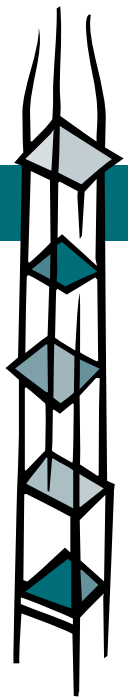


CORROSIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

M^a Cruz Alonso, M^a Carmen Andrade y José Fulla García - Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.



El acero embebido en hormigón se encuentra protegido frente a la corrosión mediante su pasivación. La razón de esta pasivación de la armadura es debida a la elevada alcalinidad del electrolito de los poros, básicamente constituido por KOH, NaOH y Ca(OH)₂, alcanzando valores de pH que oscilan entre 12,6 y 14. Esta elevada alcalinidad de la fase acuosa de los poros del hormigón favorece la formación de una capa de óxidos microscópica y transparente, que la protege de su disolución anódica y la mantiene inalterada por tiempo indefinido mientras no cambien las condiciones de servicio. Por otro lado, el recubrimiento del hormigón se comporta como una barrera física que aísla a la armadura del ambiente agresivo exterior.

La armadura debe estar embebida en hormigón de acuerdo con la normativa existente. En particular el diseño de la mezcla y el recubrimiento mínimo debe tenerse en cuenta y ser adecuado a la corrosividad del ambiente. En muchos casos estas medidas serán

suficientes para proteger la armadura, siempre que el hormigón sea correctamente colocado, compactado y curado.

La pérdida de durabilidad en el hormigón armado ocurre únicamente si la capa de óxidos pasivante se vuelve inestable debido, generalmente, a la penetración de los agresivos del ambiente exterior a través de la red de poros.

PROCESOS DE INICIACIÓN DE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS

Las dos causas principales de la pérdida de esta capacidad protectora del hormigón son: la carbonatación del recubrimiento, que generalmente induce corrosión generalizada, y la presencia de iones cloruros que producen picaduras y ataques localizados. Un esquema de estos tipos de corrosión se presenta en la Figura 2. La presencia de una corrosión desarrollada en la armadura se puede identificar fácilmente por la presencia de manchas de óxido en la superficie del hormigón y la aparición de fisuras paralelas a la dirección de las barras de armado. La corrosión bajo tensión del acero pretensado es un tipo especial de ataque localizado que se da en las estructuras pretensadas.

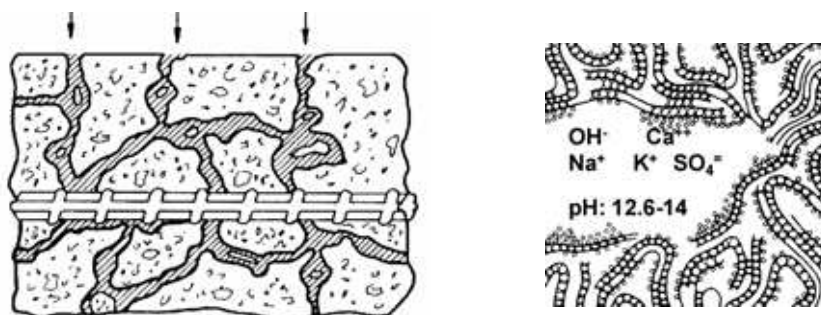


Figura 1.- Armadura embebida en hormigón. Alcalinidad de la fase acuosa de los poros.



REPORTAJES

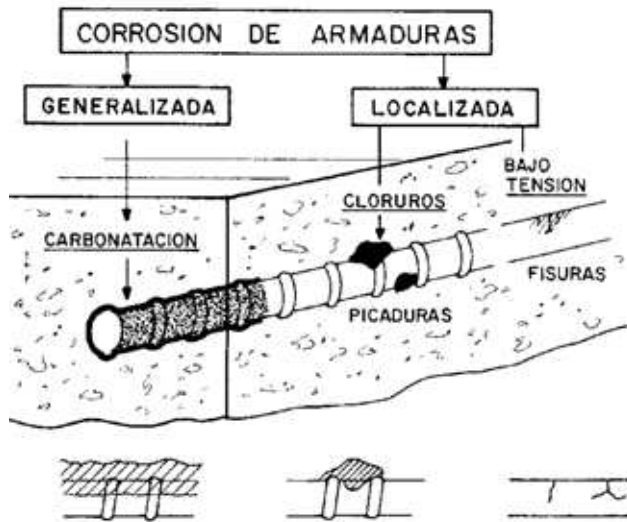


Figura 2.- Esquema sobre los tipos de corrosión de armaduras y causas.

Carbonatación

El dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los hidróxidos y fases alcalinas del hormigón reduciendo su pH hasta valores próximos a la neutralidad. El producto de la reacción mayoritario resultante de este proceso es el carbonato cálcico. Cuando estas condiciones del electrolito de los poros se alcanzan a nivel de la armadura, ésta queda en unas condiciones electroquímicas que permiten su corrosión activa si las condiciones de humedad y temperatura lo permiten.

