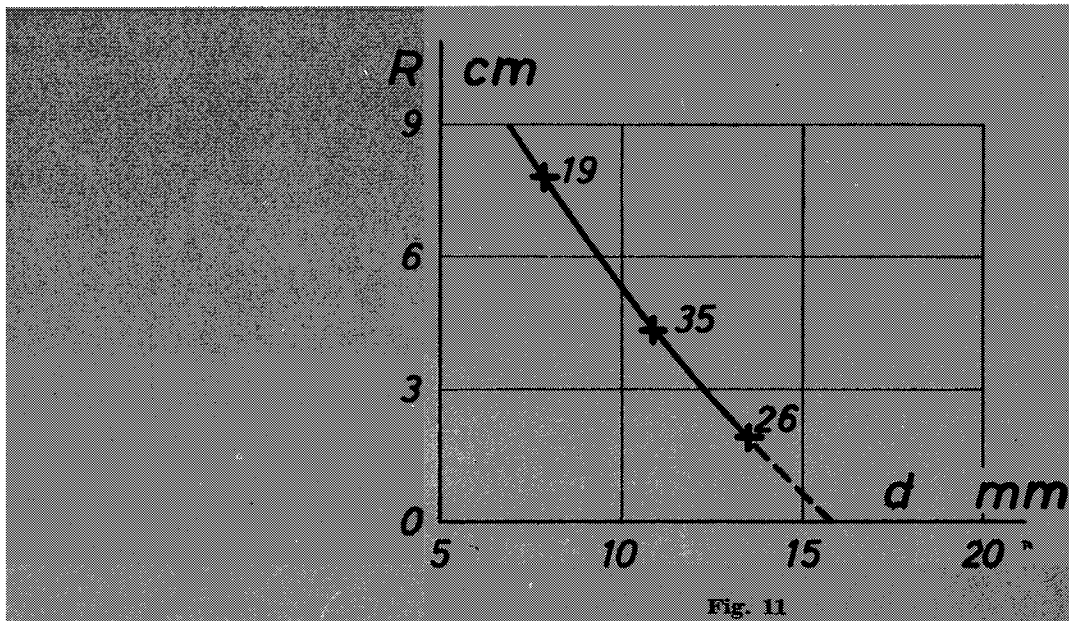


Fig. 11

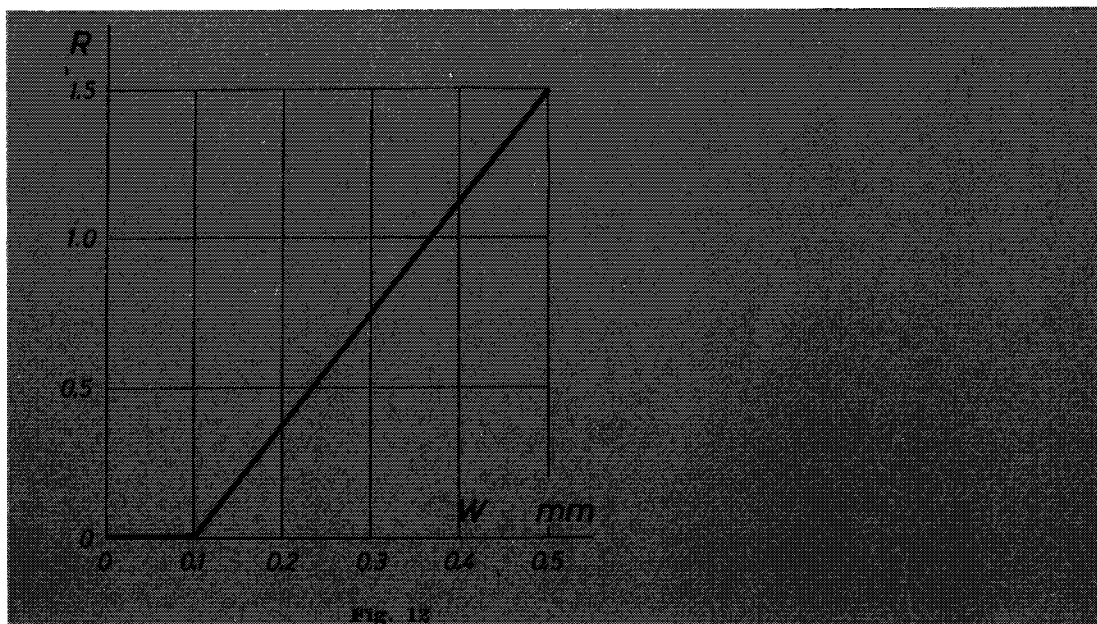
Este ensayo confirma lo anteriormente expresado. Resulta, en resumen, que 15 mm de cobertura de hormigón serían teóricamente suficientes, siempre que se preparasen con extraordinaria precisión; pero, teniendo en cuenta las realidades constructivas prácticas, conviene aplicar un espesor mínimo de cobertura, de 20 mm. Tales resultados respaldan las normas expuestas inicialmente (3 a 7), y derivadas de la experimentación de las construcciones, a saber, que los deterioros por corrosión sufridos por las construcciones de hormigón armado, se deben por abrumadora mayoría, a una insuficiente cobertura del hormigón, sin que, por otra parte, las fisuras hayan tenido mayor influencia.

