

CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Un fenómeno bien conocido pero que aún sigue causando considerables daños

Palabras clave: Hormigón Armado, Degradación, Corrosión, Diagnóstico.
Key words: Reinforced Concrete, Degradation, Corrosion, Diagnosis.

En el presente trabajo se muestra un enfoque global del fenómeno de degradación de estructuras de hormigón armado, con especial énfasis en la corrosión de las armaduras. Se hace una breve descripción del material, de la forma en que se degrada, de los mecanismos básicos de la corrosión de las armaduras, de los factores que la desencadenan y de sus consecuencias. Se complementa el trabajo con una descripción de los procedimientos de diagnóstico más habituales.

The present work deals with general aspects of reinforced concrete structures degradation, with special focus on the corrosion of the reinforced steel bars. A brief description of the material, its forms of degradation, the basic corrosion mechanisms of the steel reinforcements, the factors that cause corrosion and its consequences, are addressed. The work is complemented with a description of the diagnostic procedures commonly used.

■ **Gustavo S. Duffó y Silvia B. Farina***

Gerencia Materiales, Departamento Corrosión,
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas
y Técnicas
Universidad Nacional de San Martín

*E-mail: farina@cnea.gov.ar

El hormigón es uno de los materiales más importantes en la industria de la construcción actual. Su empleo va desde pequeñas reparaciones hasta grandes obras civiles que comenzaron a construirse desde principios del siglo XX con el comienzo de la fabricación industrial del cemento Portland, pasando por la mayoría de edificios y viviendas del mundo entero. Para tener una idea del consumo anual de este material, basta decir que es 5 veces mayor que el del acero. Esto se debe a su gran versatilidad en formas, acabados y tamaños; excelentes propiedades mecánicas; elevada durabilidad frente a determinados agentes que resultan agresivos para otros materiales; fácil disponibilidad y bajo costo relativo. Las primeras construcciones de hormigón arma-

do datan de mediados del siglo XIX. Eran elementos parciales de algunas construcciones como terrazas y macetas jardineras. Las dos primeras décadas del siglo XX fueron una etapa de búsqueda, estudio y prueba y a partir de la década del 30 se extendió notoriamente el uso del hormigón armado en construcciones civiles, viales y estructurales en general (Grunau, 1992). En nuestro país, entre las primeras construcciones de hormigón armado, podemos citar el edificio Kavanagh, torre de departamentos situada en el barrio de Retiro, inaugurado en el año 1936, y que fue en su momento el edificio de hormigón armado más alto de Sudamérica. De esa misma época data el Obelisco de la ciudad de Buenos Aires, monumento hueco de hormigón armado que se halla en

la Plaza de la República.

El hormigón es, por su naturaleza, un sistema heterogéneo constituido esencialmente por una matriz endurecida (mezcla del cemento, arena y agua) en la que se sitúan internamente partículas o fragmentos de áridos (generalmente canto rodado o piedra granítica). El resultado es un material que presenta una estructura porosa, la cual desempeña un papel muy importante en las propiedades mecánicas y en su durabilidad. Por su parte, el hormigón armado (o reforzado) es una matriz de hormigón que contiene barras de acero en su interior (armaduras). Las excelentes propiedades de este material se deben a la combinación de la resistencia a la compresión, propia del hormigón, y a la

alta resistencia a la tracción que le transfiere el acero (Gani, 1997). Las armaduras empleadas en el hormigón armado pueden utilizarse como barras de acero (lisas o aleteadas), alambres de acero o mallas de acero soldadas. El acero utilizado debe cumplir, como mínimo, con determinadas características mecánicas que incluyen límite de fluencia, resistencia a la tracción, alargamiento porcentual de rotura, aptitud al doblado y desdoblado, entre otros requisitos adicionales que pueden ser exigidos dependiendo de la aplicación, como ser soldabilidad y resistencia a la fatiga. Actualmente esas características están indicadas en las normas del Instituto Argentino de Racionalización de Materiales conjuntamente con el Instituto Argentino de Siderurgia. Ellas son la norma IRAM-IAS U500-528 de carácter general y la norma IRAM-IAS U500-207 para las armaduras sometidas a soldadura. La composición química establecida en el primer caso limita el contenido máximo de P y S; y en el segundo agrega al N y limita el contenido de C (0,24%).

Además de las ventajas estructurales que resultan de la combinación de ambos materiales (hormigón y armaduras de acero), el hormigón actúa como barrera física de las armaduras respecto del medio ambiente y posee características químicas que le ofrecen al acero una apropiada protección contra la corrosión. No obstante ello, con el tiempo el hormigón armado se deteriora, tanto debido a procesos de degradación del propio hormigón, como a la corrosión de las armaduras. Las causas de la degradación han sido ampliamente estudiadas y, si bien se conocen los métodos para evitar fallas catastróficas, la realidad es que los accidentes siguen ocurriendo y en la mayoría de los casos se deben a la falta de conocimiento de las medidas de precaución así como, mucho

más tristemente, a la negligencia (Biczók, 1981; Rostam, 1992).

Contrariamente a la creencia popular, el hormigón es un material extremadamente complejo y su comportamiento en servicio depende de los materiales utilizados para su fabricación, de los procesos de elaboración, de la estructura de la cual forma parte y del medio ambiente en el cual se encuentra emplazado. A continuación se describirán los principales modos de degradación del hormigón, la corrosión de las armaduras, las consecuencias que conlleva el ignorar estos fenómenos y la forma de evaluarlos y mitigarlos.

■ DEGRADACIÓN DEL HORMIGÓN

El cemento (componente del cual depende mayoritariamente la química del hormigón) es una mezcla de minerales, principalmente silicatos de calcio, que cuando reaccionan con el agua se endurecen por hidratación de los distintos compuestos que lo constituyen. Durante

este proceso de hidratación ocurren varios fenómenos. En principio, se conforma la red de silicatos que determina la resistencia mecánica del hormigón. A su vez, se evapora paulatinamente el exceso de agua agregada durante el amasado para hacer trabajable las mezclas, lo cual genera una red de poros y canales que llegan hasta la superficie del hormigón. Los álcalis provenientes de las materias primas así como el hidróxido de calcio segregado durante la hidratación llevan al pH de la fase acuosa de los poros a valores extremadamente alcalinos, generalmente mayores que 13 (Taylor, 1978; Hewlett, 1998).