La carbonatación es un proceso de difusión y, por lo tanto, su avance en el interior del hormigón progresa atenuándose en el tiempo. La modelización de la carbonatación suele realizarse utilizando la expresión:

$$X = V_{\text{CO}_2} \sqrt{t}$$

donde X es la profundidad carbonatada, V_{CO_2} representa una velocidad de carbonatación y t es el tiempo de exposición.

El factor V_{CO_2} dependerá fundamentalmente del tipo de hormigón y de las características del ambiente. La carbonatación no se desarrollará si el hormigón está saturado en agua o si está totalmente seco. Sin embargo, su avance será máximo cuando se produzcan ciclos de humectación/secado, que confieren al hormigón un grado de saturación moderado.

Ataque por cloruros

Los iones cloruro pueden estar presentes en el hormigón si se añaden a la mezcla a través de los aditivos, las adiciones, el agua de amasado o los áridos. Sin embargo, esta situación no es ya muy común pues desde hace tiempo la reglamentación en la materia prohíbe la inclusión de estos iones en el hormigón. El medio más frecuente de ingreso de los iones es desde el exterior, ya sea porque la estructura esté localizada en ambiente marino o debido al uso de sales de deshielo.

Los cloruros inducen una destrucción local de la capa que pasiva del acero, ocasionando un ataque localizado que frecuentemente se transforma en picaduras. Dependiendo de la extensión de la corrosión, puede aparecer o no la fisuración del recubrimiento. En las zonas totalmente sumergidas las armaduras se pueden corroer sin ninguna señal externa de daño en el recubrimiento. En estas zonas sumergidas o en el hormigón completamente saturado, el ión cloruro penetra en el hormigón por difusión. Sin embargo en las zonas aéreas de ambientes marinos o en las zonas afectadas por ciclos de hielo-deshielo (zonas en las que se han aplicado sales de deshielo) la absorción capilar puede ser un mecanismo de penetración más rápido. En ambos casos la penetración se puede modelizar como dependiente de la raíz cuadrada del tiempo:

$$X = V_{\text{Cl}} \sqrt{t}$$

Una vez que el cloruro alcanza el nivel de la armadura, la corrosión no se inicia hasta que se alcance una concentración crítica, que por otro lado no puede tomar un valor constante, ya que depende de varios factores como: tipo de cemento, relación agua/cemento, curado, compactación contenido en agua de los poros, disponibilidad de oxígeno etc. Esta multidependencia hace que no se pueda definir un valor único de Cl para iniciar la corrosión; sin embargo una relación como se aprecia en la Figura 3, aparece con el potencial de la armadura. Así, el hormigón seco a la atmósfera induce potenciales más positivos que el hormigón sumergido. El valor mínimo

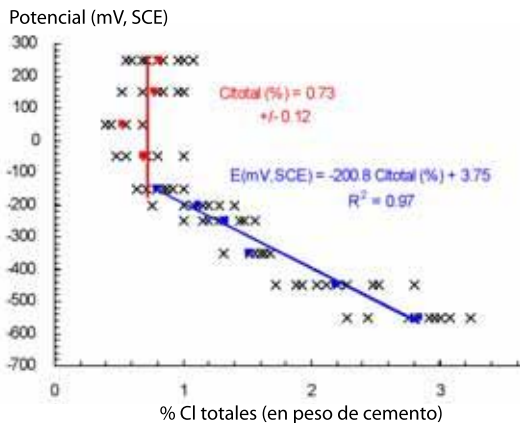


Figura 3.- Relación entre potencial y concentración crítica de cloruros.

de concentración crítica de cloruros totales es 0,4 % en peso de cemento, siendo este el valor adoptado por la Instrucción de Hormigón Estructural EHE.

VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS

En el caso de las armaduras, el modelo más sencillo y que mejor describe la vida útil de las estructuras en riesgo de corrosión es el de Tuutti. Este modelo se caracteriza porque subdivide la vida útil en dos fases, como se aprecia en la Figura 4. La primera fase, o periodo de iniciación, se asocia con el tiempo que tarda el agresivo en llegar hasta la armadura y provocar la despasivación. La segunda fase, o periodo de propagación, presenta una pendiente que depende de parámetros asociados al ambiente y al hormigón, como el oxígeno, la temperatura y el grado de saturación de los poros del hormigón.

Durante el periodo de propagación tienen lugar los deterioros sobre el hormigón y la armadura, como son: pérdida de sección y ductilidad de la armadura, fisuración del hormigón y pérdida de adherencia armadura/hormigón.

