

CONCRETO ARMADO. CARACTERIZACIÓN Y ALTERACIONES

TEZOSOMOC PÉREZ LÓPEZ

ISBN: 978-607-484-648-5

INTRODUCCIÓN

El uso de los materiales ha marcado etapas importantes en la historia de la humanidad, puesto que han sido usados para la fabricación de herramientas, armas y vivienda. Se mencionan las eras de piedra, acero y bronce, entre otras, que reflejan el desarrollo de los grupos humanos desde la antigüedad y la hegemonía de aquellos que establecieron sus condiciones basados en el conocimiento de los materiales.

Al paso del tiempo, las civilizaciones han dejado testimonio de su presencia por medio de la pintura, escultura, escritura, arquitectura, etcétera. En la historia se registran los adelantos logrados por diferentes culturas que dan fe de su organización social y formas de vida, que les han proporcionado identidad. Este legado es considerado en la actualidad como patrimonio histórico, símbolo de la creatividad en diferentes etapas del desarrollo del hombre.

Los metales han sido utilizados por la industria de la construcción para herrajes, protección y soporte mecánico, y al estar expuestos al medio ambiente inevitablemente

COMPUESTO	COMPOSICIÓN DEL ÓXIDO	NOMENCLATURA SIMPLIFICADA	PORCENTAJE APROXIMADO
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2	C_3S	60-65%
Silicato dicálcico	2CaOSiO_2	C_2S	10-20%
Aluminio Tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A	<8%
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF	10-15%

Figura 1. Componentes del cemento portland (Guzman 2001:35-37).

son susceptibles al proceso de corrosión que merma sus propiedades mecánicas y los consume en su totalidad si no se toman medidas de protección. Por esta razón, se realiza investigación tendiente a la comprensión del fenómeno de corrosión en metales empleados en la construcción, con miras a conocer sus causas y establecer las condiciones necesarias para prolongar su vida útil.

Este documento presenta de manera general algunas características del concreto reforzado y el daño sufrido por la exposición al medio ambiente.

CONCRETO REFORZADO

Componentes

El concreto, llamado también hormigón, es una mezcla de

dos componentes: pasta (compuestos finos) y agregados (compuestos gruesos). La pasta de concreto se compone de cemento, agua, aditivos y aire que se retiene al mezclar los componentes, o es incluido intencionalmente.

- a. *Cemento.* Puede ser descrito como un material con propiedades adhesivas y cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para constituir un conjunto compacto (Hernández et al 2001: 15). Los materiales empleados en la fabricación de cemento Portland consisten principalmente de cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Se dice que la química del cemento es la química de los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros e hidratados, que a menudo se expresan como

TIPO I	Cemento de uso general.
TIPO II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistivo al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
TIPO III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.
TIPO IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo.
TIPO V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en hormigones con aguas negras domésticas concentradas.

Figura 2. Tipos de cemento portland (Hernández et al 2001:15).

sumas de óxidos, pero dado que frecuentemente los profesionales involucrados en su uso no tienen formación química, se ha desarrollado una nomenclatura simplificada de los cuatro componentes principales del cemento que ocupan más del 90% de la masa de cementos convencionales son (Guzman 2001:35)(Figura1).

Existen diferentes tipos de cemento Portland en el mercado, los cuales están clasificados de acuerdo a la norma C 150 de la ASTM (American Society for Testing and Materials), como se muestra a continuación (Figura2):

b. Agregados. Estos elementos son de gran importancia ya que su calidad se ve reflejada en la resistencia del concreto; además, sus propiedades afectan de manera importante tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del producto final (Torres *et al.* 2010:5). Originalmente se consideraban materiales inertes que se utilizaban para disminuir costos, sin embargo, es bien sabido que sus propiedades físicas, térmicas y químicas influyen en el comportamiento del concreto compuesto final y le proporcionan mayor estabilidad volumétrica y durabilidad.

La alternativa más frecuente en la elaboración de concreto de buena calidad es que los agregados puedan clasificarse, cuando más, en dos rangos de tamaño: el llamado agregado fino (arena), cuyo tamaño no es mayor de 5 mm, y el agregado grueso (grava), que comprende material mayor a 5 mm.