7. influencia de las fisuras en el peligro de oxidación

Se han mencionado al principio, las experiencias realizadas sobre construcciones concretas de hormigón armado (3 a 7), en las cuales se ha confirmado, que las grietas con anchura de hasta 1 mm, no influyen en los progresos de la corrosión, y que son pues inoperantes, incluso en condiciones de particular agresividad, cuando la cobertura de hormigón ejerce sobre el acero de la armadura la acción protectora prevista. Resulta por tanto supérfluo, el estudio de la influencia de las fisuras en la corrosión, siempre que éstas se encuentren dentro de unos límites tolerables de anchura, para las construcciones habituales de hormi-

gón armado, y que, según conclusiones personales, estimo entre 0,2 y 0,5 mm, y en tanto se hayan mantenido, por supuesto, las condiciones detalladas sobre espesor mínimo de la cobertura, y compacidad exigible del hormigón.

A efectos de estudio experimental, debe reducirse la acción protectora de la cobertura. A continuación detallaremos algunos de los resultados obtenidos en estos ensayos.



En la figura 12 se representa, según (12), el grado de corrosión (R) en función de la extensión (W) de grieta. En el tirante de hormigón armado que se ha ensayado, la armadura estaba recubierta con una capa de hormigón de 3 a 20 mm en el punto donde apareció la fisura, habiéndose preparado el hormigón con una relación agua/cemento de 0,8. La probeta fue sometida en la intemperie a los ataques atmosféricos, parte en zona de flujo y reflujo en el Mar del Norte, valorándose la oxidación bajo los puntos de fisuración, al cabo de 2 años en 4 grados, de 0 a 3. Incluso en estas condiciones extremas, no surgió oxidación en grietas con anchuras de hasta 0,1 mm. A partir de aquí, la corrosión aumentó al crecer la anchura de grieta.

Las formaciones de herrumbre más intensas aparecieron en aquellos lugares donde la fisura discurría en sentido transversal a la armadura principal y en curva. En el ensayo (11) ya mencionado, y en el caso de una cobertura extremadamente ligera, a consecuencia de tensiones cercanas al límite, se dibujaron fisuras longitudinales de curso habitual al descrito por las grietas de tensión sobre las varillas hormigonadas, las cuales influyeron positivamente en la formación del óxido, como señala la figura 13. Se han utilizado como abscisas las longitudes de los focos de oxidación (R) divididas por clases, y como ordenadas, la frecuencia de las grietas transversales con (m) y sin (o) fisuras longitudinales cruzadas.

En los puntos con formación de óxido más reducida, se detectaron exclusivamente fisuras transversales. Al aumentar la oxidación, se ha registrado paralelamente un incremento en la presencia de fisuras longitudinales cruzadas. Dentro del grupo de las formaciones más intensas de óxido, sólo se ha presentado un mayor número de grietas con fisuras longitudinales cruzadas, con lo que se ve reforzado su influjo negativo. Las grietas longitudinales son atribuibles, de modo terminante, a la escasez de la cobertura, ya que, con un espesor de la

misma de menos de 10 mm, dos tercios de las grietas se vieron cruzadas por fisuras longitudinales, mientras que, por el contrario, sólo un quinto de las grietas lo fueron con un espesor de recubrimiento superior a las 14 milímetros.