TÉCNICAS PARA EVALUAR EL DETERIORO

En una estructura en riesgo de corrosión es preciso identificar si la corrosión está activa, y cuantificar el deterioro o la pérdida de sección de la armadura. Dado que el proceso de corrosión de las armaduras es de tipo electroquímico, deben ser éstos los parámetros que se vean alterados como consecuencia de la corrosión y, por tanto, los que interesa

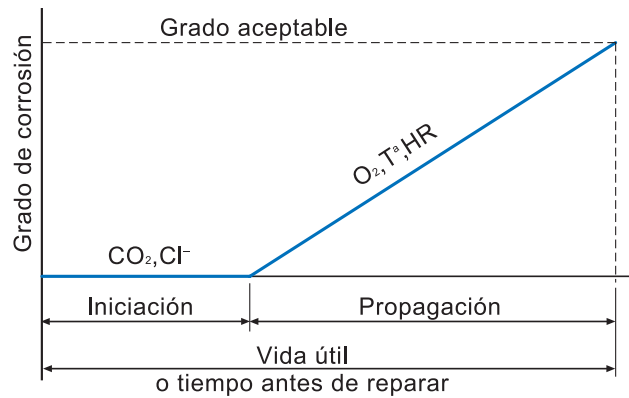


Figura 4.- Modelo simplificado de la vida útil para corrosión de armaduras según Tuutti.

determinar. Los parámetros más habitualmente analizados son el potencial de corrosión, (E_{corr}), la resistividad eléctrica del hormigón y la velocidad de corrosión, (I_{corr}).

Medida del potencial de corrosión

La medida del potencial de corrosión proporciona una información cualitativa sobre el riesgo de corrosión activa de la armadura, pero no cuantifica el proceso; no es posible sacar datos de pérdida de sección. Sin embargo, su determinación hace posible establecer unos límites entre los que se indique el porcentaje de riesgo. Estos rangos se incluyen en la Tabla 1.

Tabla 1.- Rango de riesgo de corrosión a partir del potencial de corrosión de la armadura.

Potencial (E)	Riesgo de corrosión
> -200mV	10 %
-200 > E > -350 mV	50 %
< -350 mV	90 %

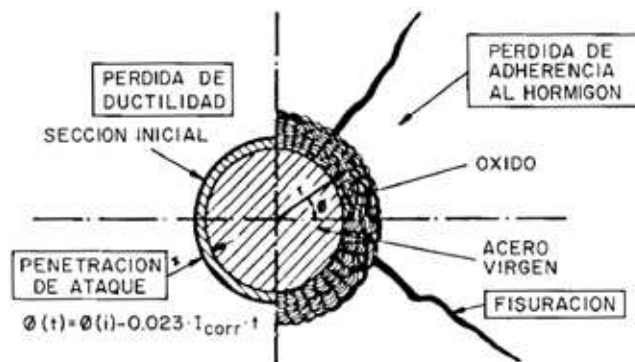


Figura 5.- Consecuencias del deterioro sobre el hormigón armado.



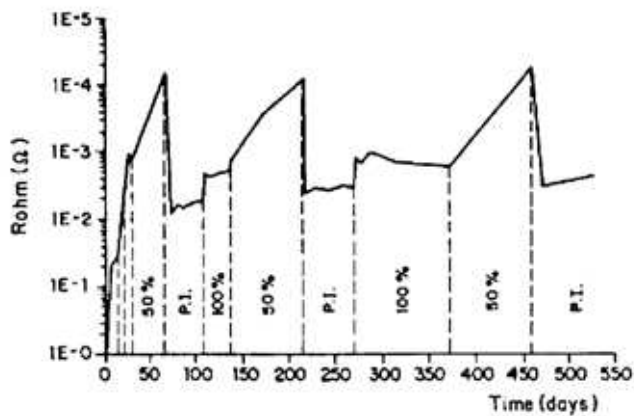
REPORTAJES

Medida de la resistividad

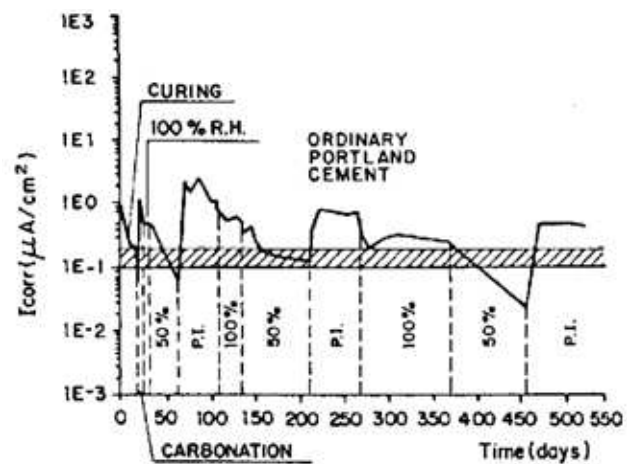
La medida de la resistividad del hormigón ofrece información sobre el grado de saturación de éste, y si hay presencia de agresivos existe una relación directa con la ausencia o presencia de corrosión activa. Se han establecido también unos rangos para este parámetro con la probabilidad de corrosión de la armadura, que se recogen en la Tabla 2. En la Figura 6 se observa la variación de la resistividad con la humedad.