- c. *Agua de amasado*. Los cementos empleados en la formación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer gracias a que reaccionan químicamente con el agua. La cantidad de agua necesaria para que se lleve a cabo completamente esta reacción química es alrededor de un 40% del peso del cemento. Un 23% de esta agua se combina químicamente para dar productos de hidratación y el resto se absorbe en la superficie de un gel que se produce (Del Valle et al 2001:30). La cantidad de agua añadida inicialmente a la mezcla de cemento y agregados para obtener un concreto fresco con adecuada trabajabilidad es siempre superior a la cantidad de agua necesaria para la hidratación completa. Este exceso de agua es responsable del grado de porosidad y permeabilidad del concreto endurecido

(Del Valle et al. 2001:30). Es interesante mencionar que el agua que no reaccionó tiene características alcalinas debido a que en ella quedan disueltos los iones del cemento como son Ca^{2+} , HO^- , Na^+ , K^+ y SO_4^{2-} .

- d. *Aditivos*. De esta forma se les denomina a diversas sustancias que se añaden para modificar las propiedades de fluidez, acelerar o retardar el fraguado, así como para incrementar la resistencia a la corrosión del refuerzo de acero (Del Valle et al. 2001:30). Estos elementos son adicionados en pequeñas cantidades y su uso es particular de acuerdo con la propiedad que se requiera.
- e. *Acero de refuerzo*. Como ya se ha mencionado en otros textos, se trata de aleaciones hierro-carbono. En gran cantidad de los usos a los que se destina, se le da un acabado superficial en relieve llamado corrugado que le proporciona mayor adherencia con la pasta de concreto. A la rápida difusión del uso del concreto reforzado ha contribuido en gran medida el complemento de propiedades de dos materiales: acero y concreto que en conjunto, le dotan de gran resistencia a la tracción al primero y de buena resistencia a la compresión al segundo

(Del Valle et al. 2001:27). La protección que le confiere el concreto al acero de refuerzo es una acción de doble naturaleza:

1. El elevado pH de la mezcla de un concreto ejecutado correctamente (12.6 aproximadamente), mantiene a las armaduras en estado pasivo.

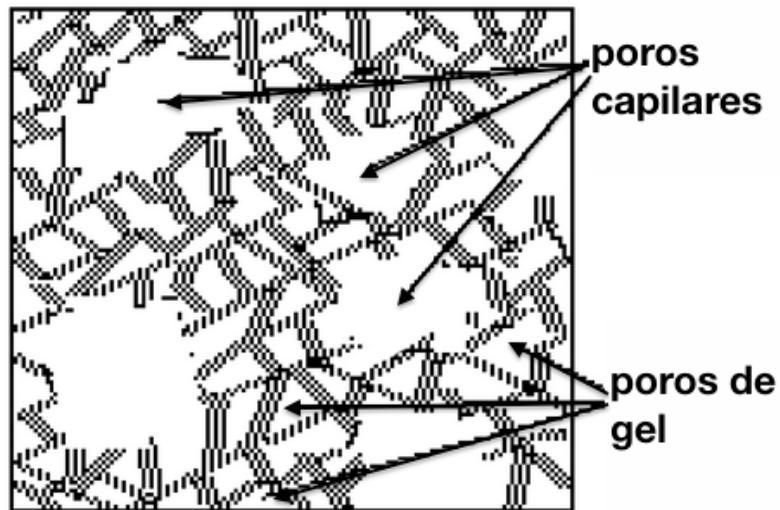


Figura 3. Estructura porosa de cemento. Imagen modificada de Del Valle et al 2001:40

2. El concreto resulta un impedimento físico a la penetración por difusión de oxígeno, humedad, cloruros, anhídrido carbónico y otras sustancias agresivas hasta la superficie del acero (Del Valle *et al.* 2001:31).

Cuando estas condiciones no se satisfacen, el concreto se hace más permeable a agentes agresivos que ocasionan su rápido deterioro.

ESTRUCTURA DE LA PASTA DEL CONCRETO HIDRATADO

Una red de poros

La pasta de cemento fresco es una retícula plástica de partículas de cemento en agua, pero una vez que la pasta ha fraguado, su volumen permanece constante. En cualquier etapa de hidratación la pasta endurecida consta de hidratos de varios compuestos, denominados colectivamente como gel de cristales de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), algunos componentes menores, cemento no hidratado y residuos de los espacios rellenos de agua en la pasta fresca. Estos huecos se denominan poros capilares, pero dentro del gel también existen huecos intersticiales llama-

dos poros de gel. Por lo tanto, en una pasta deshidratada hay dos clases de poros: capilares y de gel (Del Valle *et al.* 2001:34) (Figura 3).

Poros capilares

Los poros capilares representan la parte de volumen bruto que no ha sido llenado por los productos de hidratación. El volumen del sistema capilar se reduce a medida que avanza la hidratación, por lo tanto, la porosidad capilar de la pasta depende tanto de la relación agua/cemento de la mezcla como del grado de hidratación (Del valle, et al., 2001:34).

