

# TENDENCIAS ACTUALES EN LA INVESTIGACION SOBRE CORROSION DE ARMADURAS

(PRESENT RESEARCH PRIORITIES IN REBAR CORROSION)

C. Andrade, Prof. de Investigación  
Instituto Eduardo Torroja/CSIC

J. A. González, Prof. de Investigación  
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas/CSIC  
España

Fecha de recepción: 16-XII-88

628-8

## RESUMEN

*El fenómeno de la corrosión de armaduras en hormigón, en los últimos 20 años, ha pasado a ser un problema económico de primera magnitud por los costos que supone para algunos Gobiernos la reparación y el mantenimiento de muchas Obras Públicas.*

*En el presente artículo se hacen unas breves referencias a las causas más frecuentes que provocan esta corrosión y se dan algunas cifras ofrecidas por investigadores norteamericanos sobre los costos en reparación de puentes de hormigón armado. Finalmente, se comentan las líneas de investigación que, a juicio de los autores, son prioritarias en esta materia.*

## SUMMARY

*During the last 20 years, the corrosion of concrete rebars is increasingly being considered a major problem due the high costs spent by some Governments on repair and of civil concrete structures. In the present paper, a brief description on the causes of this type of corrosion is offered together with some references to the costs of repairing of bridge decks published by USA researchs. Finally, the main lines of research which, in opinion of the authors have priority, are commented.*

## INTRODUCCION

Cuando el hormigón armado empezó a ser utilizado de forma industrial a principios de este siglo, muchos pensaron haber encontrado un material de construcción tan durable como la piedra o el ladrillo, pero además dotado de propiedades mecánicas próximas a las del acero.

Desde finales del siglo XVIII, que se construyó el primer puente enteramente en hierro de fundición, el acero había sido el material capaz de permitir los mayores avances en las técnicas constructivas, pero con la contrapartida de que era necesario un mantenimiento que evitara su oxidación. En cambio el acero dentro del hormigón alcanzaba un estado de pasividad química tal, que lo conservaba indefinidamente sin corrosión. Esta circunstancia, unida a la propia barrera física que supone el recubrimiento, hizo pensar en que la asociación acero-hormigón se convertiría en un material compuesto sin necesidad de mantenimiento.

En la actualidad, si bien el hormigón armado y pretensado siguen siendo el material de construcción por excelencia y no se vislumbra que se pueda desarrollar otro que tenga tantas propiedades favorables al mismo costo, la idea de que el hormigón es un material que no necesita operaciones especiales de conservación, ha variado radicalmente. La constatación de que las armaduras del hormigón se corroen bajo ciertas condiciones y muchas estructuras necesitan ser reparadas con sólo 10, 20 ó 30 años de servicio, son realidades que han comenzado a ser asimiladas por muchos técnicos relacionados con la construcción y cada vez son más las normativas que dedican capítulos especiales a la durabilidad en general y a la de las armaduras en particular.

## CAUSAS DE LA CORROSION DE LAS ARMADURAS

Dos son las causas principales de que las armaduras se puedan corroer: la carbonatación del recubrimien-

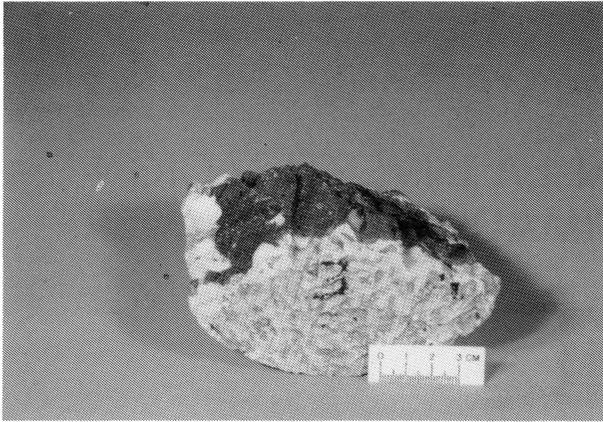


Fig. 1.—Ensayo de la fenolftaleína sobre probeta de hormigón: la zona incolora (~ 1 cm) es la que se ha carbonatado.

to de hormigón y la presencia de cloruros en las inmediaciones de la armadura.

La primera circunstancia se produce por la reacción de las sustancias ácidas de la atmósfera (dióxido de carbono, dióxido de azufre, etc.), con los elementos alcalinos del cemento, dando lugar a un descenso tal del valor del pH (de alrededor de 13 hasta cerca de 7) (figura 1) que la capa pasivante protectora del acero se disuelve (1) y se produce una corrosión generalizada de la armadura. Este fenómeno conocido como *carbonatación*, aunque lento empieza a ser materia de preocupación en muchos países, ya que se pueden alcanzar espesores carbonatados de 2-3 cm (recubrimientos muy habituales en la armadura) en sólo 20-30 años en hormigones vistos de las calidades habituales en la edificación. Japón es con diferencia el país más concienciado sobre el riesgo que supone la carbonatación del recubrimiento de hormigón y el que está desarrollando más medidas preventivas en este área (2) (3).