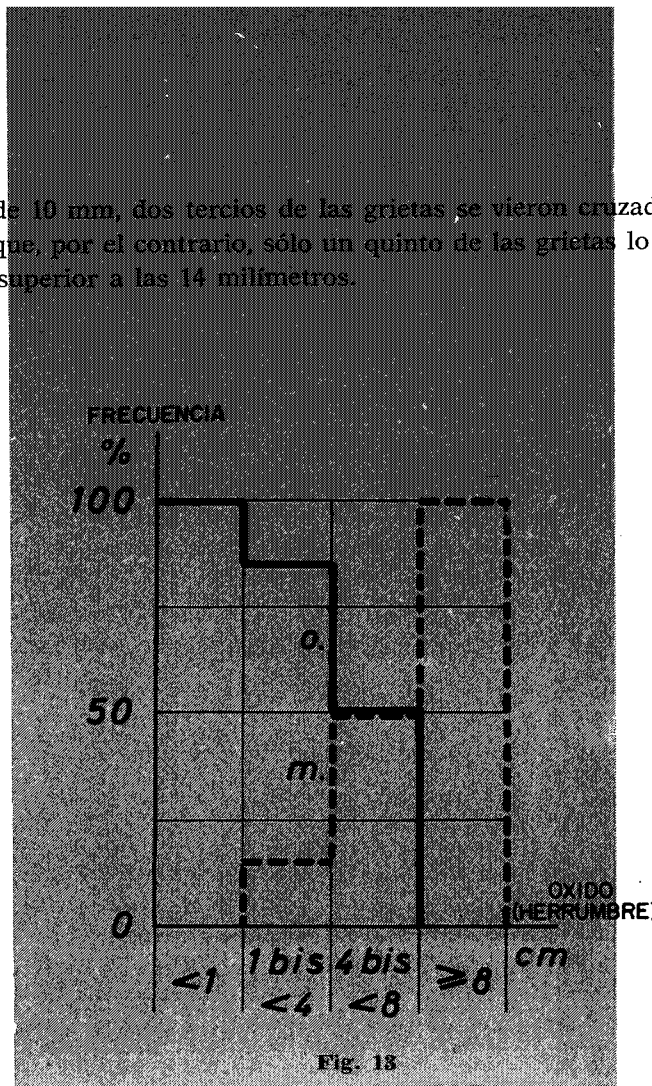


Fig. 18

La formación de fisuras longitudinales debe impedirse tomando las medidas constructivas adecuadas. Al establecer la cobertura de hormigón necesaria, así como las tensiones tolerables de adherencia y las armaduras transversales precisas en el sector de anclaje de las varillas de armadura, se tendrá en cuenta el impedir la posible aparición de fisuras longitudinales. Debe aplicarse el espesor previsto para la cobertura de hormigón cuidando una preparación compacta de los soportes en todas las etapas de la ejecución.

Los trabajos ya mencionados de REHM y MOLL (12) pueden dar alguna luz acerca de la influencia de las características superficiales de las varillas para armaduras, en la formación de óxido y en presencia de fisuras de anchura análoga, teniendo además en cuenta que la cobertura efectiva del hormigón sólo ascendió de 3 a 20 mm. Dada una ejecución similar de las probetas ha de considerarse, sin embargo, en atención a las experiencias logradas, que tales fallos se reparten de un modo regular en la totalidad de la pieza constructiva. En la figura 14 se indica la frecuencia de las fisuras con óxido sobre la varilla de armadura cortada por la grieta, en función de la intensidad de formación del óxido, establecida con una gradación (*G*) creciente de 0 a 3. En una línea se hace referencia a las piezas de hormigón armadas con pletina (*F*), y en la otra, las que lo fueron con redondos de acero (*R*) de igual diámetro. Los tirantes con pletina de acero fueron sometidos a una carga vez y media superior, y presentaron más del doble de grietas que los armados con redondos de acero. Sin embargo, la anchura media de grieta con el acero redondo fue de 0,39 mm, más de 1,5 veces superior a la registrada con pletina de acero, que se estimó en 0,24 mm. La figura 14 está referida a aquellos grupos de fisuras, con una anchura de 0,20 a 0,45 mm, registrada en ani-

bos casos. Deducimos de aquí que cuando se den circunstancias similares, la probabilidad para la formación de óxido, o su intensidad respecto del acero redondo, es considerablemente superior a la que corresponde al acero en pletina. Con este último tipo, e incluso en condiciones extremadamente desfavorables respecto de la normal ejecución y orientadas para estimular de la corrosión, aún se obtuvo que el 54 % de las fisuras no mostrasen formación de herrumbre, incluso cuando su anchura llegó a los 0,45 mm. Con el acero en redondos se observó un 27 % de fisuras sin óxido, es decir, tan sólo la mitad. Por otra parte, y dentro de los grados máximos de oxidación, se observó una frecuencia en el acero redondo casi doble a la registrada con el acero en pletina