Estos procesos determinarán en gran medida el desempeño final del material, por lo cual la formulación, ejecución y curado del hormigón deben ser cuidadosos (Mehta, Monteiro 2006). Por ejemplo, la cantidad de agua agregada tiene una gran influencia sobre la calidad del hormigón obtenido. Esto es debido a que la cantidad de agua añadida a la mezcla de áridos y cemento para

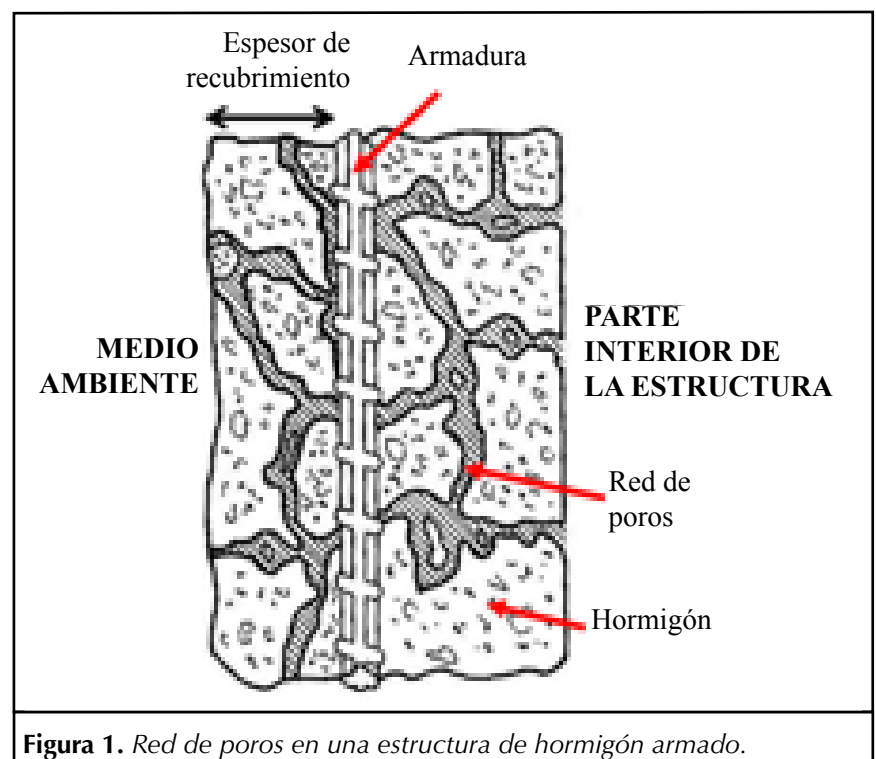


Figura 1. Red de poros en una estructura de hormigón armado.

obtener un hormigón de trabajabilidad conveniente, es mayor a la necesaria para la hidratación completa del cemento anhidro. Sin embargo, se debe evitar su exceso porque aumentará la porosidad del hormigón endurecido y con ello disminuirá su resistencia a la compresión. Posteriormente, la red de poros originada durante el curado hace que el hormigón sea relativamente permeable a líquidos y gases (Figura 1).

Respecto al agua empleada en la fabricación del hormigón, no solo se debe tener en cuenta su cantidad, sino también su calidad. En general cualquier agua potable es aceptable para su uso en la elaboración de hormigones. Pero la existencia de impurezas en dichas aguas puede tener también influencia negativa en los procesos de fraguado, durabilidad y estabilidad de volumen. Con respecto a la utilización de agua de mar, es de destacar que el contenido de sal de la misma tiende a causar un fraguado más rápido y ganancia en la resistencia inicial debido a la acción de los cloruros presentes, pero la resistencia final se reduce entre un 10 y un 20% comparado con los hormigones elaborados con agua potable. Además, la presencia de cloruros incrementa el riesgo de corrosión del refuerzo de acero en los hormigones armados, como se verá más adelante.

El tamaño de los poros puede variar desde unos pocos nanómetros hasta algunos milímetros. El volumen y su distribución dependerán fundamentalmente de la relación agua/cemento de la mezcla, la forma y el tiempo de curado, la introducción de aire en la mezcla, etc. Esta incorporación de aire está orientada a disminuir la permeabilidad, ya que el proceso de evaporación del agua en exceso culmina en las burbujas de aire, evitando la formación de canales que llegan hasta el me-

dio externo. En una primera aproximación, la resistencia mecánica del hormigón es directamente proporcional al contenido de cemento e inversamente proporcional a la porosidad. Cualquier reducción en la relación agua/cemento mediante el uso de mezclas y granulometrías adecuadas, o agentes fluidificantes, repercutirá en una elevación de la resistencia mecánica y de la impermeabilidad. Las nuevas tecnologías aplicadas al hormigón se basan en reducir al máximo la porosidad.

A pesar de su aspecto robusto, el hormigón puede sufrir varios procesos, tanto físicos como químicos, que conducen a su deterioro (Bentur *et al.*, 1997; Irrasar, 2001; Pedferri *et al.*, 2004).

Dentro del deterioro físico, cabe destacar la fisuración provocada por esfuerzos mecánicos de distinta índole (terremotos, por ejemplo), erosión mecánica (acción de vientos o flujo de líquidos) y el denominado "ataque por escarcha". Este último tipo de ataque se produce por la acción de bajas temperaturas (inferiores a la de solidificación del agua) sobre el hormigón. Esto es frecuente en la Argentina en la zona cordillerana y patagónica ya que se presenta esta condición durante varios meses al año. Pero además, estas bajas temperaturas también se presentan en algunas estructuras industriales como cámaras frigoríficas, donde el hormigón puede estar sometido a temperaturas aún más rigurosas. La acción de las bajas temperaturas se manifiesta por el congelado del agua de los poros capilares del hormigón. Es sabido que el agua sólida ocupa un volumen casi 10% mayor que el del agua líquida y esto, cuando ocurre dentro de los poros, genera un aumento en la presión hidráulica provocada por su expansión que conduce a la formación de fisuras. Este tipo de ataque puede

ser minimizado o bien por la reducción del volumen de poros capilares en el hormigón empleando una relación agua/cemento más baja, o por la entrada deliberada de aire al hormigón. El uso de agentes de aireado conduce a la formación de una alta concentración de pequeñas burbujas de aire en el hormigón. Estas burbujas pueden servir para relevar la presión que es el resultado de la formación del hielo dentro de los poros capilares, y de esta forma se previene la expansión y fisurado del hormigón. En aquellas zonas donde es habitual la formación de hielo sobre el pavimento, suelen utilizarse agentes anticongelantes a base de cloruro de calcio o de sodio que -si bien tienden a evitar o mitigar el deterioro por congelación y deshielo- aceleran el deterioro superficial del pavimento de hormigón por descascamiento. También estas sales provocan la corrosión de armaduras (como se verá más adelante) afectando sobre todo a los tableros de puentes y losas de edificios de estacionamiento, estas últimas por la presencia de cloruros debido al transporte y su posterior deposición a través de los neumáticos de los vehículos.