La forma de los poros es variable, pero constituyen un sistema interconectado de manera aleatoria a través de la pasta. Estos poros miden aproximadamente $1.3 \mu\text{m}$ (micras). El hecho de que estén interconectados constituye la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido. Sin embargo, la hidratación aumenta el contenido sólido de la pasta, y en pastas reposadas y densas los capilares pueden bloquearse y segmentarse de modo que se transforman en poros capilares interconectados solamente por los poros de gel (Del Valle et al, 2001:34). La

ausencia de capilares continuos se logra por una adecuada combinación de la relación agua/cemento y a un periodo suficientemente largo de curado por humedad.

Poros de gel

El gel es poroso, sus poros son espacios intersticiales conectados entre sí. Estos poros miden aproximadamente entre 15 y 20 \AA (Amstrong) y ocupan alrededor de un 28% del volumen total del gel. Estos son independientes de la relación agua/cemento y del avance de hidratación (Del Valle et al 2010:35). Es por esto que al aumentar el volumen total del gel con el avance de la hidratación, el volumen total de los poros del gel también se incrementa.

También se presentan en el concreto poros que son producidos durante su elaboración; éstos son de mayor tamaño y se deben al aire atrapado y a una mala compactación durante la colocación del concreto fresco. Es factible a la vez que la contracción del concreto genere grietas, siendo otra discontinuidad que puede afectar las propiedades de una estructura. Una representación de los poros que se pueden hallar presentes es ilustrada en la Figura 4.

Se aprecia que los poros de mayor tamaño son los que influyen en la durabilidad del concreto, porque a su través acceden agentes agresivos que pueden iniciar un ataque al elemento metálico embebido y causar corrosión (Del Valle et al 2001: 31).

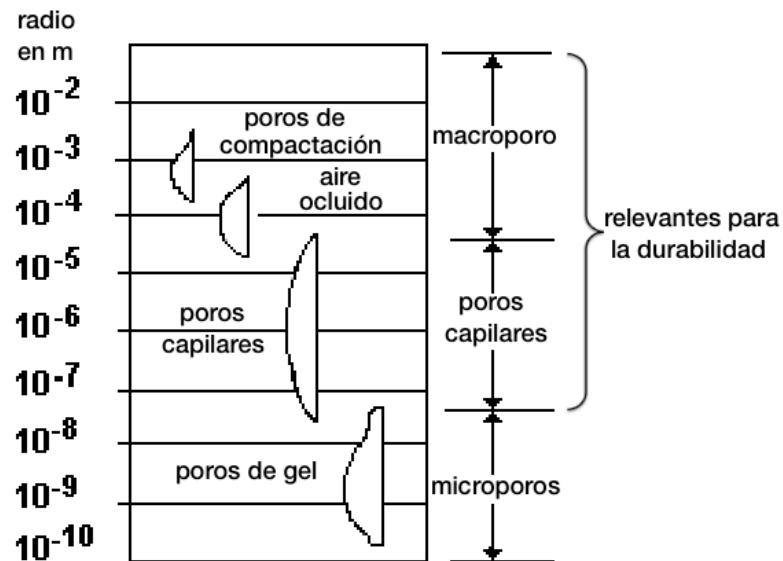


Figura 4. Tipos de poros en el concreto. Imagen modificada de Del Valle et al 2001:40.

CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN CONCRETO

Principales causas

Se han mencionado las causas de que el concreto muestre cierta permeabilidad a líquidos y gases, también que existen sustancias agresivas que penetran hasta la superficie del metal provocando la corrosión del acero. Son esencialmente dos las causas que pueden dar lugar al rompimiento de la capa de óxido que protege al acero y propiciar el desarrollo del proceso de corrosión:

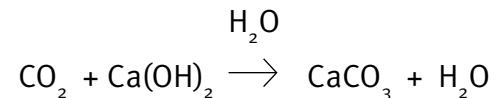
- la disminución de la alcalinidad del concreto por reacción de sustancias agresivas como el CO_2 (carbonatación), y
- la presencia de una cantidad suficiente de cloruros, ya sea que penetren desde el exterior o que estén presentes como contaminantes en los componentes de fabricación del concreto.

Carbonatación

La alcalinidad del concreto cambia por el ingreso de sustancias ácidas del ambiente, principalmente CO_2 y SO_3 ,

presentes en el aire y que se combinan con el agua de lluvia y la humedad ambiental. El término carbonatación proviene precisamente de que el CO_2 en el aire sustituye a los álcalis del concreto y forma los correspondientes carbonatos (Del Valle et al 2001:38).