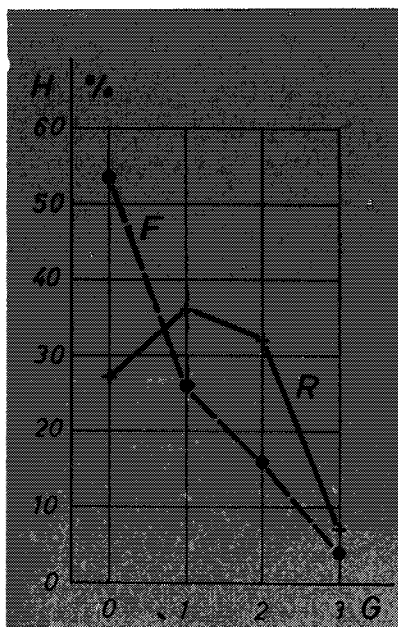


Fig. 14

La diferencia entre el acero redondo y la pletina, de gran adherencia, hay que achacarla al simple descubrimiento de la armadura en las proximidades de ambos bordes de fisura. La diferencia en el descubrimiento de armaduras fue estudiada ya por EMPERGER (13), quien demostró que en los redondos es mucho mayor que en los perfiles o pletinas. Siguiendo el paralelismo de la oxidación y de la longitud del desprendimiento, se llega fácilmente a la conclusión de que el óxido no puede progresar en el sentido longitudinal de la varilla, cuando está interrumpida la unión por causa del descubrimiento. Esta afirmación puede corroborarse en (14). En un punto de esta pieza de hormigón armado se ha desprendido la cobertura, exponiéndola a períodos de humedecimiento y desecación provocadores de oxidaciones. A continuación, y en el extremo del punto libre de la cobertura de hormigón, se ha vuelto a golpear, comprobándose un desplazamiento de 6 mm de longitud, debido al óxido, y provocado por el corte en la unión de la cobertura de hormigón en el primer desprendimiento, y la consiguiente liberación del acero respecto del hormigón.

Los ensayos de laboratorio confirman, con los datos obtenidos en construcciones de hormigón armado, que una anchura de grieta situada dentro de ciertos límites, y existiendo una cobertura correcta del hormigón, no supone peligro adicional de corrosión para el hormigón armado. Resulta, por lo tanto, que no parece necesario, en lo que afecta al riesgo de corrosión, mantener un control de la formación de grietas en el hormigón armado, aplicando fórmulas más o menos complicadas, y encargando al constructor trabajos adicionales de cálculo. Únicamente será necesario aplicar toda la atención al mantenimiento del espesor y capacidad necesarios en la cobertura de hormigón.

Para concluir, sólo algunas observaciones sobre el acero de armadura propiamente dicho. Para impedir el peligro de corrosión en el hormigón armado se recomienda siempre el empleo de acero insensible a la corrosión. Hay que declarar que éste es un procedimiento de escasa utilidad, porque también la corrosión puede manifestarse, en tanto es capaz de crear células localizadas de oxidación, para lo que existen abundantes posibilidades dada la inevitable heterogeneidad del hormigón.

Otra objeción que a menudo se plantea es la oxidación del acero de la armadura, antes de su aplicación. Al respecto, diremos que tanto el acero con un acabado uniforme de su superficie curva, como aquel que no lo tiene, e incluso el que presenta adherencia de óxido, pueden utilizarse perfectamente en la construcción. Las varillas con una superficie uniforme constituyen un caso teórico, puesto que en realidad esta uniformidad se pierde, a consecuencia de las flexiones a que se las somete para su conformación en frío. El acero oxidado puede tener, según enseña la experiencia, una capacidad de adherencia al hormigón incluso superior a la del recién fabricado. Las láminas de óxido desprendidas, que disminuyen la acción protectora del hormigón envolvente, suelen, por lo general, terminar de caerse durante las manipulaciones a que se someten las varillas en la construcción, con lo que ya se hacen inofensivas. El acabado parcial de la superficie puede provocar, por ataque de oxígeno, la formación de células de corrosión, pero éstas apenas pueden ser identificadas, ya que la diferencia de potencial latente en la superficie curva se revela como inoperante al ser neutralizada por la cobertura protectora.

8. defectos típicos de ejecución

Se ha explicado anteriormente, que si se observan las normas recomendadas para un buen proyecto y ejecución en las construcciones de hormigón armado se conseguirá una protección anticorrosiva completa. A continuación expondremos algunos ejemplos oportunos que, sin ser exhaustivos, reflejan deficiencias típicas de realización que pueden ocasionar formaciones corrosivas por la no observancia de tales normas:

a) en muchas columnas de viejas empalizadas construidas de hormigón armado puede observarse la presencia de intensas corrosiones, que pueden ser causa de que salte la cubierta de hormigón de la armadura. Estas columnas fueron construidas en su época con un hormigón con consistencia de tierra húmeda, no apropiada al sistema de compactación por picado una vez introducida la armadura. La irregular porosidad de la cubierta no ofrece al acero, situado debajo, una protección anticorrosiva satisfactoria. Tales circunstancias son también de temer hoy día, cuando para conseguir una mayor resistencia del hormigón se disminuye drásticamente la relación agua/cemento, sin aumentar al mismo tiempo el volumen de conglomerante en la medida necesaria para un buen compactado del hormigón, o cuando se utilizan hormigones poco aptos para su compactado;