Dentro de los deterioros de origen químico cabe destacar el ataque por aguas blandas, el ataque por sulfatos, el ataque ácido y la reacción álcali-agregado, entre otros.

El agua blanda contiene muy bajas cantidades de iones calcio o magnesio disueltos, y generalmente son levemente ácidas (pH menor que 7). Su agresividad frente al hormigón depende del grado de dureza y de la cantidad de dióxido de carbono libre presente. El deterioro del hormigón en contacto con aguas blandas se produce primeramente porque el agua extrae del hormigón a las especies responsables del mantenimiento de su alto pH. Esto, a su vez, puede

llevar a la descomposición de otros componentes del hormigón que solo son estables a pH altos, tales como los silicatos hidratados, que se descomponen produciendo carbonato de calcio y una red llena de sílice (SiO_2), de muy pobres propiedades mecánicas. Este fenómeno no sólo ocurre en hormigones sumergidos, ya que también puede ser un problema en hormigones expuestos al agua de lluvia. La magnitud de la lixiviación en aguas blandas está influenciada por muchos factores, entre los que se incluyen la dureza del agua (contenido en iones Ca^{2+} y Mg^{2+}), velocidad del flujo de agua, densidad del hormigón y el estado de su superficie.

El ataque por sulfatos, que ocurre en hormigones en contacto con aguas conteniendo altas concentraciones de este ion o enterrados en suelos arcillosos, se debe a la presencia en el cemento de un componente denominado aluminato de calcio, que al reaccionar con el ion sulfato se descompone generando cristales de "etringita", cuyo volumen es mucho mayor que el del aluminato descompuesto. Estos cristales de "etringita" generan una expansión interna en la masa del hormigón que, al no soportar tensiones de tracción, termina fisurándose.

La acción de los ácidos sobre el hormigón genera la conversión de los compuestos de calcio (hidróxido de calcio, silicatos y aluminatos de calcio hidratados) en las correspondientes sales de calcio, generalmente solubles. Como resultado de esas reacciones, se destruye la estructura del hormigón. La velocidad de la reacción de los diferentes ácidos con el hormigón está determinada no tanto por la agresividad del ácido, sino más bien por la solubilidad de la sal de calcio resultante. A mayor solubilidad de la sal, mayor será el grado de deterioro. De los ácidos

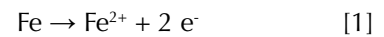
minerales más comunes (clorhídrico, nítrico y sulfúrico), el ácido sulfúrico es el que más frecuentemente se encuentra en aguas subterráneas. Puede ser generado por la acción oxidante de ciertas bacterias sobre compuestos de azufre. El ácido producido reaccionará con el hormigón degradándolo. Este tipo de deterioro es muy frecuente en estructuras de hormigón enterradas. También ocurre este tipo de ataque en cañerías de hormigón de sistemas cloacales, ya que, cuando su contenido queda estancado o fluye muy lentamente, la acción de ciertas bacterias puede producir sulfuro de hidrógeno gaseoso, que se disuelve en la superficie del agua, donde otras bacterias lo oxidan convirtiéndolo en ácido sulfúrico. Es por ello que resulta esencial mantener un flujo permanente de aguas cloacales de modo tal que estas bacterias no tengan tiempo de actuar.

Otra forma de degradación del hormigón es la conocida como reacción álcali-agregado, la cual se produce debido a que los agregados silíceos porosos finamente divididos (arenas, por ejemplo) son muy reactivos ya que tienen un área específica muy grande. En contacto con álcalis (los hidróxidos presentes en el agua de los poros) puede ocurrir una reacción de la cual el producto es un gel rico en silicato de sodio o potasio que es capaz de absorber cantidades grandes de agua y que causan la hinchazón del gel. Este gel completamente hinchado produce un aumento de la presión que culmina con la fisuración del hormigón, similar a lo que ocurre en el ataque por sulfato.

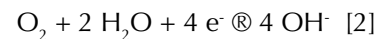
■ CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS EN EL HORMIGÓN

La corrosión de las armaduras de acero en el hormigón armado es una de las causas más frecuente de deter-

rioro de estructuras construidas con este material. La corrosión del acero (que químicamente se lo puede considerar como hierro) en el hormigón es un proceso electroquímico en el cual, el electrolito es la humedad presente (Duffó, Farina 2016). Las reacciones electroquímicas involucradas son la disolución u oxidación del hierro, dando lugar al denominado proceso anódico



y la reducción del oxígeno presente sobre las armaduras, dando lugar al proceso catódico



Es importante resaltar que, sin la presencia simultánea de oxígeno y humedad, la corrosión no es posible, y que por debajo de una cierta cantidad crítica de ambos, la corrosión se presenta de manera poco apreciable.

En las condiciones de pH existentes en un hormigón "sano" (entre 12,6 y 14), y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentra "pasivado", esto es, recubierto por una película de óxidos transparente, compacta y continua de aproximadamente 1 a 100 nanómetros de espesor, que lo protege de la corrosión siempre y cuando el hormigón sea de buena calidad, no esté fisurado y no cambien sus propiedades fisicoquímicas por agresiones externas. Por tal motivo, entre otras propiedades de la estructura, es necesario que el espesor del recubrimiento (capa de hormigón entre el medio ambiente y la primera fila de armaduras) sea el adecuado para cada ambiente al que esté expuesta la estructura.