La circunstancia que cronológicamente fue la primera en detectarse, es la presencia de cloruros en las inmediaciones de la armadura (figura 2). La constatación del riesgo que suponía la presencia de cloruros se puso de manifiesto a través, por un lado, del uso de  $\text{CaCl}_2$  como acelerador del fraguado del cemento, y por otro, debido a la necesidad de usar sales para combatir las

heladas y derretir la nieve en carreteras y puentes de hormigón en zonas frías.

En los años 50-60, la adición de  $\text{CaCl}_2$  durante el amasado apareció como una excelente medida para acelerar el fraguado y desarrollar la industria de prefabricados, pero pronto se constató lo desastroso de esta solución ya que en períodos muy cortos de vida aparecían fisuras y manchas de óxido de tal magnitud que presagiaban la ruina de estas estructuras a corto plazo. Así, el  $\text{CaCl}_2$  fue prohibido y el contenido en ion  $\text{Cl}^-$  empezó a limitarse en las diversas normativas.

Las sales para combatir el hielo y la nieve se han usado desde antiguo en muchos países de climas fríos. Canadá y USA, son los países pioneros en la publicación de estadísticas sobre el uso de estas sales y sus repercusiones negativas. Similar problemática empieza a ser tenida en cuenta por países como Inglaterra, Suiza o Austria, en los que también es masivo el uso de sales de deshielo. Además de carreteras y puentes, se ven afectados por el uso de estas sales otras estructuras, entre las que destacan los aparcamientos (4) ya que los coches transportan en sus bajos residuos salinos que se derriten al estacionar los vehículos en sitios más calientes y terminan afectando a los forjados. Otro ejemplo de estructuras que pueden ser afectadas por esta problemática son los mercados de pescado.

En este sucinto repaso de las causas que más frecuentemente provocan corrosión de armaduras se debe nombrar, en el capítulo de cloruros, el comportamiento de estructuras de hormigón en medios marinos. Aquí el fenómeno puede ser igual de rápido que en el caso de las sales de deshielo si los cloruros penetran por fuerzas capilares (succión) debido a que se encuentran suspendidos en el aire en las gotitas de humedad. Cuando el mecanismo de penetración es por difusión, entonces el fenómeno es mucho más lento, aunque el proceso global y las consecuencias son las mismas. GjØrv, un investigador noruego que fue encargado de efectuar inspecciones en todas las instalaciones portuarias de la costa noruega (5) afirma que los cloruros siempre llegan hasta la armadura, y que la gran mayoría de las estructuras por él inspeccionadas, con 60 años o menos de servicio, estaban afectadas por corrosión en algún grado.

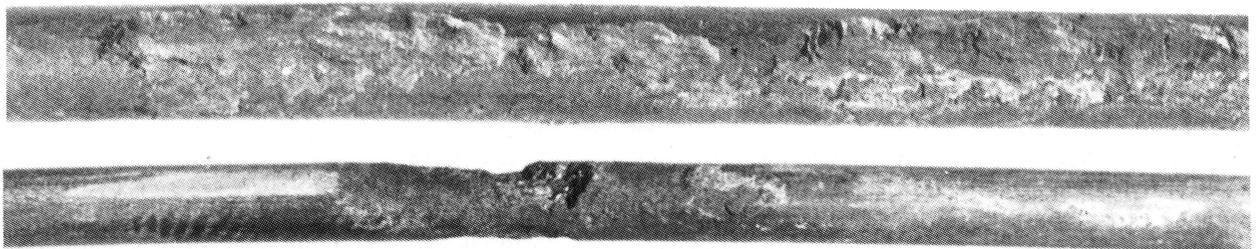


Fig. 2.—Aspecto de dos redondos de acero de pretensado después de sufrir ataque por cloruros (edad = 5 meses) añadidos en el momento del amasado en forma de  $\text{CaCl}_2$ .