De acuerdo con Kobayashi y Uno (1989:821-826), inicialmente el CO_2 no es capaz de penetrar profundamente en el concreto, debido a que es enlazado dentro de la capa superficial por la reacción siguiente:



Esto da como resultado que la alcalinidad inicial $\text{pH} \approx 12$ a 13 cambie hasta $\text{pH} < 9$.

Sin embargo, como la porción de mezcla externa del concreto se carbonata, el CO_2 ingresa al interior de la pasta de concreto y cuando el pH alrededor del acero de refuerzo llega a valores cercanos a 9, la capa de óxido protector pierde esa propiedad, dejando al acero expuesto a la corrosión; la profundidad que alcanza el CO_2 y por lo tanto en la que se

modifica el pH , generalmente es llamada “espesor o frente de carbonatación”, en la práctica es muy útil conocer a qué velocidad progresa (Del Valle et al 2001:39).

La penetración del CO_2 y la velocidad de carbonatación son determinadas por la composición y cantidad del cemento, compactación, condiciones de curado, la estructura de los poros del concreto y condiciones ambientales de exposición, que a su vez determinan qué tan llenos de agua o secos se encontrarán los poros. Existe una gran diferencia entre la velocidad de difusión del CO_2 en el aire y en el agua, siendo en esta última aproximadamente 104 veces menor que en aire. De esta forma cuando el poro está seco, como se muestra en la figura 5a, el CO_2 se difunde fácilmente, pero la carbonatación no ocurre debido a la falta de agua. En contraste, si los poros están llenos de agua (Figura 5b) apenas hay carbonatación porque hay muy poca difusión del CO_2 en el agua. Finalmente, si los poros están parcialmente llenos de agua (Figura 5c), la carbonatación puede proceder hasta un espesor donde los poros del concreto se encuentren secos (Del Valle et al 2001:39-40).

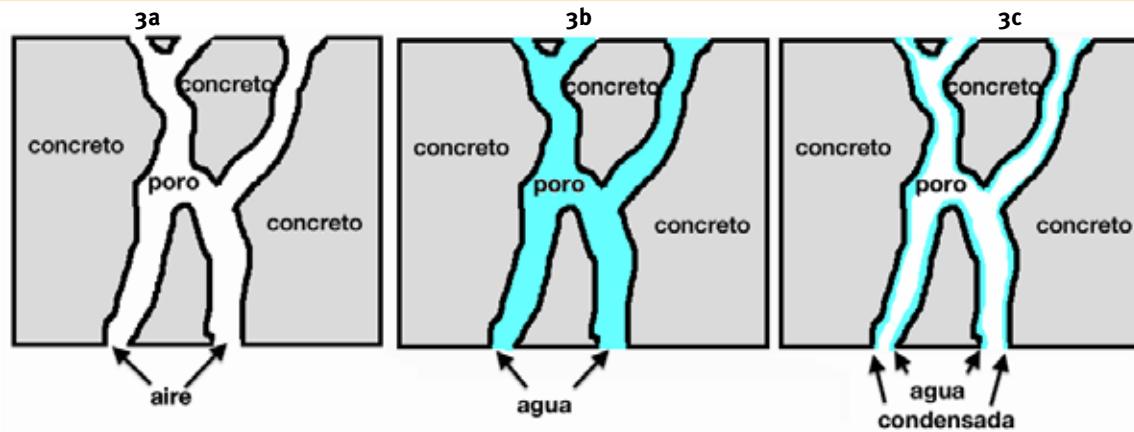


Figura 5. Llenado de los poros.
a) Poro seco, b) Poro saturado de agua, c) Poro parcialmente lleno.
Imágenes modificadas de Del Valle et al 2001:40.

Ataque por cloruros

La presencia de iones cloruro causa daños al acero de refuerzo. Si son incluidos en el concreto, provocarán la disolución del acero, si entran desde el exterior, penetrarán a través del concreto hasta el acero iniciando el proceso de corrosión. Estos iones provienen principalmente de ambientes marinos y/o de sales deshielantes en regiones donde se usan para evitar la formación de hielo sobre las carreteras. Los cloruros pueden ser introducidos en pequeñas cantidades en la mezcla del concreto, ya sea en los aditivos, en el agua de mezclado o en los agregados.

Modelo de vida útil de las estructuras de concreto

Cuando los agentes agresivos no están presentes desde la elaboración del concreto, penetran desde el exterior hasta llegar a la superficie del metal, provocando el desarrollo de la corrosión que, una vez iniciada, se manifestará bajo tres vertientes:

- sobre el acero, con una disminución de su capacidad mecánica,
- sobre el concreto, debido a que las presiones que ejerce el óxido al generarse lo fisura o lo desprende, y
- sobre la adherencia acero/concreto.