No obstante lo expuesto, bajo ciertas condiciones, la película protectora se destruye originando deter-

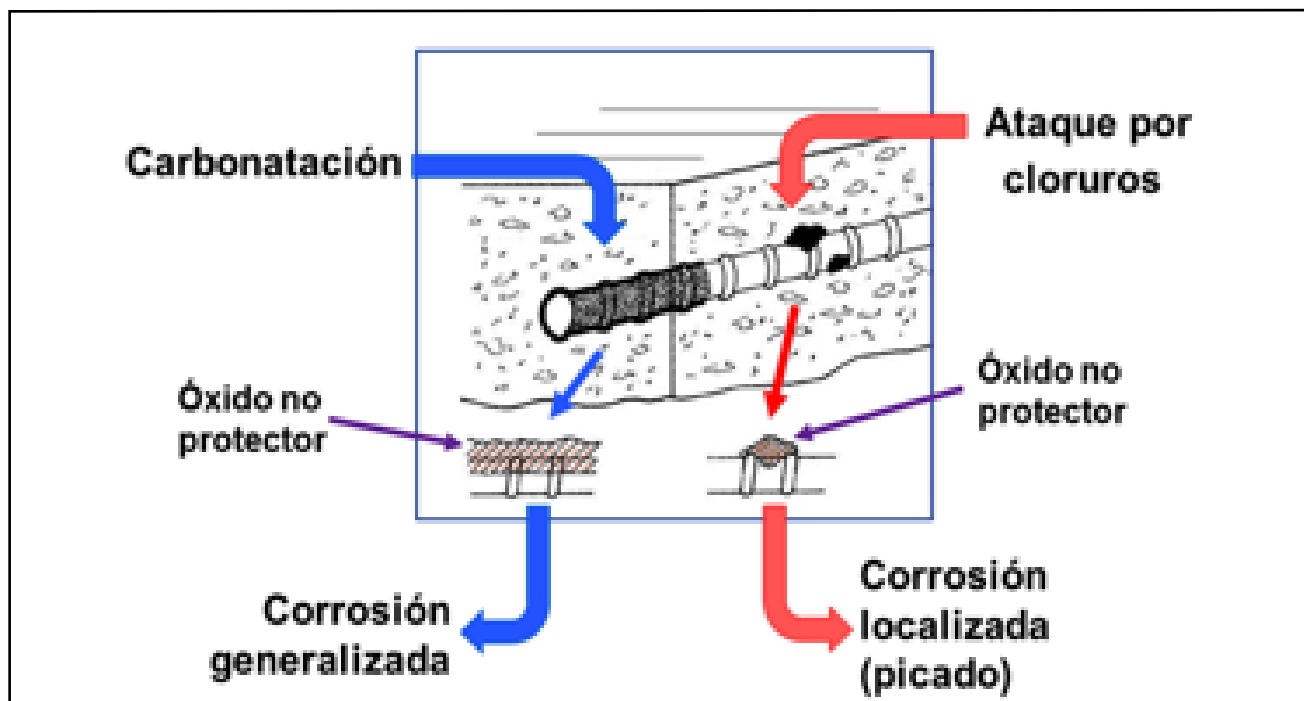


Figura 2. Tipos de corrosión más frecuentes en estructuras de hormigón armado, origen y consecuencias.

minados procesos corrosivos cuyas características dependen de cuál es el agente causante. Las principales causas de corrosión son la disminución de la alcalinidad del medio que conduce a la corrosión generalizada de la armadura; y la presencia de iones cloruro provenientes del medio externo o incorporados durante la etapa de amasado del hormigón, que conducen a la corrosión localizada del acero (Figura 2).

La corrosión generalizada se produce por un descenso en la alcalinidad del hormigón que puede ser debido al contacto con aguas blandas (mencionado más arriba), o por la reacción de los compuestos de carácter alcalino de la fase acuosa del hormigón (NaOH , KOH y Ca(OH)_2) con los componentes ácidos de la atmósfera (CO_2 , SO_2 , etc.). El más abundante es el CO_2 , por lo que a este proceso de reducción de la alcalinidad se lo conoce genéricamente con el nombre de "carbonatación". Una característica de este proceso es la existencia de un frente de avance que se puede apre-



Figura 3. Determinación del espesor de la zona carbonatada por medio del rociado con fenolftaleína de la estructura a analizar.

ciar visualmente mediante la coloración con fenolftaleína, que produce una coloración rojo púrpura en la zona correspondiente al hormigón "sano", pH mayor que 12,6; y se torna incolora en la zona carbonatada, pH menor que 9 (Figura 3).

Al disminuir el pH hasta valores por debajo de 9, la película pasiva deja de ser estable, pasando a ser termodinámicamente posible la disolución del hierro, de forma tal que la armadura se disuelve en forma generalizada. Los productos de corrosión (óxidos, hidróxidos, óxidos

hidratados, etc.) tienen un volumen más que 6 veces mayor que el del hierro del cual provienen, por lo cual ejercen presión sobre la cubierta del hormigón hasta provocar fisuras, descascaramientos y delaminaciones (Figura 4).

Por su parte, la corrosión localizada es un tipo de corrosión en la que el ataque se produce en zonas muy pequeñas, en algunos casos difíciles de detectar, donde la cantidad de material disuelto no guarda ninguna relación con el daño que puede ocasionar (Galvele, Duffó 2006).



Figura 4. Efecto de la carbonatación sobre diferentes estructuras de hormigón armado (izquierda: techo de un estacionamiento subterráneo; derecha: viga de un edificio departamento).



Figura 5. Corrosión de las barras de refuerzo en el hormigón armado debido a la presencia de cloruro. Las imágenes corresponden a estructuras en contacto con agua de mar. (izquierda: muelle que muestra la presencia de manchas sobre la superficie del hormigón; derecha: fisuración causada debido a la formación de productos de corrosión del hierro).

Para el caso del hormigón, hay varios agentes desencadenantes de la corrosión localizada, pero los más habituales son los iones depasivantes (que generan ruptura de la película pasiva) y que provienen de las materias primas, de aditivos o por la penetración desde el exterior. La situación más agresiva y la responsable del mayor número de casos de corrosión localizada en el hormigón armado es debida a la presencia de cloruros. Aunque los iones sulfuro y sulfato son también depasivantes, son mucho menos frecuentes; y, por

ende, menos peligrosos que los cloruros.

Los iones cloruro tienen la propiedad de destruir en forma puntual la capa pasivante, lo que provoca un tipo de corrosión denominado "picado". Los cloruros pueden estar en el hormigón, bien porque se añaden con sus componentes (aditivos, agua, etc.) o bien porque penetran desde el exterior a través de la red de poros. Esta última situación es la que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales de deshie-

lo en carreteras o puentes en climas fríos. El límite inferior de contenido de cloruros, por debajo del cual no existe la posibilidad de la aparición de picado depende de varios factores como ser el tipo de cemento, relación agua/cemento, contenido de humedad, etc., pero un valor medio generalmente aceptado es de 0,4% en relación al peso de cemento.