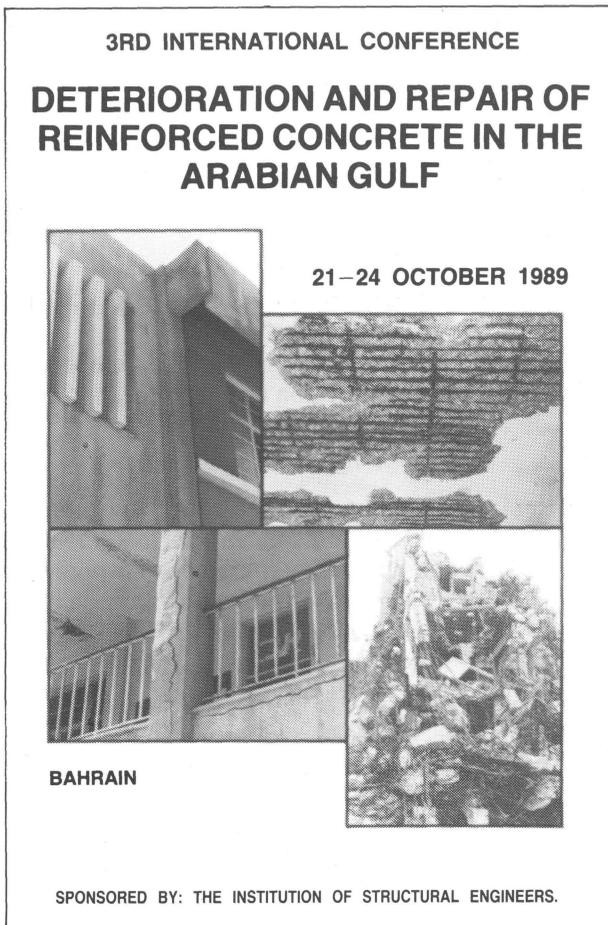


Fig. 3.—Portada de anuncio de la 3.ª Conferencia Internacional sobre "Deterioro y reparación de hormigón armado en el Golfo de Arabia", en la que se muestran algunos casos de corrosión.

Finalmente es necesario hacer referencia a la situación actual en la que se encuentran muchas estructuras construidas en general por empresas europeas, en países árabes con climas cálidos y húmedos. Muchas de ellas han alcanzado un increíble estado de ruina por corrosión de armaduras en períodos de 5 a 10 años de vida (véase figura 3) (6). Concretamente los países del golfo Pérsico han comenzado a organizar congresos con el fin de promover estudios para averiguar las causas, que parecen ser múltiples: aguas salobres, áridos de mala calidad y contaminados, una mano de obra con muy deficiente cualificación, curado inapropiado, etcétera. Son realmente espectaculares los ejemplos de ruina que se muestran, con el agravante de los pocos recursos técnicos con los que cuentan estos países.

**FACTORES ECONOMICOS**

Existen muy pocos estudios, realizados sistemáticamente y con rigor, sobre las consecuencias económicas que acarrea la corrosión de armaduras. Sin duda los más fiables son los realizados en EE.UU., de los que se darán algunas cifras, aunque no son extrapolables a otras áreas geográficas que tengan climas más templados. De todas formas, pueden dar una idea del por

qué en algunos países se están adoptando estrategias muy extremas para evitar que las cifras crezcan de forma exponencial, como hasta el presente.

J. Slater publicó, en 1979 (7), los costes asociados al uso de sales de deshielo que se muestran en la figura 4. Si se exceptúan los daños causados en el parque automovilístico, las pérdidas mayores son las causadas en puentes y carreteras, que ascendían entonces a 500 millones \$ USA/año, según la Environmental Protection Agency (EPA) y a 152 millones según el Salt Institute. En el mismo trabajo, Slater avanzaba una previsión de gastos realizada por la Federal Highway Administration (FHA) en reparación de estructuras sólo del Sistema Federal (Interstate System) y sólo de las afectadas por sales de deshielo. El coste total de reparación y protección de puentes se estimó en 2,6 billones \$ USA para 1996.

En 1980, Kilaeski publicó otro trabajo (8) en el que citaba un censo de 234.000 puentes en el Sistema Federal y unos 6.900 en el resto de la red viaria, necesitados de reparaciones estructurales debido a la corrosión de armaduras. Calculaba el costo de la reparación o reconstrucción de estos puentes en 12,5 billones \$ USA que elevaba a 100 billones al considerar todo el sistema viario del país, lo que representaba un 10 por 100 del Producto Interior Bruto (GNP). Dramatizaba, finalmente, que además esta situación se producía en puentes con una vida de alrededor de 5 años, cuando habían sido calculados para 30 ó 50 años.

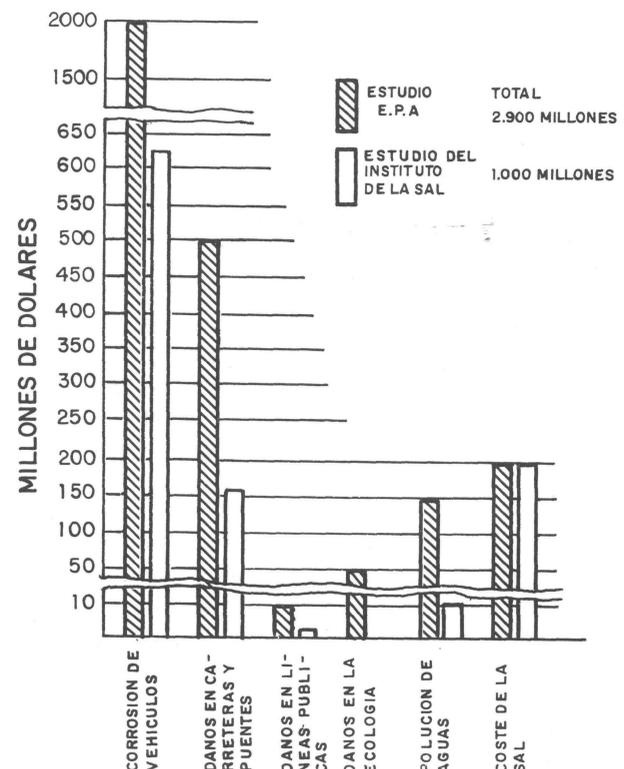


Fig. 4.—Costes anuales en dólares debidos a corrosión por el uso de sales de deshielo.