Desde el punto de vista de la corrosión del acero en el concreto, se ha definido un sencillo modelo que representa el tiempo que una estructura de concreto permanece proporcionando servicios para la cual ha sido diseñada (Tuutti, 1982). Este modelo se divide en dos períodos (Del Valle et al 2001:37):

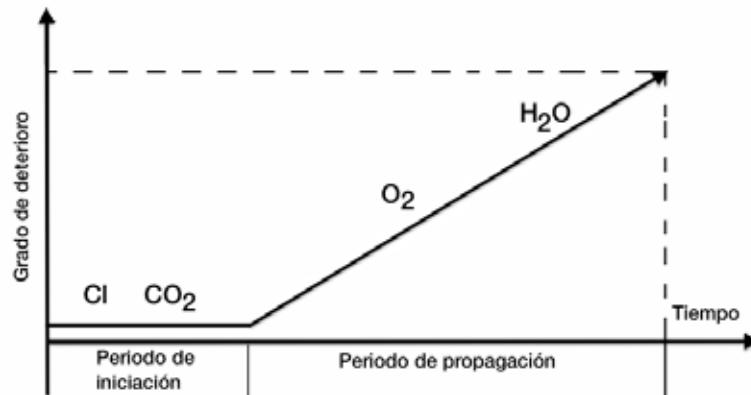


Figura 6. Tiempo de vida útil de una estructura. Imagen modificada de Del Valle et al 2001:40.

- Período de iniciación: tiempo que tarda el agente agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar el acero y provocar el rompimiento de la capa de óxido protector
- Período de propagación: comprende la acumulación progresiva del deterioro, hasta que alcanza un nivel inaceptable (Figura 6).

Período de iniciación

Proceso por difusión. Durante la etapa de iniciación los agentes agresivos penetran en el concreto por mecanismos como migración, convección, capilaridad o, en el más común de los casos, por difusión¹, hasta alcanzar el nivel del acero.

El estudio de los fenómenos de penetración de iones cloruro en estructuras de concreto permite hacer predicciones y ejercer acciones correctivas antes de que el daño se haya propagado. Sin embargo, el ingreso de los iones en las estructuras generalmente se da por un proceso largo, de tal manera que para poder conocer los niveles de cloruros

¹ La difusión se define como el proceso por el cual la materia es transportada de una parte de un sistema a otra, debido a un gradiente de concentración.

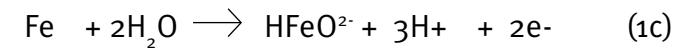
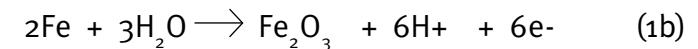
que han penetrado en una estructura es necesario que esté expuesta durante un periodo amplio. Un método que ha reducido el tiempo para estimar perfiles de concentración de cloruros a periodos prolongados es el empleo de ecuaciones diferenciales que aproximen las condiciones bajo las cuales se presenta el fenómeno de difusión en el concreto.

Es importante recalcar que existen otros agentes agresivos en el medio que favorecen el deterioro de las estructuras (CO_2 , SO_2), y que los deterioros no se pueden deber solamente a la presencia de iones cloruro.

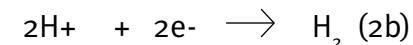
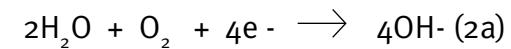
Periodo de propagación

Dado que la corrosión del acero en el concreto constituye un proceso electroquímico con transferencia de carga (electrones) de una especie a otra, para que esta se lleve a cabo (en ausencia de una fuente electroquímica externa) deben darse dos reacciones de media celda: una capaz de producir electrones (reacción anódica) y otra reacción capaz de consumir electrones (reacción catódica), y las velocidades de producción y consumo deben ser iguales para satisfacer un balance de carga (Del Valle et al 2001:24).

Para el acero en el concreto armado, las reacciones anódicas de interés son (Del Valle et al 2001:24):



Las siguientes son las reacciones catódicas más comunes, que dependen de la disponibilidad de oxígeno y el pH en la interfase del acero:



En un buen concreto en el que se alcanza un pH de alrededor de 12.5, las reacciones (1a) y (1b) son las de mayor interés, posibilitando que los óxidos Fe_3O_4 y Fe_2O_3 formen una capa protectora sobre la superficie, pero si el pH se hace menos alcalino, por ejemplo por carbonatación, entonces los productos formados no serán protectores. Alternativa-

mente, la presencia de iones cloruro puede causar ataque por picaduras (Del Valle et al 2001:25).