Aunque el hormigón no contenga cloruros inicialmente, éstos pueden llegar hasta la armadura a través de la red de poros si la estruc-

tura está situada en ambientes marinos, por ejemplo. En estos casos, la cantidad de cloruros que ingresa se va incrementando con el tiempo, pudiendo llegar a atacar toda la superficie de la armadura y provocar un tipo de corrosión muy peligrosa. En todos los casos, una vez que se inicia el fenómeno de picado, éste no se puede detener y comienzan a acumularse productos de corrosión que expanden al hormigón fisurándolo (Figura 5).

Es importante destacar que es necesaria la presencia de humedad para que todos estos fenómenos de corrosión tengan lugar ya que el agua es imprescindible porque no solo permite la movilidad de los iones a través del electrolito, sino que también interviene en el proceso catódico de reducción de oxígeno en medios neutros o básicos a través de la reacción [2]. Si los poros están saturados de humedad, las velocidades de corrosión serán moderadas o bajas porque el acceso de oxígeno hasta las armaduras (para que pueda ocurrir la reacción catódica) está dificultado por la presencia de agua. Por el contrario, si los poros están secos, el oxígeno tiene fácil acceso a la estructura, pero no hay agua disponible para que la reacción [2] pueda ocurrir. Las máximas velocidades de corrosión se manifiestan en hormigones con contenidos altos de humedad, pero sin saturación de poros. En este caso, el oxígeno llega libremente hasta las armaduras, y el contenido de agua es suficiente como para permitir altas velocidades de corrosión.

■ CONSECUENCIAS DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

La corrosión se manifiesta sobre el acero disminuyendo su capacidad mecánica al disminuir su diámetro (y con ello su sección eficaz); sobre el hormigón, porque se fisura

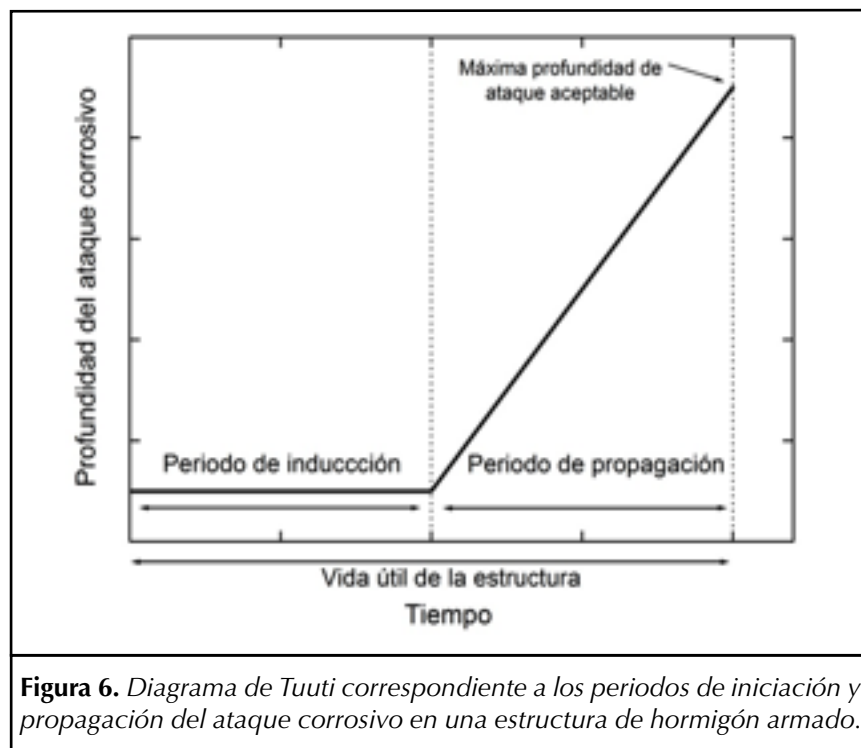


Figura 6. Diagrama de Tuuti correspondiente a los periodos de iniciación y propagación del ataque corrosivo en una estructura de hormigón armado.

debido a la presencia de productos de corrosión más voluminosos que el acero que lo origina; y sobre la adherencia acero/hormigón, que impide que se ponga de manifiesto el efecto benéfico que tiene sobre las propiedades mecánicas de la estructura el contacto íntimo entre el hormigón y el acero.

Cuando no se toman los recaudos suficientes, las pérdidas ocasionadas por la corrosión de las armaduras de hormigón suelen ser catastróficas. El fenómeno no sólo afecta a edificios y puentes, con la consiguiente pérdida económica, sino que también atenta contra la seguridad y la vida de las personas. Muchas veces escuchamos la triste noticia de que el balcón de un edificio se desmoronó, el techo de una pileta climatizada se cayó y otros accidentes con consecuencias fatales. En muchos casos se trata de problemas evitables durante el diseño de la estructura (por ejemplo, disponer de un suficiente espesor de recubrimiento en el caso de balcones), o de mantenimiento durante su uso (por ejemplo, la protec-

ción extra que necesita el techo de una pileta que se encuentra en un ambiente con mayor cantidad de cloruro que el habitual). Finalmente, los problemas de corrosión en las viviendas tales como la aparición de manchas de óxidos, generación de fisuras y pequeños desmoronamientos de material, si bien pueden no comprometer la estabilidad de la estructura, afean la vivienda y la desvalorizan.

■ PROCEDIMIENTO DE DIAGNÓSTICO

Uno de los mayores desafíos para los ingenieros estructurales es determinar la magnitud del ataque corrosivo en una estructura dada, a fin de intervenir en su reparación. Una de las mejores maneras de correlacionar la magnitud del daño por corrosión y la durabilidad de las estructuras, está dado por el diagrama de Tuuti (Figura 6). En él se grafica la magnitud del ataque corrosivo en función del tiempo (Tuuti, 1982). Dicho diagrama consta de dos regiones bien diferenciadas entre sí:

el período de inducción y el período de propagación.

Durante el período de inducción, el ataque corrosivo es despreciable, pero a través de procesos mayoritariamente difusivos, van ingresando al hormigón las especies agresivas (principalmente CO_2 y cloruro, como se mencionó anteriormente). La duración del tiempo de inducción depende fundamentalmente de los parámetros de transporte de dichas especies (coeficientes de difusión, entre otros). El período de inducción finaliza cuando las especies agresivas llegan hasta las armaduras de acero, es decir, atravesaron completamente el espesor de recubrimiento, y rompen la pasividad (en forma generalizada o localizada), dando comienzo al proceso corrosivo. A partir de dicho instante, se entra en el período de propagación donde se pone de manifiesto el ataque. La velocidad a la cual se manifestará dicho ataque dependerá de factores tales como el contenido de humedad en la estructura, la presencia de oxígeno, la temperatura, la relación Cl/OH , etc. Una vez iniciado el proceso corrosivo, a menos que se intervenga en la estructura, no se lo puede detener. Luego, la

vida útil de la estructura, estará dada por la máxima profundidad de ataque corrosivo aceptable (que dependerá de factores estructurales, principalmente).