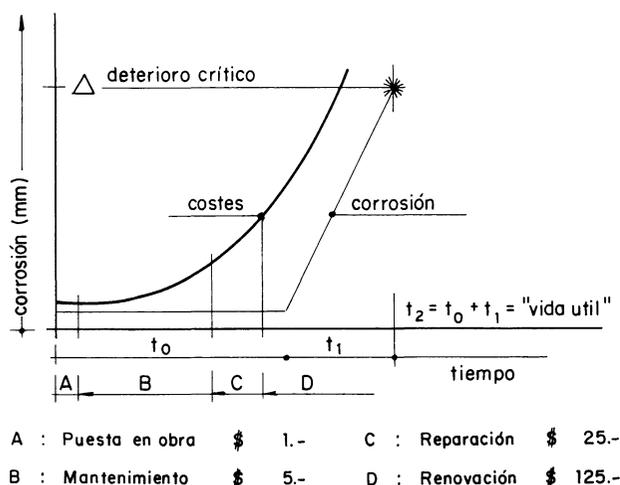


Fig. 5.—Regla de los cinco de Sitter (11) basada en el modelo de vida útil de Tuuti.

En 1982, Craig, O'Conner y Ahlskog (9) vuelven a incidir sobre las estadísticas, refiriéndose a un inventario de puentes reciente de la FHA. De los 560.000 puentes censados, 39.000 necesitaban rehabilitación para ser usados de forma segura. Esto suponía 33 millones de m<sup>2</sup> de tablero, que calculando un costo de reparación de 215 \$/m<sup>2</sup> suponía 7,2 billones \$ USA. En el mismo trabajo, citan la intervención del Secretario de Transportes en marzo de 1981 en el "Report to Congress on the Highway Bridge Replacement and Rehabilitation Program" en el que alude a que 209.000 puentes tienen deficiencias cuya reparación necesitaría 41 billones \$ USA.

Más recientemente Skalny (10), en 1987, en nombre de comité "Concrete Durability" y en un informe al National Research Council de USA, resume la situación de la siguiente manera: el valor de todos los edificios y estructuras de hormigón fue calculado en 1981 por el Bureau of Census en alrededor de 6 trillones \$ USA. Por otro lado, en 1985 el volumen de negocio en construcción fue de unos 300 billones \$ USA, empleando alrededor de 5,5 millones de trabajadores (17 por 100 de la fuerza trabajadora estadounidense). En relación a este volumen de negocio, los costos estimados en 1984 de reparación y construcción por el Transportation Research Board son de 50 billones \$ USA.

Para finalizar este apartado de breves citas sobre las repercusiones económicas del deterioro provocado por la corrosión de armaduras, es obligada una cita a W. Sitter (11) y su "Regla de los cinco" (figura 5). Este autor primero divide el modelo de Tuuti, de vida en servicio, en varias fases:

- Cálculo y puesta en obra.
- Comienzo de la corrosión.
- Aceleración del proceso (reparaciones locales).
- Reparación masiva o demolición y reconstrucción.

A continuación afirma que un dólar gastado en prevenir en la fase A ahorra tener que gastar 5 dólares en la fase B, 25 en la fase C y 125 en la fase D. Aunque los costos sólo pretenden ser aproximados, esta regla es aceptada como indicativa del ahorro potencial cuando se previene desde el principio o se interviene a tiempo.

## EVOLUCION HISTORICA DE LAS INVESTIGACIONES

Se pueden diferenciar tres períodos de tiempo en la evolución de la investigación en el campo de la corrosión de armaduras:

- Hasta 1959 en que se aplican por primera vez (12) (13) técnicas electroquímicas para medir la corrosión a barras de acero embebidas en hormigón. Hasta ese momento los artículos son poco numerosos y dispersos y utilizan la observación visual puesta a punto de una técnica de medida (16).
- Desde 1959 a 1975-80 en que se empieza a generalizar el uso de técnicas electroquímicas de medida siendo, en 1970-73, cuando se utiliza por primera vez la medida de la Resistencia de Polarización,  $R_p$ , para medir la intensidad instantánea de corrosión (14).
- A partir de la década de los 80, en la que se incrementa muchísimo el interés de gobiernos, investigadores e industrias por encontrar soluciones a los graves problemas económicos que plantea la reparación de estructuras de hormigón. En estos últimos años se han multiplicado de forma exponencial el número de Congresos, Comités Técnicos y reuniones especializadas sobre esta materia. También es de destacar que muchos investigadores de otras especialidades comienzan a dedicarse a ésta, a la vista de las solicitudes provenientes de la industria y de la financiación pública disponible.

Cuando el IETCC comenzó a abordar la investigación sistemática de la corrosión de armaduras en 1969 (15), el problema preocupaba en nuestro país principalmente por los efectos negativos que había causado el uso indiscriminado del  $CaCl_2$  como acelerante del fraguado. No existía entonces ninguna técnica de medida no destructiva, lo que obligaba a realizar series de numerosísimas probetas cuando se intentaba seguir la evolución con el tiempo del fenómeno; objetivo prioritario fue la puesta a punto de una técnica de medida (16).

