

FACTORES DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

La resistencia a compresión ha sido utilizada por lo regular como un indicador de la durabilidad del hormigón; sin embargo, cada día se hace más evidente que por sí misma no determina la durabilidad. La impermeabilidad y la resistencia química rigen también la vida útil de una estructura, aunque estos factores están a su vez influidos por la composición del cemento y la calidad de la mezcla. El problema más importante para las estructuras mixtas hormigón-acero es la corrosión de las armaduras de acero embebidas en el hormigón.

La corrosión del acero de refuerzo existente dentro del hormigón se origina por la presencia exclusiva de oxígeno y humedad en las proximidades de las barras. Las barra de acero se encuentran recubiertos por un material denso como lo es el hormigón, pero que presenta vacíos a escala microscópica. Estos vacíos están unidas entre sí por poros muy finos, formando una red interna que pueden llegar hasta la superficie.

Durante su primer año de vida, estos vacíos son ocupadas por partículas de cal que provienen del cemento y que son el residuo de las reacciones químicas que dan lugar a la solidificación del hormigón. Esta cal es de gran utilidad porque es la que origina la formación en las armaduras de una película protectora contra la formación del óxido. Se dice entonces que el acero es pasivo.

Pero con el tiempo, esta situación cambia, primero con la lluvia, que puede penetrar en el hormigón hasta 2 ó 3 cms de profundidad en ciclos alternos de humedad-secado.

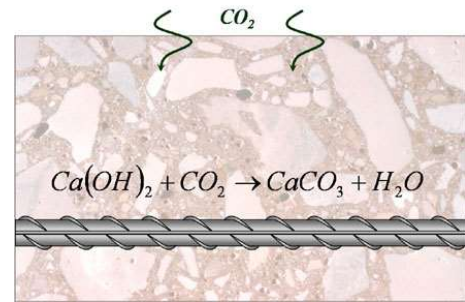
Por otra parte el aire del ambiente contiene un gas carbónico y oxígeno que siguen el mismo camino que el agua, penetrando a través de los poros del hormigón. Humedad, gas carbónico, oxígeno, todos los ingredientes necesarios para desencadenar el proceso de oxidación.

El gas carbónico en primer lugar, va a producir lo que se llama la carbonatación del hormigón reaccionando químicamente con los residuos de cal libre. A partir de este estado el oxígeno, podrá atacar al acero siempre que el ambiente sea húmedo.

Carbonatación.

Generalmente el acero del hormigón tiende a pasivarse debido a la alcalinidad que le da la portlandita o la cal hidratada (Ca(OH)_2) procedente de la hidratación del cemento y los alcalinos del mismo.

El mecanismo básico de la carbonatación es la penetración del anhídrido carbónico (CO_2) existente en el aire, por los capilares del concreto y se combina con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) para formar carbonato de calcio (CaCO_3) y agua. Esto provoca que la alcalinidad del hormigón que originalmente tiene un valor de pH de 12 a 13 se reduce con el paso del tiempo.



Los hidróxidos de calcio, sodio y potasio, disueltos en el componente acuoso del concreto, son los responsables del elevado pH, que originalmente tiene un valor de pH de 12 a 13 y actúa como protector del acero.

Cuando se produce la reacción entre los hidróxidos de la fase líquida intersticial y los compuestos hidratados del cemento, todo el Ca(OH)_2 , Na(OH) y K(OH) presentes en los poros son carbonatados, el pH empieza a decrecer.

Cuando el valor del pH llega a niveles inferiores a 9,5 la alcalinidad del concreto ya no es suficiente para mantener pasiva la capa de óxido protectora de las armaduras de acero. El resultado final es que deja el acero embebido como si estuviera expuesto a la atmósfera, es decir, sin protección química. Esto provoca que, ante la presencia de la humedad y del oxígeno, se active la corrosión de las armaduras embebidas en el concreto.

El desarrollo de la carbonatación depende de diversos factores, entre los que se pueden enumerar los siguientes: contenido de CO_2 en la atmósfera, permeabilidad del hormigón, cantidad de sustancia carbonatable (contenido y tipo de cemento) y humedad relativa del ambiente.

Acción del anión cloruro

En un sentido estricto, el contenido crítico de cloruros depende del grado de carbonatación del hormigón y de la humedad relativa de ambiente.

Los cloruros pueden estar presentes desde el inicio en la mezcla de concreto fresco (disueltos en los agregados, en los aditivos o en el agua). El ion cloruro puede también penetrar posteriormente en el interior del concreto por difusión desde el exterior, en cuyo caso el riesgo de corrosión se incrementa.