Para que la corrosión proceda, el circuito eléctrico entre las áreas anódicas y catódicas del acero debe ser completado con un flujo de iones y electrones (corriente de corrosión). La magnitud de la corriente de corrosión es una medida indirecta de la velocidad de corrosión del material. Como en un circuito eléctrico, la corriente de corrosión puede ser limitada por la resistencia, y en el caso que tratamos, la resistencia eléctrica del concreto es central (Del Valle et al 2001:25) por ser una de las variables que controlan la velocidad de corrosión del acero cuando éste ya no presenta la capa de óxido protector.

Los parámetros que determinan si la corrosión es posible (termodinámica) son: el pH de la solución en el poro del concreto y el potencial electroquímico existente en la superficie del acero. Es posible estimar si las reacciones (1a-1d) son termodinámicamente posibles a un pH y potencial dados consultando diagramas de estabilidad termodinámica en la literatura especializada en el tema.

La corrosión del acero en concreto es un fenómeno termodinámicamente inevitable, pero sí sufre una dismi-

nución en su velocidad debido a la formación de una capa de óxidos pasivos de carácter protector, que es conocida como pasividad o estado pasivo, y que se desarrolla en el hierro y el acero cuando se encuentran en un medio alcalino como el concreto nuevo y en buen estado (Brusic 1981 en Moreno 2005: 9).

Como puede verse en el diagrama de Pourbaix para el hierro, este material forma una capa pasiva en valores de pH alcalinos (Figura 7) (Bockris, 1998). La pasividad de metales o aleaciones termodinámicamente inestables (activos) como el hierro y el acero radica en el hecho de que la formación de la película protectora de óxidos conlleva una disminución de la velocidad de corrosión, es decir, de la disminución de la corriente de intercambio (i_{corr}) y de un cambio en el potencial de electrodo en sentido positivo (Brusic 1981 en Moreno, 2005: 9). Esto sucede porque la película pasiva de óxidos, sólidos cristalinos, con una conductividad muy limitada (Bruzzoni y Garavaglia 1992), constituye una barrera estable entre el metal y el electrolito, que desplaza las moléculas de agua adsorbidas en la superficie metálica, lo que provoca un incremento en la

energía de activación para la hidratación y disolución de la red metálica (Brusic 1981 en Moreno 2005: 9).

La formación de esta capa pasiva se produce debido al pH alcalino entre 12 –13.5 de la solución que irriga la red de poros del concreto.

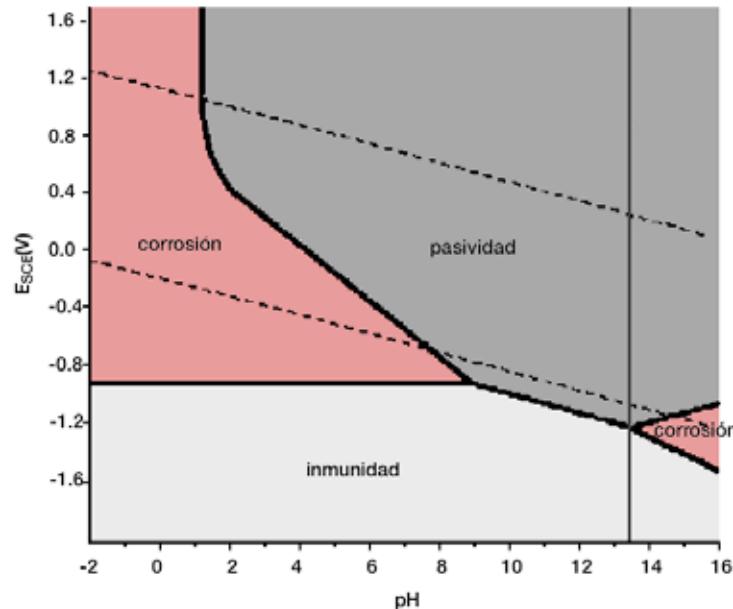


Figura 7. Diagrama de Pourbaix para el hierro. Imagen modificada de Del Valle et al 2001:40.

Los abundantes iones (OH⁻) que logran esa alta alcalinidad al tener un alto índice de adsorción superficial modifican el proceso de oxidación en los sitios anódicos, impidiendo la liberación de iones ferrosos (Fe²⁺) a la solución por la formación de una capa de óxidos y oxihidróxidos, es decir, el metal no se puede transformar en una especie soluble, sino en un producto de corrosión sólido no soluble y además de carácter protector (Moreno 2005:10).

Despasivación

Después del periodo de iniciación, durante la propagación es necesario considerar la despasivación y las diferentes posibilidades de corrosión.