En esos años muy pocas organizaciones se interesaban por esta materia, siendo de destacar por lo tanto la labor de la Reunión Internacional de La-

boratorios de Ensayo (RILEM), que con sus Congresos sobre Durabilidad en 1961 y 1969 enmarcó el problema y favoreció un debate científico sobre sus diversas vertientes, como luego se reflejó en su primer State - of - the - art - Report publicado en 1974 (17): "Corrosion of Reinforcement in Concrete". En general eran principalmente investigadores europeos los que abordaban el tema con más acierto y nivel.

Ha destacado también el interés suscitado en EE.UU., reflejado en las distintas publicaciones del del ACI (18), si bien debido a la urgencia de encontrar soluciones viables a su preocupante situación en la red viaria. Los trabajos realizados en Norteamérica han tenido una fuerte componente de aplicación inmediata y han sido deficientes en base científica. Sin embargo, esta situación está cambiando de forma muy notable y acelerada a partir de la publicación en 1980 del informe del National Research Council, titulado "The status of cement and concrete R & D in the United States" y muy en especial desde 1987 en que se lanza el "Strategic Highway Research Program" (SHRP). Este programa está financiado por la Surface Transportation and Urban Relocation Assistance de la FHA con 150 millones \$ USA en cinco años. El programa contempla sobre todo objetivos de investigación aplicada y define cuatro áreas preferentes:

- Características de las mezclas asfálticas.
- Comportamiento de pavimentos.
- Mantenimiento y operación de autopistas.
- Estructuras y hormigón.

Gracias a esta iniciativa, las investigaciones están siendo muy favorecidas y ya se detecta otro clima científico en las aportaciones norteamericanas.

Otras dos áreas del mundo que han dedicado siempre mucha atención a esta materia son la URSS y Japón, aunque sus contribuciones han sido difíciles de seguir por las dificultades idiomáticas. Los trabajos publicados por investigadores de la URSS en el pasado han sido muy importantes en algunas áreas (inhibidores o carbonatación, por ejemplo), si bien su escasa presencia en congresos en los últimos 10 años y sus raras publicaciones en inglés han hecho que su peso específico en la opinión internacional sea prácticamente nulo en el presente. Japón, en cambio, ha ido en sentido creciente, siendo en la actualidad uno de los países que se puede comparar a USA en cuanto a nivel de preocupación gubernamental, o en evolución de su normativa o número de trabajos publicados. Por desgracia las barreras del idioma y la distancia, siguen siendo muy importantes a la hora de un frecuente intercambio de experiencias con investigadores japoneses.

## PRIORIDADES ACTUALES EN INVESTIGACION

A continuación se va a intentar enumerar cuáles son las áreas en las que se concentra un mayor interés o dónde las lagunas del conocimiento son mayores. Las prioridades que se citan a continuación son opinión subjetiva de los autores, ya que cada país y cada organización elige sus prioridades en función de las circunstancias locales, por lo que ponderar su mayor interés relativo es tarea prácticamente imposible, por lo amplio del tema en la actualidad. Tal vez sea éste precisamente el primer punto a resaltar en el momento presente: que se aborda el estudio de todos los temas relacionados a la vez y de forma muy intensa. Así, son numerosísimos los trabajos que anualmente se publican sobre corrosión de armaduras, en contraste por ejemplo con otras líneas relativas a durabilidad que fueron prioritarias en el pasado (ataque por sulfatos, por ejemplo). La consecuencia inmediata es que la labor de lectura y seguimiento de la literatura representa una parte muy importante de la tarea investigadora. Similar observación puede realizarse de la necesidad de asistencia a Congresos, donde resulta fundamental estar para enterarse de los últimos avances que evolucionan muy deprisa y conocer las tendencias de los intereses industriales.

Las líneas que van a ser objeto de comentario a continuación son:

- 1) Causas de la corrosión: cloruros, carbonatación y corrosión bajo tensión.
- 2) Métodos de medida y diagnóstico.
- 3) Predicción de vida útil residual.
- 4) Métodos de protección complementarios.
- 5) Estrategias de reparación e idoneidad de materiales de reparación.
- 6) Evolución de normativas.

### 1) Causas de la corrosión

En el campo de la acción de los cloruros, aunque desde un punto de vista básico quedan muchas lagunas por investigar (más propias de especialistas en corrosión localizada), ya se dispone de suficiente evidencia para poder hacer predicciones relativamente fiables. Es pues un área en dónde no se concentran investigaciones punta, más bien se reduce a investigadores noveles en la materia y que la abordan tratando de estudiar el efecto de los cloruros, por ser el más fácilmente estudiado. Aun así, es importante recordar que no se ha llegado a ningún acuerdo sobre un límite de cloruros por debajo del cual la corrosión no es posible (19) debido a la cantidad de variables que conlleva la fabricación del hormigón.