El efecto directo más nocivo por acción de cloruros en la mezcla de concreto endurecido es la cristalización de las sales dentro de sus poros, la cual puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales. Puesto que la cristalización ocurre en el punto de evaporación del agua, este tipo de ataque se produce de manera más acentuada en el concreto que no está permanentemente en contacto directo con el agua. Los procesos mediante los cuales se unen los aniones cloruro a las sales sólidas, son tanto de tipo químico como físico. El principal responsable de la unión química de los aniones cloruro es el aluminato tricálcico (C_3A). Este componente del cemento reacciona con el cloruro de los

poros, para formar el monocloroaluminato hidratado o sal de Friedel $C_3AH_{10} \cdot CaCl_2$ y el tricloroaluminato hidratado $C_3AH_7 \cdot 3CaCl_2$.

El cloruro libre disuelto en el agua de los poros, es capaz de despasivar la armadura e iniciar su corrosión, localizándose en determinados puntos del acero. Es muy importante conocer la capacidad de ligar aniones cloruro que presenta cada hormigón: los más eficientes son menos susceptibles de sufrir la corrosión de sus armaduras. También debe tenerse en cuenta, que aunque el cloruro ligado no puede inducir la corrosión de las armaduras, puede ser liberado en determinadas circunstancias. Por ejemplo, la carbonatación del hormigón produce la liberación del cloruro ligado, pasando este a ser cloruro libre e incrementando, por tanto, el riesgo de corrosión.

Los iones cloruro destruyen la capa pasivante del acero de forma puntual dando lugar a una corrosión por picadura que va extendiéndose en profundidad, pudiendo llegar a seccionar las barras y especialmente los alambres de pretensado que son más finos y con estructura cristalina más delicada.



La corrosión electroquímica de los elementos consiste básicamente en la conexión eléctrica o electrolítica entre un cátodo y un ánodo. En relación con el acero embebido en el concreto, las barras de refuerzo actuarán como un conductor eléctrico y el agua en los poros de la pasta actuará como electrolito. Durante el proceso de corrosión, el oxígeno es consumido y genera los productos de corrosión; el agua se necesita para permitir que el proceso de corrosión se mantenga y continúe, su presencia se relaciona con la generación de óxido férrico. Así, el resultado principal y más grave de la acción de los cloruros sobre el acero de refuerzo lo constituye la corrosión acelerada que éste sufre a consecuencia de su acción como catalizador en ese proceso electrolítico.

Todas las sales pueden penetrar mucho más rápidamente por capilaridad, muy propio de ambientes de niebla salina existente en climas cálidos marinos en los que los aniones cloruro están suspendidos en las gotitas de humedad del aire. En este fenómeno, incide mucho la dirección predominante del viento y la luz solar. De tal suerte que la permeabilidad de este material es un factor de gran importancia, y el clima

tropical propio de nuestras franjas costeras actúa como catalizador del proceso.

Cabe destacar que, en opinión de diversos autores, la corrosión puede iniciarse por la acción de iones de cloruro sobre el acero de refuerzo, aun en ambientes con un pH superior a 10 u 11, aunque estos casos se relacionan con cloruros presentes de origen en la mezcla por efectos de los agregados, el agua o los aditivos, pues los que penetran del exterior están generalmente asociados con el proceso de carbonatación, el cual incide inmediatamente sobre los niveles de pH en el concreto.

Combinación de carbonatación más iones cloruro.

Si la carbonatación tiene lugar en un hormigón que contiene cloruros, los efectos de ambos agresivos se suman dando lugar a una fuerte corrosión. Además por efecto de la acción del CO_2 sobre las fases sólidas del cemento, los cloroaluminatos se pueden disgregar y dejar libres a los cloruros que mantenían combinados

Factores acelerantes de la corrosión.

Factores que son los encargados de acelerar el proceso de corrosión son los siguientes:

Contenido de humedad. El hormigón absorbe fácilmente la humedad ambiente, pero tarda mucho tiempo en secarse. Esto da lugar a que la humedad del interior del hormigón sea superior a la humedad ambiente. Y si la humedad ambiental oscila, el interior del hormigón no puede seguir los cambios a la misma velocidad, por tanto, sólo la capa exterior del hormigón es la que mantiene un equilibrio con la humedad relativa exterior.

El contenido de humedad es el factor que más influye en la velocidad de corrosión. La corrosión no se puede producir cuando el hormigón está totalmente seco porque no se puede desarrollar el proceso electrolítico. Tampoco si los poros están saturados de humedad. En este caso la resistividad será la menor posible y la pila de corrosión se verá favorecida, pero sin embargo el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua y difundir a su través para poder alcanzar la armadura dando lugar a velocidades de corrosión moderadas e incluso bajas. Si la humedad relativa es alta, pero no llega a saturar los poros, la velocidad de corrosión es elevada porque el oxígeno llega hasta la armadura y la resistividad es tan baja que da lugar a velocidades de corrosión máximas

Proporción de cloruros.

La proporción de cloruros o la relación Cl^- / OH^- la presencia de ión cloruro induce la despasivación de la armadura, pero además, cuanto mayor es esta proporción mayor puede ser la velocidad de corrosión. Esto es debido a que por un lado una mayor cantidad de cloruros aumenta el porcentaje de área atacada, y por otro, permite un mayor grado de acidificación local en las áreas corroídas.