⇒ **Tabla 2.-** Valores de resistividad del hormigón y riesgo de corrosión activa de la armadura.

Resistividad (KΩ cm)	Riesgo de corrosión
> 100 a 200	riesgo muy bajo
50 a 100	corrosión baja
10 a 50	corrosión moderada a alta
< 10	corrosión muy alta



⇒ **Figura 6.-** Variación de la resistividad con la humedad.



⇒ **Figura 7.-** Velocidad de corrosión de la armadura e influencia de la humedad.

Medida de la velocidad de corrosión

Este parámetro es el único capaz de cuantificar la velocidad a la que se corroe la armadura y, por tanto, permite estimar la pérdida de sección sufrida (Figura 7). La velocidad de corrosión se puede expresar en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ó en $\mu\text{m}/\text{año}$, la transformación entre una y otra viene dada por la expresión: $P_x (\mu\text{m}/\text{año}) = 0,0116 \cdot I_{\text{corr}} (\mu\text{A}/\text{cm}^2) \cdot t$.

En la Tabla 3 se dan los criterios para diferenciar entre corrosión activa y pasiva.

INFLUENCIA DEL AMBIENTE EN LA CORROSIÓN DE ARMADURAS

El parámetro ambiental que más influye es el grado de saturación de los poros del hormigón, que a su vez depende de la humedad ambiental. El contenido en agua líquida de los poros influye en la resistividad eléctrica del hormigón y el contenido en oxígeno a nivel de la armadura para facilitar los procesos de corrosión. Sin embargo, las condiciones de mayor agresividad no se dan en un hormigón saturado o completamente sumergido, ya que la difusión de oxígeno hasta la armadura pasa a controlar la cinética del proceso de corrosión, Figura 8.

La temperatura también influye y aunque inicialmente contribuye a activar los procesos con el incremento de temperatura –si el hormigón está saturado– por otro lado puede disminuir de forma significativa la cinética del proceso, debido a la evaporación de la fase acuosa de los poros (Figura 9).

MÉTODOS PARA AUMENTAR LA VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS

Requerimientos del hormigón

El hormigón debe ser lo más impermeable posible para garantizar una durabilidad frente a la penetración de agresivos. Esto significa que el árido debe ser por sí mismo impermeable y, en estado fresco, el hormigón debe estar bien compactado. El hormigón debe estar bien dosificado para garantizar una buena trabajabilidad. Por

⇒ **Tabla 3.-** Valores de velocidad de corrosión de la armadura y riesgo de corrosión.

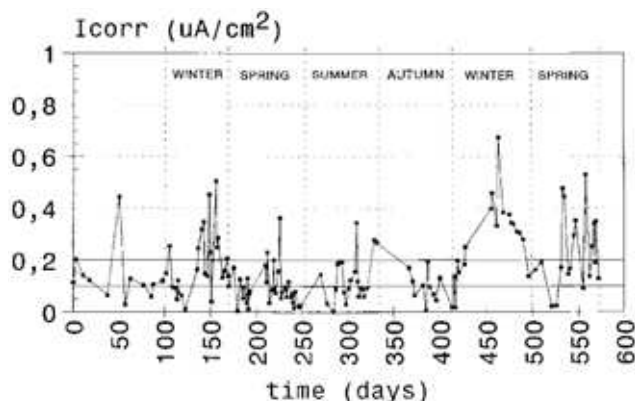
Velocidad de corrosión	Riesgo de corrosión
< 1	despreciable
1 a 5	corrosión baja
5 a 10	corrosión moderada
> 10	corrosión alta

otro lado debe asegurarse que no se introduzca algún tipo de agresivo con los componentes.

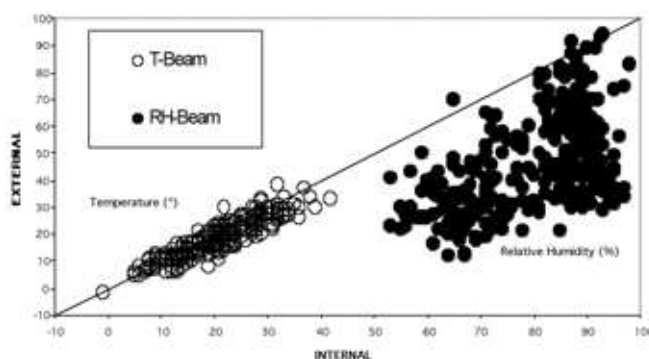
La porosidad del hormigón puede modificarse de forma significativa mediante la relación agua/cemento, pero desafortunadamente esta posibilidad está limitada por la pérdida de trabajabilidad del hormigón si la relación a/c desciende de forma excesiva. También se puede aumentar la cantidad de cemento, como en los hormigones de alta resistencia, pero esto lleva también a otra desventaja debido al aumento de la retracción del hormigón y producción de microfisuras. El uso de aditivos como los plastificantes pueden ayudar a solventar en parte estas limitaciones.