Sin embargo, al efecto de la carbonatación en la corrosión de armaduras es una de las líneas que ha suscitado interés en los últimos años y comienza ya a haber exceso y repeticiones, en lo relativo a la relación entre velocidad de carbonatación y características del hormigón (20). En cambio, siguen prácticamente siendo únicos los trabajos realizados por el grupo español que trabaja en corrosión de armaduras y del que forman parte los autores del presente artículo (1) sobre las velocidades de corrosión que alcanzan las armaduras cuando el hormigón se ha carbonatado.

Existe otra área que fue prioritaria en el pasado y en el presente no es considerada así, a pesar de que siguen prácticamente sin contestación la mayoría de los interrogantes sobre el mecanismo que desencadena este fenómeno. Se trata de la corrosión bajo tensión. Aquí, a juicio de los autores queda mucho por hacer, si bien la situación presente es de desconcierto y de no saber qué pasos dar para poder avanzar en su conocimiento.

En cambio, mayor interés suscita la repercusión que puedan tener, en la durabilidad de las armaduras el empleo de adiciones crecientes al cemento o al hormigón, en especial cenizas volantes y humo de sílice.

## 2) Métodos de medida y diagnóstico

Esta sí es una línea en la que hay acuerdo sobre su total prioridad en todos los países y en todos los informes. Es evidente que sin un buen método de medida de la velocidad de corrosión de las armaduras embebidas en hormigón no es posible estudiar el fenómeno con exactitud y rigor.

Sin embargo, a pesar de esta evidencia, sorprendentemente son muy pocos los investigadores que acuden al uso de técnicas de medidas, como la  $R_p$  u otras más antiguas (curvas de polarización). La mayoría de los trabajos siguen basados en la medida del potencial de corrosión o en la simple observación visual de los redondos una vez rotas las probetas. Este es uno de los motivos de la lentitud de los progresos de muchos autores que trabajan en este área.

Dos son las técnicas que más se utilizan en la actualidad a nivel de laboratorio y que centran el mayor interés de los que acceden a su uso: la medida de la  $R_p$  y de la Impedancia Electroquímica. De la primera fueron pioneros en su aplicación al hormigón, en 1970-73, los autores del presente trabajo (21), y de la segunda lo fueron Hladky, John, Searson y Dawson de Inglaterra en 1981 (21). Sólo mediante el empleo de estas técnicas,

en especial la  $R_p$ , es posible acceder a conocer la cinética de los procesos, y por tanto, a predecir o interpretar con rigor los comportamientos.

Especial interés suscita, en la actualidad, la aplicación de estas técnicas a la medida in situ de la velocidad de corrosión. Cuatro grupos: uno norteamericano, otro francés, otro japonés y otro español —del que forman parte los autores— se disputan actualmente el liderazgo, dentro de la Investigación, de esta materia. Es fácil deducir la trascendencia económica que puede tener, a la hora de acometer una reparación, el conocer la diferente velocidad de corrosión de las diversas partes de la estructura con objeto de comenzar a reparar aquéllas que indiquen mayor riesgo, o bien para hacer el seguimiento de una estructura, una vez reparada. La puesta a punto de métodos de medida rápidos y sencillos, para ser utilizados a pie de obra en grandes estructuras, y el desarrollo de un "corrosímetro", se cuentan indudablemente entre los puntos que más impulsarán el futuro progreso de esta temática.

## 3) Predicción de vida útil residual

Cuando se visita una obra dañada por corrosión de armaduras, la primera pregunta que formula el propietario es ¿puede sufrir un colapso en breve tiempo? ¿cuánto tiempo puede aguantar sin que lo sufra? Estas son preguntas a las que sólo se puede contestar, sin exponerse a un riesgo de error grave, basándose en una experiencia dilatada y en una intuición clara.

Los datos experimentales son escasísimos y no existe ningún modelo que permita un cálculo de la situación real en la que se encuentra la estructura, ya que se desconoce, por ejemplo, cómo incide la generación progresiva de óxido hasta la fisuración del recubrimiento en la adherencia acero-hormigón.

El único modelo que ha sido admitido internacionalmente es el debido a Tuutti (23) (figura 6) que ha servido a Sitter para enunciar su regla de los cinco, pero que es meramente cualitativo, por lo que queda todo prácticamente por hacer en cuanto a tratar de predecir la vida útil residual de estructuras dañadas por corrosión de armaduras.

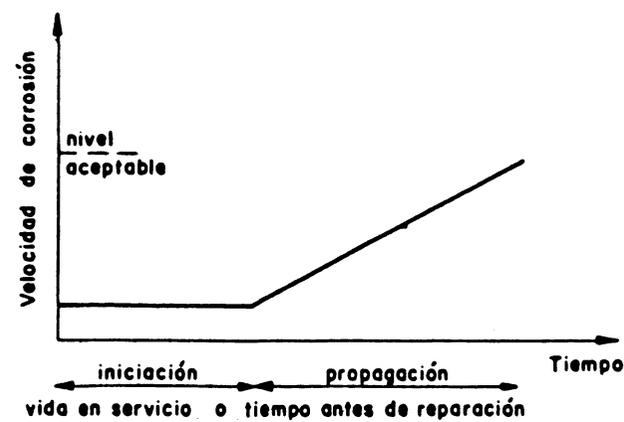


Fig. 6.—Modelo de vida útil propuesto por Tuutti (23).