Temperatura. La temperatura desempeña un doble papel en los procesos de deterioro. Por un lado, un incremento de temperatura da lugar a un aumento de la velocidad de corrosión y de la movilidad de los iones. Y por otro lado, una disminución de la misma origina condensaciones, que a su vez pueden producir incrementos locales de contenido en humedad.

Macropares galvánicos.

Se trata de pilas de corrosión generadas entre dos áreas distanciadas tan sólo unos decímetros. Una de ellas está corroída y actúa como ánodo, y la otra que actúa como cátodo permanece pasiva. La corrosión propia de las micropilas (debidas al ataque por cloruros) se suma la acción de la macropila, aumentando la velocidad de corrosión. El incremento que se produzca dependerá de los potenciales de corrosión del ánodo y del cátodo cuando empiece la acción de la macropila y de la resistencia óhmica entre ambos.

Medidas para evitar la corrosión de la armadura.

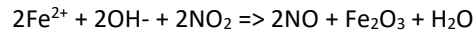
Como medidas a tomar frente a la corrosión de las armaduras de acero hay que destacar:

Protección Catódica. La protección catódica se basa en evitar la corrosión haciendo funcionar a la superficie metálica de cátodo, mediante la imposición al metal de una corriente eléctrica externa. Esta corriente se aplica en el caso del hormigón a través de un ánodo externo que se adiciona a la estructura. Para su aplicación se necesita un medio continuo siendo de esta forma viable económicamente, el problema es que esto no se da en la mayoría de las estructuras existentes y suele ser excesivamente costoso este medio de protección.

Método de Migración del Cloruro. En este método, se aplica un potencial DC sobre el hormigón que provoca una migración de los iones cloruro hacia una superficie anódica donde son captados en solución. No es una práctica usada en campo ya que no consigue remover los iones profundamente embebidos, no impide que vuelva a producirse el proceso y necesita un elevado tiempo.

Realcalinización. Se basa en la elevada movilidad de los iones HO⁻ que son capaces de difundir desde zonas de elevado pH a otras de menor pH. En un hormigón carbonatado, se realiza un engrosado con un mortero rico en cemento. Este cemento, al ser muy alcalino, puede realcalinizar el interior del hormigón en una profundidad de 1 ó 2 cm. Por ello, es fundamental mantener húmeda la capa de recrido, favoreciendo así la difusión de los HO⁻ desde el exterior hacia el interior.

Nitrito de Calcio. El inhibidor más antiguamente conocido para el hormigón es un inhibidor anódico por lo que en su uso es sumamente importante conocer la cantidad de ion cloruro que puede contener el hormigón ya que de nos superarse una relación Cl⁻/NO₂⁻ específica se produce un ataque localizado severo. Su funcionamiento responde a la siguiente reacción:



Es decir, el nitrito reacciona con el metal de la armadura formando un film de óxido protector.

Protección anticorrosiva. La aplicación de inhibidores de corrosión migratorios en estructuras ya construida se lleva a cabo mediante la adición de los inhibidores directamente por pulverización sobre el hormigón, este compuesto orgánico de base agua migra a través de la estructura porosa endurecida por difusión. Una vez en contacto con el acero de refuerzo toma una capa protectora monomolecular que reduce drásticamente la corrosión. Este tipo de aplicación permite detener la corrosión ya existente al desplazar los iones cloruro de la superficie del acero tal y como se demuestra en los ensayos realizados por análisis de espectroscopia de Rayos-X.

Recubrimientos. Aunque no constituyen estrictamente un recubrimiento o protección permanente, existen en el mercado materiales para la protección posterior del concreto, reducir su permeabilidad superficial e incluso impedir el paso de cualquier agente agresivo, los cuales están elaborados con una amplia gama de componentes que van desde las parafinas hasta los productos epóxicos. Evidentemente, la elección de uno u otro producto será función directa del grado de exposición del elemento, así como del grado de vulnerabilidad propia que de origen posea.

En general, el éxito de estos recubrimientos estriba en su aplicación, pues todos ellos requieren que la superficie se encuentre libre de agua, grasa u objetos extraños, de tal manera que permitan una estrecha adherencia sobre la superficie del elemento que se ha de proteger. Para que puedan considerarse efectivos, debe garantizarse que la resistencia adhesiva con el concreto sea cuando menos igual a la resistencia en tensión del concreto en la superficie.

Es importante remarcar que cualquiera de estas protecciones es temporal –unas tienen mayor durabilidad que otras– y, por lo tanto, todas requieren una supervisión y mantenimiento programados. Asimismo, cualquier agrietamiento en la superficie de concreto, incluyendo aquellos que ocurren después de la aplicación de la protección, se reflejarán a través de ésta si la estructura está sujeta a movimientos por cambio de temperatura o cargas externas. Este movimiento del concreto puede llegar a anular la habilidad de la barrera para brindarle protección al concreto.