A efectos de poder determinar el grado de deterioro que presenta una estructura de hormigón armado que se sospecha puede estar afectada por corrosión, se debe realizar una inspección de la estructura que puede ser del tipo visual o complementada con diversas técnicas que se emplean *in-situ* o en laboratorio (Andrade, 1988).

Esta inspección puede contar con diversos pasos, siendo los más usuales los que se describen a continuación:

a- Observación visual. Es importante para la detección de manchas de óxido, fisuras en el hormigón y/o regiones con delaminación o desprendimientos del recubrimiento de hormigón. La primera manifestación de que un proceso de corrosión está en marcha, es la aparición de manchas de óxido en la superficie, que aparecen paralelas a la dirección de las barras de refuerzo (Figura 7).

Como se mencionó más arriba, la corrosión genera ciertos productos de corrosión cuyo volumen es varias veces superior al acero que lo genera, lo que origina tensiones de tracción. Recordando que el hormigón tiene una resistencia a la tracción nula o escasa, el paso siguiente es la aparición de fisuras paralelas a las barras de refuerzo y, si este proceso no se detiene a tiempo, el siguiente estadio es la delaminación del recubrimiento de hormigón (Figura 8).

En algunos casos es posible que, si la estructura de hormigón está muy húmeda, solo se detecten manchas de óxido, sin la presencia de sectores delaminados o fisurados.

b- Localización de las armaduras. Localizar las armaduras desde el exterior de la estructura y determinar la cantidad de las mismas y su diámetro es de vital importancia para poder evaluar la capacidad de soportar cargas del componente estructural afectado por problemas de corrosión.

La manera de establecer la localización de las armaduras es por medio de un equipo llamado "pacómetro" que detecta la posición de



Figura 7. Manchas de óxido a lo largo de las barras de refuerzo en una estructura de hormigón armado.



Figura 8. Delaminación del recubrimiento de hormigón debido a la presión generada por los productos de corrosión de las armaduras.

las mismas mediante campos electromagnéticos. Es un caso particular de los denominados “detectores de metales”. Si se conoce con cierta precisión el diámetro de las armaduras, es posible estimar el espesor de recubrimiento de hormigón (Figura 9).

c- Medición de la resistividad eléctrica del hormigón. Como se mencionó más arriba, la resistividad del hormigón es función de la distribución de poros, su contenido de humedad y la presencia de especies iónicas. Se disponen de diversas técnicas para su medición, siendo la más habitual la denominada “de las cuatro puntas” (conocida también como método de Wenner). El principio básico de este método es la inyección de una corriente entre dos electrodos y la medición del potencial generado entre otros dos electrodos simétricamente ubicados. La resistividad resulta de la relación entre ambos parámetros. A partir del valor de resistividad medido, es posible por medio del empleo de tablas de referencia, conocer la agresividad del hormigón para la corrosión de las armaduras. En la Tablas 1 y 2 se muestran, a modo de ejemplo, dos de las recomendaciones sugeridas en la literatura.

d- Medición del potencial de corrosión. El valor del potencial de corrosión permite determinar, de manera cualitativa, cuál es el estado de corrosión de las armaduras (activo, pasivo o indefinido). Para su medición, se hace un contacto eléctrico con las armaduras, se utiliza un electrodo de referencia (habitualmente se emplea uno de cobre/sulfato de cobre saturado) y se mide el potencial entre las armaduras y el electrodo de referencia con un voltímetro de alta impedancia (Figura 10). La manera habitual de interpretar los resultados es hacer empleo de la norma ASTM C 876 (Tabla



Figura 9. Localización de las armaduras por medio de un “pacómetro”.

3), aunque análisis más complejos (Tabla 4) que incluyan datos relacionados con la concentración de cloruro, presencia de oxígeno, pH y contenido de humedad basado en la humedad relativa ambiente pueden llevar a predicciones más precisas (Troconis de Rincón *et al.*, 2006).

e- Medición de la velocidad de corrosión de las armaduras. La velocidad de corrosión de las armaduras es la única propiedad del sistema que permite establecer relaciones cuantitativas con el grado de deterioro de la estructura, ya que su medición provee el valor instantáneo de la velocidad del deterioro en términos de disminución del diámetro (o de la sección efectiva) de las armaduras (Fontana, 1986). Hay varias técnicas y equipos comerciales que permiten su determinación (Figura 11).

Conocido el valor de la velocidad de corrosión y su evolución

con el tiempo, es posible emplear normas o recomendaciones que dan cuenta de la peligrosidad del valor

obtenido. La de empleo más habitual en el ámbito latinoamericano, es la provista por el Manual de Ins-



Figura 10. Medición del potencial de corrosión de las armaduras con un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado y un multímetro de alta impedancia.

Tabla 1:

Probabilidad de corrosión en función de la resistividad del hormigón según Mc Carter *et al.*, 1983.

Resistividad (kΩ.cm)	Probable velocidad de corrosión
< 5 kΩ.cm	Muy alta
5 a 10 kΩ.cm	Alta
10 a 20 kΩ.cm	Moderada/baja
> 20 kΩ.cm	Baja

Tabla 2:

Probabilidad de corrosión en función de la resistividad del hormigón según Andrade, Alonso., 2001.