Existen también diversos intentos de abordar el problema, pero a partir de un modelo general; tal es el caso del comité conjunto CIB-RILEM "Prediction of service life of building materials and components" - Publicación n.º 96 del CIB, pero al comenzar por el modelo general complica enormemente el planteamiento. Más accesible parece intentar la solución de lo particular a lo general, a partir concretamente de datos de velocidad de corrosión que pueden ser transformados en reducción de sección del diámetro de las armaduras y, en consecuencia, en pérdida de capacidad resistente de la armadura. Sólo la conjunción de esfuerzos de especialistas en corrosión (ciencia de materiales) y en cálculo de estructuras (ingeniería de materiales) podrá allanar caminos en esta línea.

#### 4) Métodos de protección complementarios

La figura 7 es un conocido resumen de los métodos de protección complementaria que se han utilizado hasta el presente para evitar la corrosión de las armaduras. Todos estos métodos han sido usados en la práctica, si bien ninguno está avalado por el completo éxito durante largos períodos. De todos ellos el que concita más interés en el momento presente, es la protección catódica. Sin duda este método, al ser el único que es capaz de detener una corrosión ya iniciada, es el que alienta más esperanzas. Aspectos tales como tipo de ánodos más idóneos y más durables, cambios microestructurales y de composición del hormigón, potenciales de protección más rentables, etc., están siendo intensivamente abordados en la actualidad.

En cambio, métodos de protección como la galvanización o los inhibidores, a pesar de ser muy eficaces en determinadas circunstancias, y necesitarse mucha investigación todavía, no suscitan el mismo desbordado interés.

Dentro de este capítulo de métodos complementarios de protección puede aludirse a los recubrimientos o

pinturas del hormigón. En la actualidad son muy escasos los trabajos que los contemplan, pero sin duda representarán una parte muy importante en el futuro, al irse imponiendo cada vez más la idea de proteger el hormigón contra la intemperie y evitar superficies vistas.

#### 5) Estrategias de reparación e idoneidad de materiales de reparación

Aunque, por el momento, la investigación sobre procedimientos de reparación de las estructuras de hormigón armado no ha recibido atención prioritaria en casi ningún país, no parece muy arriesgado aventurar que la fuerza de los hechos no tardará en obligar a subsanar tal error. Hasta el momento las reparaciones se realizan más por estrategias comerciales que técnicas. En general, además, suelen ser abordadas por especialistas que las aplican por igual a cualquier estructura, con independencia de la causa del daño. Así, se rellenan fisuras, se restituye el hormigón desprendido, se limpian armaduras, etc. sin tener en cuenta por ejemplo si el hormigón estaba o no contaminado por cloruros. La consecuencia es que muchas de las reparaciones, en especial aquéllas realizadas en estructuras situadas en ambientes especialmente agresivos, presentan vidas útiles inferiores a la del propio hormigón y es necesario volver a reparar en cortos espacios de tiempo. Evaluar la durabilidad de los materiales de reparación en relación a su idoneidad, para un determinado ambiente agresivo, y definir estrategias de reparación, también para cada ambiente, empieza a ser un sentir generalizado, que se traducirá a corto plazo en un aumento considerable de los trabajos de investigación en esta línea.

#### 6) Normativa

Muy poco o nada han variado muchas normativas nacionales en relación a su forma de contemplar el difuso término de durabilidad o vida útil. Así, limitaciones al contenido mínimo de cemento, relación a/c, espesor de recubrimiento o ancho de fisuras suelen ser las únicas ayudas que se encuentra el proyectista cuando trata de calcular una estructura. Esta concepción deberá cambiar imperativamente en el futuro, si se pretenden minimizar los riesgos por corrosión de armaduras, y las normativas deberán contemplar, los métodos de protección adicionales necesarios en ambientes agresivos. El CEB, sensible a esta necesidad, contempla ya en la redacción del Model Code de 1990 un capítulo entero dedicado a los aspectos de durabilidad, donde surgen muchas dificultades a la hora de conjugar los aspectos relativos al material con los comportamientos estructurales.

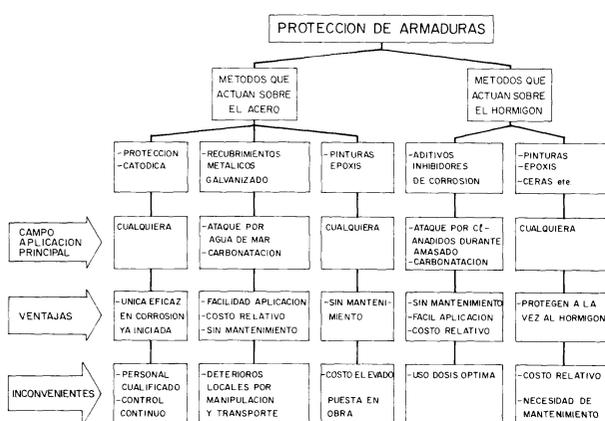


Fig. 7.—Métodos complementarios de protección de armaduras: campos de aplicación, ventajas e inconvenientes.