El desarrollo de resistencias a edades jóvenes lleva también asociado un adecuado curado del hormigón, ya que sino el recubrimiento puede resultar muy poroso. También la temperatura de curado es importante puesto que si se produce un gradiente de temperatura en el recubrimiento de hormigón puede producirse fisuración.

En cuanto al cemento, es especialmente su calor de hidratación y el contenido en Na y K quienes tienen un papel crítico respecto a la durabilidad de la armadura. El tipo de cemento afecta a la penetración del cloruro, efecto que no es tan significativo en el caso de la carbonatación, para la que es más importante la porosidad. Con respecto a la penetración de cloruros, se sabe que un hormigón de cemento Portland de bajo contenido en C_3A es menos resistente a la penetración de los cloruros. Las adiciones como cenizas volantes y escorias de horno alto, retardan la pene-



⇒ **Figura 8.-** Influencia ambiental en la velocidad de corrosión.



⇒ **Figura 9.-** Parámetros ambientales en el interior y exterior del hormigón.

tración del cloruro, no sólo porque resultan en una estructura porosa más refinada, sino porque son capaces de combinar más cloruros bloqueando la penetración de agresivo.

Métodos adicionales para mejorar la protección de la armadura

Hay dos vías posibles para proteger las armaduras frente a la corrosión, bien actuando sobre el hormigón, o actuando sobre las armaduras. La Figura 10 trata de ser un recopilatorio de los distintos métodos de protección adicionales incluyendo para cada caso las ventajas, limitaciones y los campos óptimos para su empleo.

Protección de las armaduras mediante galvanización

La galvanización de las armaduras mediante la inmersión en un baño de cinc fundido es un método de protección que ya comenzó a utilizarse en 1930 en las Islas Bermudas, donde ocurrían deterioros muy prematuros y destrucciones espectaculares en diversos puentes y estructuras de hormigón armado. Posteriormente,



REPORTAJES

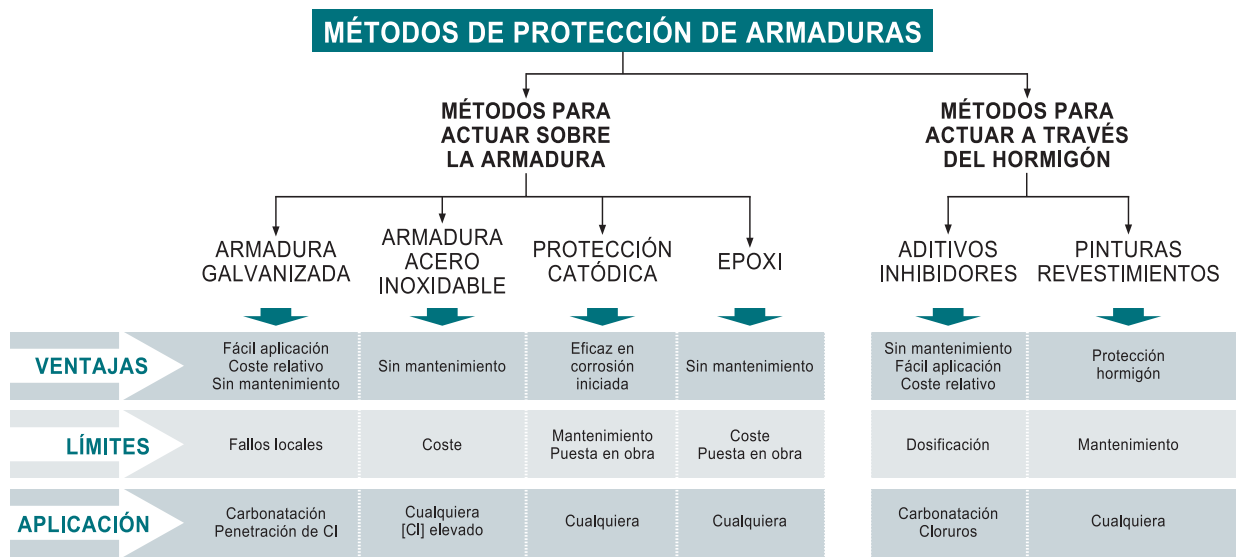


Figura 10.- Métodos adicionales de protección de armaduras. Ventajas, limitaciones y campos de aplicación.

en la década de los 70, se desarrolló y empleó en muchos puentes en USA. En la actualidad es cada vez más frecuente la recomendación del empleo de armadura galvanizada en estructuras que plantean requerimientos especiales frente a la corrosión, además del aportado por el propio recubrimiento de hormigón.