Resistividad (kΩ.cm)	Probable velocidad de corrosión
> 100 - 200 kΩ.cm	Hormigón muy seco. No permite distinguir entre acero al estado activo o pasivo. Las velocidades de corrosión serán muy bajas independientemente del contenido de cloruros y del nivel de carbonatación
50 - 100 kΩ.cm	Bajas velocidades de corrosión
10 - 50 kΩ.cm	Moderada a alta velocidad de corrosión si el acero está activo en hormigones carbonatados y/o contaminados con cloruro
< 10 kΩ.cm	La resistividad no es un parámetro que controle la velocidad de corrosión

Tabla 3: Probabilidad de corrosión en función del potencial de corrosión de las armaduras (E_{corr}) medido contra un electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/SO_4).	
E_{corr} (V _{Cu/CuSO₄})	Probabilidad de corrosión
< -0,350	> 95 % (estado activo)
-0,200 a -0,350	aprox. 50% (estado indefinido)
> -0,200	< 5 % (estado pasivo)

Tabla 4: Riesgo de daño en función del potencial de corrosión (E_{corr}) y condiciones medioambientales. HR: humedad relativa ambiente.			
Condición	E_{corr} (V _{Cu/CuSO₄})	Observaciones	Riesgo de daño
Estado pasivo	0,270 a -0,200	Sin Cl ⁻ , pH > 12,5, H ₂ O (HR↑)	Despreciable
Corrosión localizada	-0,2 a -0,452	Cl ⁻ , O ₂ , H ₂ O, HR↑	Alto
Corrosión uniforme	-0,150 a -0,600	Carb., O ₂ , H ₂ O, HR↑	Moderado – Alto
	0,200 a -0,150	Carb., O ₂ , Seco, HR↓	Bajo
	-0,400 a -0,600	Carb. o ↑Cl ⁻ , H ₂ O, HR↑	Alto
Corrosión uniforme	< -0,600	↑Cl ⁻ , H ₂ O, sin O ₂	Despreciable



Figura 11. Equipo comercial que permite la medición de la velocidad de corrosión de las armaduras.

pección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión de Estructuras de Hormigón Armado, desarrollado bajo el auspicio del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Troconis de Rincón *et al.*, 2006), que se muestra en la Tabla 5.

e- Extracción de testigos de hormigón. La extracción de testigos se lleva a cabo con una máquina perforadora que emplea una broca de diamante refrigerada con agua, y que permite extraer testigos de 5 o 10 cm de diámetro (Figura 12). Estos testigos son empleados *in-situ* o en el laboratorio para la determinación de la profundidad del frente carbonatado y la concentración de iones cloruro.

f- Medición de la profundidad de carbonatación. La determinación de la profundidad del frente carbonatado se mide sobre los testigos obtenidos de la estructura rociando la superficie de la muestra recién extraída con una solución de fenolftaleína disuelta en etanol. Como fue explicado anteriormente, la fenolft-

Tabla 5: Riesgo de corrosión en función de la velocidad de corrosión	
Velocidad de corrosión (µm/año)	Riesgo de Corrosión
< 1,2	Despreciable
1,2 a 5,8	Baja
5,8 a 11,6	Moderada
> 11,6	Alta



Figura 12. Extracción de testigos en una estructura de hormigón armado.

taleína presenta coloración fucsia a pHs mayores que 9,5 y es incolora a pHs menores que dicho valor. La relación entre la profundidad del frente carbonatado (x) y el tiempo desde que la obra ha sido ejecutada (t) es $x = k \cdot t^{0,5}$. De esta manera, calculado el valor de la constante k para la estructura analizada, es posible predecir el tiempo necesario para que el frente carbonatado recorra todo el espesor de recubrimiento, llegue hasta las armaduras y genere su depasivación (Figura 13).

g- Determinación del perfil de concentración de iones cloruro. Para esta determinación, el testigo obtenido se corta con un disco de corte seco en rodajas de 5 a 10 mm, para luego pulverizarlas y realizar el análisis del contenido de cloruro. Con este perfil de concentraciones, y a través del empleo de ecuaciones que describen el movimiento de iones cloruro hacia el interior de la estructura, es posible predecir qué concentración de cloruro habrá a una profundidad y tiempo dado (Duffó, Farina, 2016). Cuando dicha concentración a la profundidad

correspondiente al espesor de recubrimiento alcance un nivel crítico (el valor generalmente adoptado es 0,4% de cloruro respecto de cemento), es posible la iniciación de corrosión localizada sobre las armaduras.

En muchas oportunidades, la complejidad de los diversos procesos de corrosión hace que el monitoreo sea dificultoso. Por ejemplo, la temperatura y la concentración de especies disueltas tales como cloruro, afectan dramáticamente tanto el tipo de corrosión como su velocidad de propagación. Además, los parámetros controlantes pueden modificarse con el tiempo, requiriendo pe-

riódicas mediciones en tiempo real. Un sistema de monitoreo integrado y que permita medir desde “dentro” de la estructura por medio de sensores embebidos, debe ser capaz de medir adecuadamente no sólo los parámetros electroquímicos arriba mencionados, sino también otros parámetros medioambientales tales como temperatura, concentración de iones cloruro y disponibilidad de oxígeno. Una vez medidos dichos parámetros, el especialista puede utilizar esa información para conocer la situación de la estructura y tomar decisiones respecto a la necesidad de aplicar estrategias de remediación, en caso de ser necesarias.

En el mercado internacional están disponibles sensores que, embebidos en la estructura, son capaces de medir algunos o todos los parámetros arriba mencionados. Sin embargo, el precio de estos sensores es prohibitivo para países en vías de desarrollo, debido a su alto grado de sofisticación y al valor agregado tecnológico. Por esta razón es importante hacer desarrollos locales que permitan disponer de sensores económicos. En la Comisión Nacional de Energía Atómica de la República Argentina se ha desarrollado un sensor que puede ser embebido en estructuras nuevas o ya existentes (Figura 14) y que permite el monitoreo de parámetros asociados con la corrosión de las armaduras: resistividad eléctrica del hormigón,



Figura 13. Testigo de hormigón rociado con solución de fenolftaleína, donde se aprecia la profundidad de carbonatación (x).