b) puede suceder que durante el hormigonado fluya pasta de cemento entre las juntas de unión de los elementos de encofrado. Una vez que se han retirado éstos, aparecen en tales puntos focos característicos, en los cuales, y al menos de un modo localizado, la acción protectora de la cobertura de hormigón resulta sensiblemente disminuida. Si se produce el mismo debilitamiento de los bordes de los elementos de hormigón armado, en grandes tramos longitudinales, pueden resultar apariciones de óxido en la forma anteriormente descrita;

c) al hormigonar piezas verticales de hón, en el momento de verterlo en el interior muros, puede quedarse suspendido el hormigón armado, principalmente columnas y

del encofrado, en las varillas de armadura situadas verticalmente, y con preferencia en los puntos de reunión de las mismas. Entonces resultan vanos en la cobertura de hormigón de la armadura, por lo general de extensión muy limitada. Para la corrección de estos defectos debe tenerse presente el que se recupere la plena actividad protectora de la cobertura de hormigón. El parcheo de estos puntos de concentración constituye, en el mejor de los casos, sólo una solución parcial, la mayoría de las veces inefectiva para la protección. Deben eliminarse los focos; y mediante un cuidadoso vertido del mortero de cemento, asegurarse nuevamente de la compacidad y regularidad de la cobertura;

d) un caso con el que siempre se tropieza en la ejecución de obras de hormigón armado es el descolgado de armaduras en el momento del hormigonado, en especial de las armaduras de cubiertas. Si entre ellas se encuentra la armadura superior de las placas de ménsulas, pueden resultar los ya conocidos desmoronamientos. Si se trata de la armadura inferior de las placas, ésta tocará los moldes de encofrado, llegando a limitar hasta 0 el espesor de la cobertura. Muchas veces, las varillas de la armadura quedan al descubierto al desencofrar. Defectos análogos pueden observarse en las paredes y superficies laterales de las vigas. A causa de un «ahorro» en los soportes de separación, o de espesores demasiado reducidos, las armaduras superficiales o las curvaturas de las piezas, se ponen en contacto con los moldes al verter el hormigón. Con una cobertura demasiado delgada existe posibilidad de formación de nidos de árido grueso, ya que la piedra puede acodarse entre la armadura y el encofrado. Un recubrimiento demasiado delgado ya no puede hacerse más compacto y es de una resistencia mecánica muy débil, de forma que al incidir en el sentido longitudinal de las varillas favorece la formación de óxido en la armadura;

e) una deficiencia constructiva que se repite con frecuencia, es aumentar la concentración de armaduras en un punto concreto, ya sea en el plano de una viga, en los puntos de empalme de los soportes, o en soportes con columnas. Especialmente en el último caso, el constructor debe vigilar constantemente la interpenetración de las distintas armaduras que constituyen el armazón de cada uno de los elementos constructivos, y que, en el caso de no ser completamente adecuadas a cada punto concreto de empalme, pueden ocasionar dificultades al elemento constructivo, al no quedar espacio suficiente para el hormigón, lo cual impide, en última instancia, un revestimiento del debido espesor. Al imprimir una vibración, el hormigón se tamizará a través de las varillas de la armadura, lo que producirá una retención del árido grueso y, finalmente, una segregación del hormigón, con la consecuencia final de obtenerse así un revestimiento excesivamente poroso. Cuando, debido a exigencias de la obra, no puede prescindirse de armaduras demasiado espesas, deberá prepararse un árido, para el hormigón, de un tamaño máximo adecuado al caso, es decir, de la suficiente finura. Este tamaño reducido del árido debe estar en concordancia con la granulometría del mismo y con la composición del hormigón, a fin de conseguir un hormigón de la máxima compacidad posible;

f) un hormigón abundante en arena muy fina, requiere gran cantidad de agua, y muestra al compactarse, sobre todo si se usa vibración, una tendencia a segregarse más acusada a medida que aumenta la altura de la capa hormigonada. El árido grueso se precipita al fondo, quedando en la parte de arriba un hormigón rico en mortero y pasta de cemento. Esta capa superior tiende, al segregarse el agua, a formar bolsas en las que es ineficaz la rígida trama de la armadura. A causa de ello, se forman en la parte inferior de las varillas espacios vacíos en forma de bolsa que representan un peligro inmediato de corrosión para la armadura, ya que las varillas no se encuentran embutidas en dicha zona. Esta circunstancia únicamente puede evitarse con una selección adecuada de los áridos;