## CONSIDERACIONES FINALES

Cuando los autores del presente artículo se adentraron en 1969 en esta temática, a propuesta del Dr. J. Calleja, del IETCC, no pensaron nunca que casi 20 años después se encontrarían todavía inmersos en ella y con un interés creciente. Son muchos todavía los aspectos inéditos en este área, que se relaciona fuertemente con las de reparación y rehabilitación, lo que multiplica sus derivaciones.

Entre los avances necesarios para controlar los efectos de la corrosión de armaduras, a juicio de los autores emergen dos como los más necesarios: a) establecer un sistema de medida, que informe a pie de obra sobre la situación de una estructura en el momento en que se inspecciona, y b) desarrollar un modelo de predicción de la vida útil en función del medio ambiente y la situación particular de cada estructura. El primero debería contemplar, no sólo la información sobre el estado de corrosión o no, de las armaduras, sino también sobre la seguridad global de la estructura. Y el segundo podría ser un sistema experto o simplemente un algoritmo, que cuantificase el efecto de la agresividad ambiental a lo largo del tiempo en función de las materias primas y parámetros resistentes de proyecto, por supuesto teniendo en cuenta, mediante coeficientes correctores, las condiciones de puesta en obra. Un algoritmo similar sería deseable para estructuras sometidas a reparación y refuerzo.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) J. A. GONZALEZ, S. ALGABA, C. ANDRADE - Corrosion of reinforcing bars in carbonated concrete - British Corrosion Journal. Vol. 15, n.º 3 (1980), 135-139.
- (2) F. TOMOSAWA - Japanese Standards and Regulations on Concrete for Buildings. 1st Joint Workshop on Durability of Reinforced Concrete Australia - Japan. Tsukuba, Sep. (1986).
- (3) F. TOMOSAWA - Design for improving durability of reinforced concrete buildings - *ibid.* ref. 2.
- (4) ACI - Comité n.º 362. State-of-the-Art report on Parking Structures ACI Journal - Julio - Ag. (1985), 544-578.
- (5) D. GJØRV y N. KASHINO - Durability of a 60 - years - old reinforced concrete pier in Oslo Harbor - Materials Performance - Feb. (1986), 18-26.
- (6) International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf (portada).
- (7) J. SLATER - Corrosion of reinforcing steel in concrete: magnitude of the problem - Materials Performance. Jun. (1979), 34-37.
- (8) W. P. KILARESKI - Corrosion induced deterioration of reinforced concrete. An overview - Materials Performance. Marzo (1980), 48-50.
- (9) J. R. CRAIG, D. S. O'CONNOR y J. J. AHLKOG - Economic of Bridge Deck. Protection Methods - Materials Performance. Nov. (1982), 32-34.
- (10) J. SKALNY - Concrete Durability: A Multibillion - Dollar opportunities - Report to the National Research Council USA. Marzo 1987.
- (11) W. SITTER - "Interdependence between technical service life prediction" CEB-RILEM 2nd. Int Workshop "Prediction of Service Life of Concrete Structures". Oct. (1986) - Bolonia - Italia.
- (12) H. KAESCHKE - Die Prüfung der Korrosionsgefährdung von stahlarmerungen durch Betonzusatzmittel - Zement - Kalk - Gips. n.º 7 (1959), 286-305.
- (13) A. BAUMEL y H. J. ENGELL - Corrosion of steel in concrete - Arch. für Eisenhüttenwesen. 30 (1959), pg. 417.
- (15) C. ANDRADE - Nueva técnica electroquímica de medida de la velocidad de corrosión de armaduras en hormigones armados y pretensados. Empleo de aditivos inhibidores como método de protección - Tesis Doctoral - Univ. Complutense de Madrid - Junio 1973.
- (16) C. ANDRADE y J. A. GONZALEZ - Quantitative corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurement - Werkstoffe und Korrosion. Vol. 29, (1978), 515-519.
- (17) RILEM - Comité 12-CRC - Corrosion of Reinforcement in Concrete. State-of-the-Art - Report - Revue des Matériaux et Constructions - Sep. (1976), 187-205.
- (18) ACI - Comité 222 - Corrosion of Metals in Concrete - ACI JOURNAL. En-Feb. (1985), 3-32.
- (19) A. R. ANDERSON y R. W. BLACK - Questioning the limit of chloride. Concrete Int. Sep. (1985), 28-34.
- (20) D. W. S. HO y R. K. LEWIS - The assessment of concrete quality and implication of code requirements for durability - 4.º Conf. Intern. sobre Durability of Building Materials and Components. Singapore (1987), 508-515.
- (21) S. FELIU, J. A. GONZALEZ, C. ANDRADE y V. FELIU - On site determination of the polarization resistance in a reinforced concrete beam - Corrosion (en prensa). USA.
- (22) D. G. JOHN, P. C. SEARSON y J. L. DAWSON - Use of A. C. Impedance technique in studies on steel in concrete in immersed conditions - Brit. Corros Jour. Vol. 16, n.º 2 (1981), 102-106.
- (23) K. TUUTI - Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. (1982), 17-21.

\* \* \*