El mantenimiento de la pasividad requiere que la superficie del acero esté en altos niveles de alcalinidad y que no existan iones agresivos. De lo contrario se provocará el rompimiento de la pasividad y la propagación de la corrosión. Ambos efectos serán más severos si la superficie del acero tuviera una capa de herrumbre previa a su colocación en el concreto, ya que ésta disminuye el contacto físico entre la superficie del metal y la solución alcalina, disminuyendo así su posibilidad

de pasivarse (Del Valle et al 2001:26). La forma de corrosión que inicie dependerá de las circunstancias específicas y podrá ser de dos tipos: por picadura o generalizada.

Corrosión generalizada

Cuando existe una concentración muy alta de cloruros en el líquido de los poros, se puede producir un ataque por picaduras tan extenso que éstas prácticamente aparezcan juntas dando lugar a un proceso de corrosión más extendido. Sin embargo, la corrosión generalizada se presenta más fácilmente como resultado de una reducción del pH del cemento que conduzca a una condición en donde no sea posible mantener la capa pasiva. La propagación de este tipo de condición, en la cual los ánodos y los cátodos están muy cerca unos de otros, dependerá de la disponibilidad de oxígeno para despolarizar la reacción catódica y de suficiente conductividad para permitir el movimiento iónico entre ánodos y cátodos. Bajo estas circunstancias el control de la corrosión estará dado por la resistividad del concreto. En concretos carbonatados, la resistividad estará determinada por el grado de saturación de agua en los poros.

Mecanismo de corrosión por picaduras

La teoría electroquímica de la corrosión por picaduras aún está sujeta a mucha investigación y discusión. Sin embargo, algunos principios del proceso están generalmente aceptados y éstos se presentan a continuación.

La propagación de las picaduras requiere de una actividad continua en sitios específicos manteniendo la relación Cl^-/HO^- por encima del valor crítico de iniciación. Conforme las picaduras crecen, el medio se acidifica más como resultado de la hidrólisis de los productos de corrosión que liberan iones hidrógeno. El potencial de esta región se vuelve más negativo, por consiguiente los sitios adyacentes susceptibles de picaduras pierden esa susceptibilidad al volverse más nobles. Esto produce que la cantidad de iones HO^- se incremente, con la consecuencia de las reacciones que elevan el pH de las zonas catódicas. Esto lleva a pensar que el proceso por picaduras es autocatalítico, ya que disminuye el pH de los sitios en que tiene lugar e incrementa el de las áreas adyacentes, reduciendo así el ataque en estas últimas.

Para que se mantenga el proceso de picaduras es necesario que exista un continuo aprovisionamiento de cloruros.

Se han identificado dos procesos para que ello ocurra. El primero es la migración de cloruros a la picadura desde el líquido de los poros; el segundo se refiere al llamado reciclaje de cloruros, como se muestra en la Figura 8.

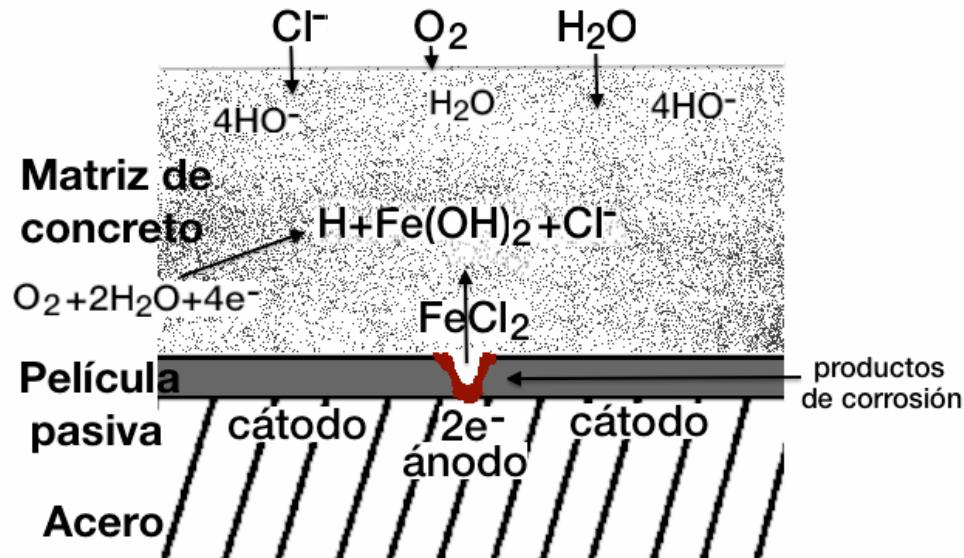


Figura 8. Efecto de la hidrólisis de los productos de corrosión y del reciclaje de cloruros en la picadura.