g) El ejemplo que sigue se refiere a las dificultades que eventualmente pueden surgir en la apreciación de la protección química del revestimiento de hormigón. Los fosos de distribución de una cerámica se habían revestido con hormigón armado. Los fosos se encontraban situados bajo techado, estando el recinto caldeado permanentemente por los hornos de la fábrica y, por tanto, el constructor contaba con un clima seco en el cual no existía riesgo de oxidación. Sin embargo, el terreno situado en contacto con el hormigón estaba muy húmedo. Como quiera que actualmente se dispone de medios para producir un hormigón debidamente compactado, no se previó aislamiento alguno. Al cabo de algunos años de explotación se produjeron serios deterioros por corrosión, y el revestimiento de hormigón de las armaduras comenzó a desplomarse. Motivo: el aire seco del interior del foso desecó profundamente el hormigón de su lado, mientras que la constante humedad del terreno comenzaba a hacerse patente. La superficie límite entre sequedad y humedad se encontraba aproximadamente en el mismo plano de la armadura interior, cuya capa de revestimiento, debido también al elevado contenido en ácido carbónico del aire, se carbonató profundamente. Resultó, en resumen, una disminución de la protección con incidencia de oxígeno por un lado, y de humedad del otro; situación ideal para la corrosión de la armadura. El aislamiento del foso contra la humedad del suelo hubiese sido, en este caso, un posible medio para evitar tales resultados.

9. particularidades del hormigón pretensado

Todo lo expuesto hasta aquí da la impresión que únicamente se ha estudiado la protección anticorrosiva en el hormigón armado. Sin embargo, no es precisamente así. Las conclusiones deducidas de lo anteriormente expuesto son válidas también para el hormigón pretensado. La denominada armadura inerte en el hormigón pretensado precisa la misma protección anticorrosiva que la armadura del hormigón armado normal. En la armadura de tensión propiamente dicha puede exigirse, cuando menos, la misma garantía contra la oxidación que en la llamada armadura inerte, ya que, tanto una como otra, son de acero. El análisis químico de los aceros no tiene influencia alguna sobre la corrosión, en el sentido normal del concepto.

Se sobreentiende que la efectividad de una agresión del óxido sobre la integridad de un elemento de soporte aumenta al reducirse el diámetro de las varillas de armadura, pues el daño ocasionado por el óxido en 1 mm de acero de un hilo de 5 mm de espesor significa un quebranto del 36 % de su sección, mientras que en una varilla de 26 mm de espesor sólo representaría un 7 por ciento.

La acción protectora anticorrosiva del revestimiento de hormigón es por ello de la mayor importancia, no sólo para las armaduras de tensión, sino también para las armaduras inertes formadas con hilos delgados. En la preparación de elementos de hormigón pretensado, con hilos tendidos antes del hormigonado y difusión del impulso de tensión por empalme, debe dedicarse especial atención al mantenimiento del espesor necesario del revestimiento y de la compacidad del hormigón de relleno. Lo mismo ha de entenderse en el caso de la incorporación de hilos tensores o armaduras inertes en el seno de las piezas prefabricadas. Mediante una adecuada ejecución de la armadura, debe asegurarse un revestimiento regular y pleno en toda la longitud del hormigón o mortero que posteriormente se aplique, los cuales han de tener una composición tal que sea posible alcanzar la compacidad necesaria para una protección anticorrosiva constante, aplicando los procesos de compactado que sean posibles.

después las probetas se desmoldan y se ensayan inmediatamente a compresión. Hasta el momento se han ensayado hormigones con consistencia de «tierra húmeda» empleando siete tipos de cementos rumanos. La resistencia obtenida por este procedimiento es, más o menos, la mitad de la obtenida a 28 días por los métodos convencionales. Evidentemente, el método propuesto por el Sr. MIHAIL es muy rápido. Sin embargo, no parece apropiado más que para probetas de pequeña dimensión y apropiado por lo tanto en los estudios preliminares de composición de hormigones.

Los cinco últimos trabajos entran en la categoría clásica de ensayos de endurecimiento acelerado: es decir, tratamientos que tratan de prever la resistencia convencional de un hormigón a partir de los resultados de ensayos después de 24 horas de su confección.

En esta categoría, los Sres. JAROCKI, MALHOTRA y VUORINEN emplean el endurecimiento en agua caliente, mientras que los Sres. MALHOTRA-ZOLDNERS y SMITH-CHOJNACKI, prefieren recurrir al agua hirviendo. En el segundo caso, evidentemente, la temperatura de tratamiento es más elevada y el ciclo puede durar menos tiempo.

El Sr. JAROCKI describe el empleo de un procedimiento de endurecimiento acelerado en el control de calidad de los hormigones de una presa. Aprovechando esta ocasión, examina por el método estadístico la posibilidad de estimar la resistencia a 28 días, partiendo de los resultados de los ensayos acelerados a 1 día. Ha encontrado que existe una buena correlación entre las dos variables, correlación que se mantiene como buena en el caso de pequeñas variaciones en las calidades de los componentes del hormigón. La aproximación estimada del método parece variar de ± 7 a ± 14 por ciento.