Las armaduras galvanizadas se pasivan en el hormigón formando sobre su superficie una capa de cristales que impide el progreso de la corrosión. La eficacia protectora de esta capa de cristales depende del pH del medio y de la estructura del galvanizado. El cinc es un metal anfótero, esto significa que es un metal estable dentro de una franja relativamente estrecha de pH, concretamente entre 6 y 12,5. Por debajo y por encima de estos valores la corrosión crece de manera exponencial. La pasta de cemento es un material alcalino y la fase acuosa contenida en sus poros posee un pH superior a 12,5. Esto significa que las armaduras galvanizadas inmersas en el hormigón se encuentran en el límite de su estabilidad y podría producirse su disolución continua; sin embargo, esto no ocurre debido a que el galvanizado logra pasivarse en estas condiciones. La presencia de Ca^{2+} es necesaria para la pasivación del cinc en el medio alcalino. El producto de corrosión causante de la pasivación del cinc se ha podido identificar en armaduras galvanizadas ensayadas en medios que simulan la disolución alcalina de los poros, conteniendo iones calcio, como el hidroxincato cálcico ($HZnCa$).

Transcurridos los primeros minutos de contacto del cinc con el medio alcalino, si el pH es suficientemente elevado tiene lugar una

reacción muy intensa, que se produce con desprendimiento de hidrógeno. Este proceso desaparece a las pocas horas debido a la continua formación de la capa de productos de corrosión que llega a hacerse continua sobre la armadura. Generalmente este proceso se identifica por los valores del potencial de corrosión medidos en la armadura galvanizada < -1000 mV (SCE). El pH = 12,8 se establece como límite para el inicio del desprendimiento de hidrógeno. La duración total de este proceso depende principalmente del contenido en álcalis del cemento.

La principal consecuencia del desprendimiento de hidrógeno es la formación de espacios en la interfaz armadura-hormigón si quedan burbujas atrapadas; el resultado sería una menor adherencia. Sin embargo, los ensayos realizados al respecto indican que aunque la generación de fuerzas de adherencia es lenta en las primeras edades de fraguado del hormigón con armadura galvanizada, éstas aumentan significativamente con el tiempo e incluso superan a las alcanzadas con armaduras de acero, debido a la generación progresiva de los productos de pasivación del cinc que actúan de anclaje y rellenan los espacios libres entre la armadura y el hormigón aumentando, además, la superficie de interacción entre ambos materiales, este efecto se ha intentado reflejar en la Figura 11.

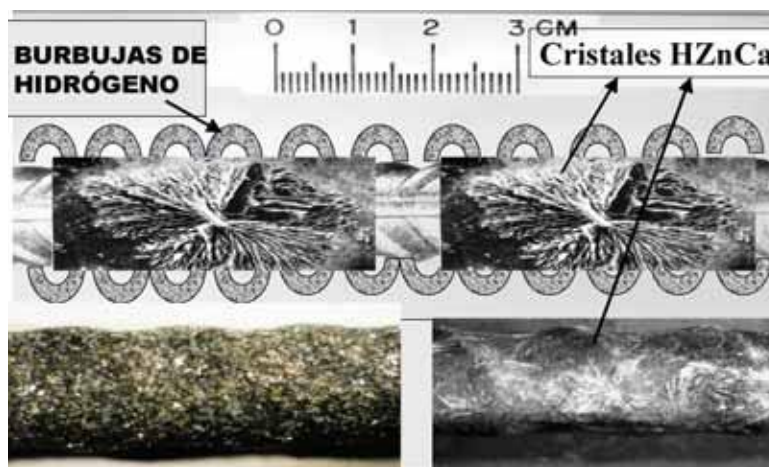


Figura 11.- Generación de productos de HZnCa y acoplamiento en la interfase armadura/hormigón.

No hay duda de que el cinc también se ataca por los cloruros, sin embargo es necesario alcanzar una mayor concentración de cloruros. El cinc se vuelve susceptible al ataque por picaduras en soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que contienen cloruros en concentraciones tres a cinco veces superiores al caso del acero. La capa externa de cinc puro es más resistente a la corrosión que las capas aleadas, es ésta la razón por la que son preferibles armaduras galvanizadas con una capa externa de cinc puro lo más continua, homogénea y compacta posible.

En el medio neutro propio de un hormigón carbonatado el galvanizado se recubre de carbonatos de cinc capaces de pasivar a la armadura y evitar que la corrosión progrese, siendo estable en estas condiciones.

Los aditivos inhibidores en el hormigón armado.

El empleo de aditivos inhibidores como método preventivo de la corrosión para el hormigón armado, adicionados en el amasado, cuenta ya con una larga trayectoria, tanto a nivel de laboratorio e incluso con aplicaciones en estructuras reales. La experiencia en el uso de inhibidores difiere mucho de unos productos a otros, según el tipo de aditivo empleado aunque el objetivo sea el mismo, proteger a la armadura frente a la corrosión. Uno de los requisitos básicos de los aditivos inhibidores de corrosión es su eficacia a largo plazo.