COMENTARIOS

En la actualidad, el concreto reforzado es uno de los materiales más usados para la construcción. El buen desempeño exigido para las estructuras de concreto depende tanto de la calidad de sus componentes como de la adecuada elaboración y colocación en obra. Para cumplir con los altos niveles de calidad requeridos es necesario seguir las especificaciones y recomendaciones al pie de la letra.

El tiempo de vida útil de una obra de concreto se determinará por su fabricación, el servicio que vaya a prestar y las condiciones a que será sometido, es decir, debe ser un “traje a la medida”. Es deseable, además, que se mantenga en buen estado estructural, químico y estético por el mayor tiempo posible, sin reparaciones o rehabilitaciones mayores que resulten onerosas. Sin embargo, en la realidad esto es difícil de conseguir, siendo el deterioro del concreto por su interacción con el medio ambiente uno de los problemas más importantes (Torres et al 2002:6), que genera inquietud e introduce como imprescindible el término de durabilidad en el diseño y la manufactura de piezas y obras elaboradas con este material.

FUENTES CONSULTADAS

- Bockris, John O'M, Amulya K.N. Reddy, y Maria E. Gamboa-Aldeco. 1998. "Fundamentals of Electrodeposition", en *Modern Electrochemistry 2A*, Public Academic/Plenum Publishers, Nueva York.
- Brusic, Vlasta. 1981. "Passivation and Passivity", en *Oxide and Oxide Films*, W Diggle, (Ed.), Marcel Dekker, Nueva York.
- Bruzzoni F. y R. Garavaglia. 1992. "Anodic iron oxide films and their effect on the hydrogen permeation through steel", en *Corrosion Science*, Vol. 33, No. 11 pp. 1797-1807.
- Del Valle Moreno, Angélica; Pérez López Tezozomoc y Martínez Madrid, Miguel. 2001. *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Publicación Técnica No. 182, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
- Kobayashi, Kazusuke y Yuichi Uno. 1989. "Influence of alkali on carbonation of concrete, part I. Preliminary tests with mortar specimens", en *Cement and Concrete Research*, 19(5), p. 821-826.
- Hernández Michaca, José Luis; Sánchez Granados, Víctor Manuel; Castillo Chaires, Irene; Damián Hernández, Sergio Alberto y Téllez Gutiérrez, Rodolfo. 2001. *Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento: Il Pavimentos rígidos*. Publicación Técnica No. 173, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
- Moreno Pérez Emiliano. 2005. *Comportamiento Electroquímico del Acero Embebido en Concreto*. Tesis Maestría en ciencias con Especialidad en Ingeniería Metalúrgica, IPN-ESIQIE, México.
- Sánchez de Guzman, Diego. 2001. *Tecnología del concreto y del mortero*. Biblioteca de la construcción, Quinta edición, Bhandar Editores, Santafé de Bogotá.
- Torres Acosta, Andrés A, Del Valle Moreno Angélica, Pérez Quiroz, José Trinidad, Martínez Madrid Miguel, Camacho Hurtado Sergio. 2010. *El uso de una pintura rica en zinc como sistema de protección catódica en concreto*. Publicación Técnica No. 210, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
- Tuutti, K. 1982. *Corrosion of steel in concrete*, en CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Estocolmo, Suecia.

LECTURAS RECOMENDADAS

- Troconis de Rincón, Oladis; Romero de Carruyo, Aleida; Andrade, Carmen; Helene, Paulo, e I. Díaz, miembros de la Red DURAR. 1997.

Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Rio de Janeiro.

— Feliú, Sebastián y Andrade, Carmen. 1989. *Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras.* Manual del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.

— Schiessl, Peter. 1988. *Corrosion of steel in concrete.* Report of the Technical Committee 60-CSC, RILEM. International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. Technical Committee 60-CSC, Chapman and Hall, Londres.

NORMAS REFERIDAS

— ASTM C150 / C150M – 12, 2012, *Specification for Portland Cement,* American Society for Testing and Materials, EUA.

TEZOMOC PÉREZ LÓPEZ

Ingeniero Químico, Maestro en Metalurgia y Doctor en Ciencias Químicas por la Facultad de Química de la UNAM. Profesor e Investigador del Centro de Investigación en Corrosión (CICORR) de la Universidad Autónoma de Campeche desde 1995. Director Científico del CICORR de junio de 2002 a abril de 2011. Investigador Nacional del Sistema Nacional

de Investigadores Nivel II. Asesor de proyectos del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), responsable de proyectos de investigación con financiamiento externo.