El Sr. MALHOTRA se refiere también a los resultados de los ensayos sobre los hormigones de una instalación hidroeléctrica. El ensayo a compresión de 737 probetas ha demostrado la posibilidad de sacar la resistencia convencional a 28 días con una aproximación de $\pm 15-23$ por ciento.

Incluso, el trabajo de el Sr. VUORINEN parte de los resultados de ensayos acelerados efectuados sobre hormigones para construcciones hidráulicas. La predicción de la resistencia a 28 días, a partir de los resultados de ensayos acelerados a 1 un día parece buena, siendo las dispersiones del orden de $\pm 20-30$ kg/cm²; sobre todo, la precisión es, al menos, igual a la de los resultados del ensayo a 7 días de probetas conservadas en ambiente natural.

Los dos últimos trabajos, que se refieren como ya hemos dicho, a métodos de endurecimiento acelerado en agua hirviendo, dan datos importantes sobre procedimientos cuya normalización está en fase muy avanzada.

Los Sres. MALHOTRA y ZOLDNERS han adoptado el «método modificado hirviendo» propuesto por AKROYD. Ellos han preparado, según este procedimiento, 1.245 ensayos de probetas cilíndricas para compresión de composición y procedencia diversas, realizándose los ensayos en tres laboratorios diferentes. Los resultados parecen confirmar la posibilidad de reducir la resistencia convencional a 28 días, con una precisión de ± 12 por ciento.

Los Sres. SMITH y CHOJNACKI, resumen en su comunicación las conclusiones ya presentadas a la reunión de ASTM de 1962. Exponen un procedimiento de ensayo en fase avanzada de normalización, llamado FSAC, que permite por sí mismo una buena apreciación a un día, de la resistencia convencional a 28 días. Finalmente, los autores pasan revista a las cuestiones que todavía no están resueltas y sobre todo a la dificultad de obtener, con procedimientos de endurecimiento acelerado del tipo adoptado, una resistencia a 1 día igual a la convencional a 28 días.

Para completar el panorama de las investigaciones en curso sobre el tema debatido en este Coloquio, es preciso añadir que el Sr. A. J. NEWMAN, de la «Building Research Station», ha indicado que están en curso una serie de investigaciones en Inglaterra, con la cooperación de seis laboratorios, sobre el método más conveniente de endurecimiento acelerado para obtener, 24-30 horas después de la confección de probetas, una buena estimación de la resistencia convencional de un hormigón. Se han terminado los ensayos y se encuentra en curso el análisis de los resultados obtenidos.

los métodos de ensayo

El escrutinio de las fichas de información enviadas por los laboratorios que utilizan procedimientos de endurecimiento acelerado de probetas de hormigón ha permitido preparar la tabla que acompaña este trabajo y que resume los resultados de la encuesta.

Se observa en primer lugar que la mayor parte de los laboratorios adoptan un ciclo de ensayo que dura 24-30 horas, y que el tratamiento se efectúa casi siempre en agua. Aproximadamente la mitad de estos laboratorios prefieren el empleo de agua hirviendo; los demás recurren a agua caliente a 74-80° C. La primera solución es la más simple y la más rápida en vista de la más alta temperatura de tratamiento; la diferencia entre éste y el segundo método, que requiere un dispositivo termostático, no es sin embargo de gran importancia práctica.

En cualquier caso, es fácil señalar que los distintos métodos no se diferencian entre sí más que por detalles que no son de una importancia esencial. El problema se encuentra, por lo tanto, maduro para una normalización, que en efecto está siendo ya estudiada por un grupo de trabajo de la ASTM que pronto presentará sus conclusiones.

el endurecimiento acelerado de modelos

El autor de este resumen citaba, como aplicación de los métodos de endurecimiento acelerado, el tratamiento de maquetas de hormigón destinadas a los ensayos sobre modelos reducidos. Ninguna de las contribuciones a este coloquio han tratado de esta cuestión, de suerte que sólo pueden citarse los trabajos del propio autor. Sin embargo, parece que el endurecimiento acelerado de maquetas puede ser útil, bien para ganar el mayor tiempo posible, bien porque las propiedades del hormigón tratado permanecen más o menos invariables por largo tiempo.

conclusiones

De los resultados del coloquio, pueden sacarse algunas conclusiones.