El producto más habitualmente referido en la literatura es el nitrito, tanto sódico como cálcico, e incluso en muchas ocasiones su acción inhibidora se toma como referencia en los estudios dirigidos a conocer la eficacia inhibidora de otros productos. Con los nitritos se han hecho estudios para conocer acerca de su acción

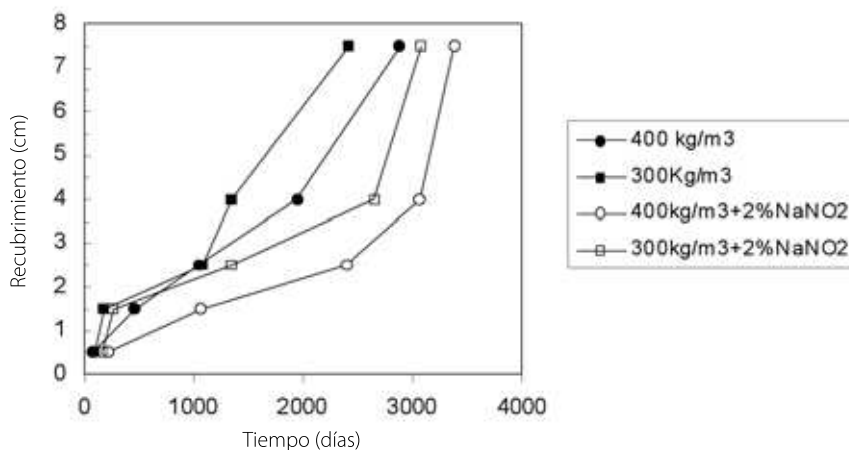


Figura 12.- Tiempo de despasivación de la armadura en presencia de nitrito en condiciones sumergidas de agua de mar.



REPORTAJES

inhibidora, controlando el proceso anódico, su capacidad para actuar tanto en medio neutro, hormigón carbonatado, como en medio alcalino, hormigón contaminado con cloruros (Figura 12). Incluso se admite que la concentración óptima $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ para lograr la eficacia como inhibidor para alargar la vida útil de las estructuras debe oscilar entre 0,5 y 1, pero se tienen dudas acerca de su capacidad para inducir corrosión localizada ante una dosis insuficiente.

Otros inhibidores también estudiados son los cromatos, el óxido de cinc y los fosfatos entre los compuestos inorgánicos. Entre los productos de naturaleza orgánica están los benzoatos y más recientemente han aparecido una amplia gama de productos orgánicos. Entre estos últimos son las aminas y amino alcoholes sobre los que se ha dirigido la mayor parte de la investigación; algunos resultados se incluyen en la Figura 13.

En general, la mayor parte de los experimentos con aditivos inhibidores adicionados al hormigón fresco proviene de ensayos de corta duración (horas, días, o como máximo 3 años). Cuando se tiene referencia del empleo en periodos más largos, el seguimiento sobre su eficacia ha sido insuficiente en la mayoría de los casos. En este sentido, únicamente en Norte América, la casa fabricante del nitrato cálcico tiene probetas con más de 10 años de exposición, y el Instituto Eduardo Torroja tiene vigas pretensadas amasadas con cloruros y nitritos con más de 25 años, y probetas sumergidas en agua de mar natural durante más de 15 años; algunos de dichos resultados corresponden a la Figura 4.

Merece una consideración especial la aplicación de aditivos inhibidores de corrosión en el hormigón endurecido que inicia su desarrollo en la década de los 90, con la posibilidad de que puedan servir para la reparación de estructuras en riesgo de corrosión.

Armaduras de acero inoxidable

En los últimos años se está manufacturando un tipo de armadura de acero inoxidable deformada en frío y en caliente. Su fabricación es muy similar a la del acero normal, sin embargo el coste es aún muy elevado.

Sus propiedades frente a la corrosión se caracterizan porque con un porcentaje de un 12 % de cromo el acero se autopasiva. Un aumento del contenido en cromo aumenta su resistencia frente a la corrosión, que puede mejorarse también mediante adiciones de níquel, molibdeno y nitrógeno. Estos elementos son importantes en la respuesta frente a la corrosión por picaduras.

La corrosión por picaduras es la forma más común de la corrosión del acero inoxidable en hormigón cuando la concentración de cloruros es elevada. La concentración crítica de cloruros para iniciar una corrosión por picaduras en acero inoxidable es claramente más elevada que en el acero al carbono.

En la Figura 14 se aprecia el efecto de la concentración de cloruros para despasivación en función del tipo de

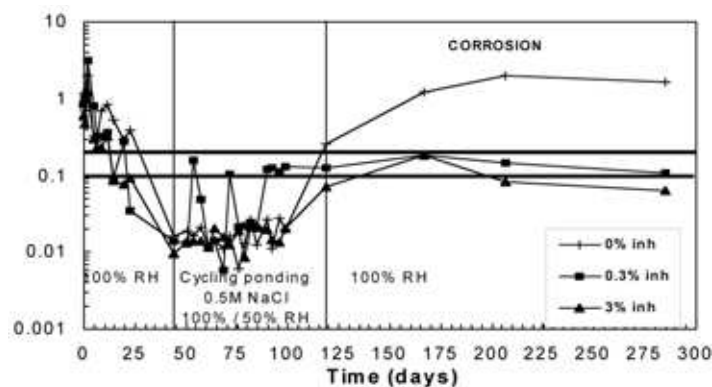


Figura 13.- Velocidad de corrosión de armaduras en mortero con cloruros. Capacidad protectora de inhibidor de la corrosión de naturaleza aminoalcohol.

acero inoxidable. Se han incluido datos de potencial de picadura en armaduras de acero inoxidable en presencia de cloruros, donde además se tiene también en cuenta el efecto en el contenido en, Cr, Mo y Ni en el material. Se detecta que el potencial de picadura se hace más positivo al aumentar el contenido en elementos aleantes. Los aceros inoxidables austeníticos y ferrítico-austeníticos pueden llegar a ser los más resistentes a la corrosión por picaduras. Los ferríticos con Cr > 10 % se sitúan en una posición intermedia, y con contenidos inferiores de Cr < 10 % son los menos resistentes.

Aunque la experiencia con este método de protección es aún escasa, se han empleado armaduras de acero inoxidable en estructuras en el Reino Unido, Italia, Alemania, Dinamarca, Sudáfrica y Japón. Aplicaciones típicas del acero inoxidable son aquellas circunstancias de ambientes especialmente agresivos, ya que su mayor coste dificulta una aplicación más extensiva. Se desconoce acerca del comportamiento y estabilidad a largo plazo del acero inoxidable en un medio tan alcalino como es el hormigón. La experiencia más dilatada es la de unos cajones de hormigón armado en un puerto en el Golfo de Méjico, construido con armadura de acero inoxidable en zonas concretas, que después de 60 años no presentaba signos graves de corrosión con concentraciones de cloruros del 2%, mientras que la armadura de acero presentaba serios deterioros.

Protección catódica como método preventivo

Uno de los métodos de protección frente a la corrosión de armaduras es el empleo de la protección catódica. Se basa en la aplicación de una pequeña corriente eléctrica a las armaduras de forma que éstas se sitúen en un potencial más negativo y pueda alargarse el tiempo de despasivación ante una entrada de cloruros. La prevención catódica debe realizarse durante la fase de construcción de la estructura y mantenerse durante su vida en servicio, por lo que el coste de mantenimiento debe contemplarse respecto al coste total de la estructura.

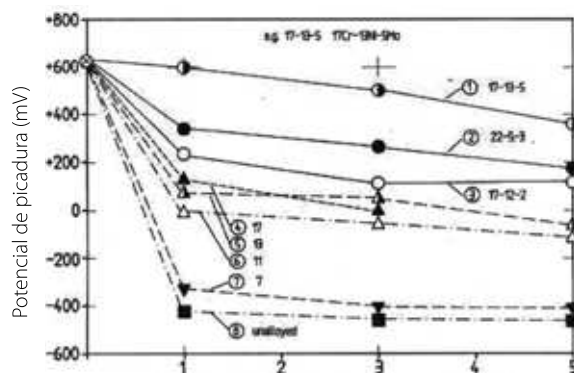


Figura 14.- Potencial de picadura en armaduras de acero inoxidable. Influencia de la composición.

La prevención catódica tiene un proceso de aplicación similar al de un sistema de protección catódica; la diferencia fundamental se basa en que el potencial al que se sitúa la armadura es menos negativo, lo que supone que el consumo de corriente necesaria para la protección de la armadura es muy inferior.

En la instalación de un sistema de prevención catódica los ánodos deben colocarse durante la fase de construcción de la estructura. Se debe diseñar el sistema que debe ser específico para cada tipo de estructura. Generalmente se admite que corrientes de 0,2 a 2 mA/m² son suficientes para garantizar una protección de la armadura por prevención catódica. El potencial al cual se polarizaría la armadura se sitúa entre -400 y -600mV, ESC.

El tipo de ánodo más recomendable es el de titanio activado en forma de malla, para situar sobre la superficie del hormigón. La corriente sobre el ánodo no debe superar los 100mA/m² con el fin de alargar al máximo la vida del ánodo.

La experiencia práctica con este método preventivo de corrosión de la armadura está mas extendida en Italia y en USA, donde se ha aplicado a la protección de varios puentes y viaductos expuestos a la acción de sales de deshielo, con una experiencia no muy dilatada, pues éstas se remontan al año 1993. Menor aún es la experiencia con la protección catódica para detener una corrosión ya iniciada o polarizando la armadura hasta potenciales de inmunidad desde el inicio. ■