Ante todo, la organización de este coloquio por correspondencia ha evidenciado, por el número de participantes, que el problema de los ensayos acelerados de los hormigones es

de la armadura, y debe practicarse de modo que las varillas situadas entre dos separadores no puedan doblarse en el momento de hormigonar, y que las manipulaciones necesarias no puedan afectar a los moldes;

d) hay que evitar los aditivos que contengan Cl_2Ca , ya que incluso en el caso de aplicarlo por disolución en el agua de amasado, no existe ninguna seguridad sobre su completa y uniforme distribución en la masa del hormigón;

e) existen otros aditivos que son inocuos para la protección anticorrosiva de la armadura, siempre que sean tolerables por el cemento empleado;

f) los aditivos no deben reaccionar peligrosamente con el agua de amasado, ni con el conglomerante, así como tampoco con los demás materiales que se empleen para preparar el hormigón;

g) las escorias de horno alto, puzolanas y otras adiciones hidráulicas del cemento Portland, no tienen efectos nocivos sobre la protección anticorrosiva de la armadura. En el caso de adiciones masivas, hay que tener en cuenta que estos hormigones conservados permanentemente en húmedo mantienen sus propiedades de una manera óptima. Lo mismo sucede especialmente en el caso de un endurecimiento rápido;

h) debe evitarse el picado o entallado de las caras superficiales de las construcciones de hormigón armado o pretensado, ya que a consecuencia de ello pueden resultar deterioros en la textura del recubrimiento de hormigón.

Para finalizar, hay que observar una vez más que estas reglas no son nuevas, sino que constituyen una repetición de principios ya conocidos en la ejecución científica de las obras. En la mayoría de las normas y libros técnicos están contenidas en esta u otra forma parecida. Todas las construcciones erigidas desde la aparición del hormigón armado han perdurado, siempre que éstas normas han sido observadas. En una proporción máxima del 1 % de los casos observados se han presentado señales de corrosión en las armaduras, pero únicamente porque la mayoría de las veces no se respetaron estas reglas en muchos aspectos. Basándonos en la generalidad de las experiencias obtenidas, no se vislumbra motivo alguno para que el perfecto estado actual de las construcciones portantes de hormigón armado pueda empeorar en el futuro. Antes bien, el aprovechamiento de los progresos logrados en la técnica de la construcción, conducirá a un incremento de la protección anticorrosiva, y con ello a una elevación en la seguridad contra la corrosión, en contraste con el nivel técnico que informó las construcciones de las pasadas décadas.

bibliografía

- (1) SALIGER, R.: «La construcción en hormigón armado», 7.^a edición; Deuticke, Viena, 1949, pág. 108.
- (2) MOLL, H. L.: «Sobre la corrosión del acero en el hormigón». Comisión alemana para el hormigón armado. Cuaderno 169, pág. 56.
- (3) CARPENTIER, L.: «Corrosión de las armaduras». Informe de la discusión sobre el tema IV del Simposio RILEM, Estocolmo, 1957.
- (4) LOUIS, H.: «Resumen del informe general de la encuesta sobre la corrosión de las armaduras en las obras de hormigón armado y en las armaduras de pretensado.» Informe sobre el tema I del VII Congreso de la Asamblea Internacional de la Construcción de Puentes y Superestructuras, Río de Janeiro, 1964.
- (5) Informe CUR núm. 22 sobre la resistencia a la intemperie del hormigón, 1961.
- (6) Estudios sobre la edificación nacional, informe especial núm. 25. «La durabilidad de las construcciones de hormigón armado», 1956.
- (7) Los datos son el resumen núm. SOS/1.048 de la Carta núm. SOZ 428, de 18 de abril de 1966, de SO-COTEC a la Cámara Sindical Nacional de los Constructores de cemento armado y hormigón pretensado. El Autor agradece a los interesados su valiosa cooperación.
- (8) REHM, G.: «Deterioros en construcciones de hormigón pretensado realizadas con cemento aluminoso». *Revista del Hormigón*, núm. 29, 1963.
- (9) DUTRON, R., y MOMMENS, A.: «Corrosión de las armaduras en el hormigón armado». Centro Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Industria del Cemento. Informe 4, diciembre 1964.
- (10) «Profundidad de las capas carbonatadas en las antiguas construcciones de hormigón». Comisión alemana para el hormigón armado. Cuaderno 170, 3.^a parte.
- (11) SORETZ, St., y CARPENTIER, L.: «Contribución a la corrosión de las armaduras de hormigón armado». *Anales del Instituto Técnico y de Obras Públicas*, en prensa.
- (12) REHM, G., y MOLL, H. L.: «Investigaciones y estudios sobre la influencia de la anchura de grieta en la formación de óxido sobre la armadura de los elementos constructivos de hormigón armado». Comisión alemana para el hormigón armado, cuaderno 169.
- (13) EMPERGER, F. v.: «El problema de las fisuras con elevadas tensiones en el acero, y el desprendimiento tolerable en el mismo». Informe sobre las investigaciones de la Comisión Austríaca del Hierro y el Hormigón. Cuaderno 16, 1935.
- (14) En otro lugar (11), figura 14 y texto.