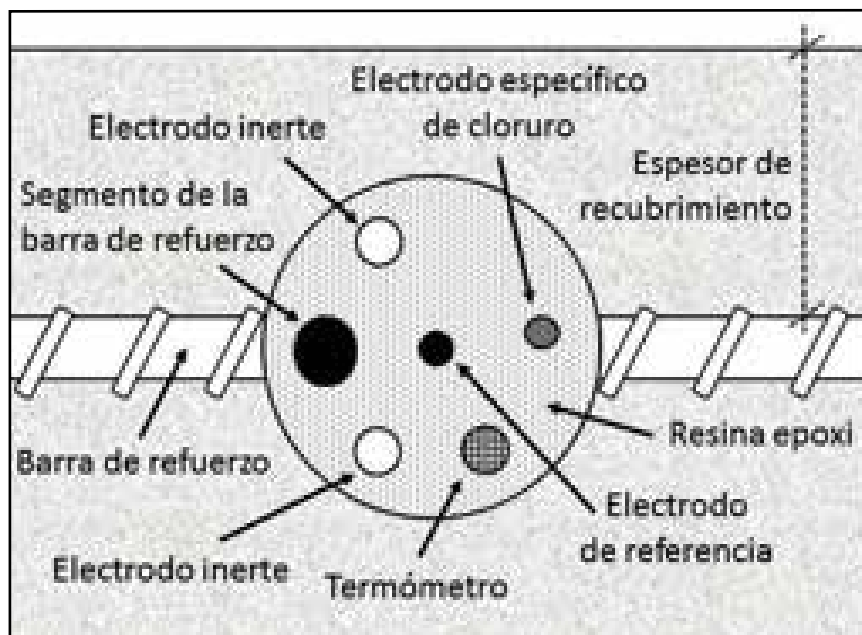


Figura 14. Esquema de un sensor embebible para el monitoreo de parámetros asociados con la corrosión de las armaduras: resistividad eléctrica del hormigón, potencial y velocidad de corrosión, flujo de oxígeno, contenido de cloruro y temperatura de la estructura (Duffó, Farina, 2016)

potencial y velocidad de corrosión, flujo de oxígeno, contenido de cloruro y temperatura de la estructura (Duffó, Farina, 2009; Duffó, Farina, 2016). Este desarrollo local, luego de más de una década de uso, ha mostrado ser confiable, eficiente y duradero (Burkart *et al.*, 2104; Vázquez, Duffó, 2018)

Es de destacar que la mayor parte de las grandes obras construidas con hormigón armado tienen una antigüedad en la que los costos de inspección y mantenimiento han crecido tanto, que constituyen la mayor parte de los gastos involucrados en infraestructura. Es por este motivo que el empleo de sistemas integrados de monitoreo de estructuras nuevas o ya existentes, resulta una herramienta valiosa al permitir el desarrollo de programas de inspección y mantenimiento más racionales.

Finalmente, y a fin de evitar problemas futuros, se debe tener en cuenta que lo único de lo que hay que tomar conciencia es de que el

recubrimiento de hormigón sobre las armaduras debe ser suficientemente impermeable y grueso, porque lo que importa, sobre todo, es impedir que las materias nocivas lleguen a las armaduras y las destruyan.

■ PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Existen diversas alternativas para evitar (o mitigar) la degradación de estructuras de hormigón armado cuando ésta es generada por la corrosión de las armaduras. Esta prevención se puede efectuar desde el punto de vista del hormigón mismo o desde el punto de vista de las armaduras.

En el primer caso, durante el proceso de construcción de la estructura, es necesario seleccionar correctamente el tipo de cemento a emplear, utilizar una adecuada dosificación de la mezcla (particularmente la relación agua/cemento), realizar en obra una buena com-

packación y curado del hormigón y efectuar un adecuado mantenimiento de la estructura (por ejemplo, sellando grietas y fisuras en cuanto son detectadas). Por otro lado, es factible aplicar revestimientos o recubrimientos que retarden el ingreso de agentes agresivos (dióxido de carbono y/o cloruro). Esta metodología es de relativamente fácil aplicación, se puede implementar en cualquier estructura, pero debe ser realizada previo al ingreso de los agentes agresivos. Otra forma de prevención es agregar, durante el amasado del hormigón, agentes inhibidores de la corrosión del acero. Esta técnica también se está aplicando en estructuras ya existentes, induciendo a la difusión hacia el interior de la estructura de agentes inhibidores que se pulverizan desde el exterior. Para que sean efectivos, hay que asegurar que en un corto tiempo, estos agentes alcancen las armaduras (es decir, atraviesen el espesor de recubrimiento) y la protejan adecuadamente.

Desde el punto de vista de las armaduras, es posible efectuarles una protección catódica, ya sea por el empleo de ánodos de sacrificio o por la aplicación de una corriente externa. Esta técnica es posible de ser aplicada en casi cualquier estructura; es la única que detiene la corrosión una vez iniciada pero tiene la desventaja de necesitar personal especializado y tiene altos costos de mantenimiento cuando se trata de corriente impresa.

También es factible emplear barras más resistentes al ataque corrosivo, como ser barras de acero galvanizado, acero recubierto por pinturas o acero inoxidable. En estos casos no hay costos de mantenimiento, sin embargo hay que ser muy cuidadosos en el manipuleo de las barras galvanizadas o pintadas para evitar el deterioro de las

capas protectoras (de galvanizado en el primer caso y de pintura en el segundo). Con respecto al empleo de barras de acero inoxidable hay que destacar que el costo de este material es varias veces superior al del acero al carbono, por lo que su empleo en determinadas estructuras es ventajoso solo si se tiene en cuenta el ciclo económico completo de vida útil de la estructura, en el que se incluye no solo el costo de la construcción, sino además el de su posterior mantenimiento y las posibles reparaciones. Si bien el uso de este tipo de barras más resistentes a la corrosión está muy extendido en los Estados Unidos y en Europa con notable éxito, en nuestro país aún no se comercializan este tipo de armaduras.

■ CONSIDERACIONES FINALES

A lo largo del presente trabajo se ha mostrado que las construcciones de hormigón armado son susceptibles a sufrir deterioro de variada índole, siendo una de las más habituales, la corrosión de las armaduras de refuerzo. En la actualidad existen diversas técnicas que permiten establecer el estado de una estructura de hormigón armado desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras. Su aplicación es de fundamental importancia para determinar la necesidad de reparar estructuras afectadas por corrosión o de evitar que se incrementen los daños que pongan en riesgo la capacidad resistente de la estructura, su funcionalidad o su estética.

■ AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a los Magister Enzo D. Gómez y Juan I. Carricondo por haber cedido algunas de las fotos que ilustran el presente trabajo.

■ REFERENCIAS

- Andrade M.C. (Coordinadora) (1988) Manual inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- Andrade M.C., Alonso M.C. (2001) On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials* 15, 141-145.
- ASTM C876-04 (2004) Test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, West Conshohocken.
- Bentur A., Diamond S., Berke N.S. (1997) *Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice*, Taylor & Francis, London.
- Biczók I. (1981) *La corrosión del hormigón y su protección*, Ediciones Urmo, Bilbao.
- Broomfield J.P. (1997) *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*, E&FN SPON, London/New York.
- Burkart A.L., Duffó G.S., Castro P. (2014) Corrosion Monitoring for Integrity Assessment of Post-Tensioned Strands at Piedra del Aguila Spillway. *Hydropower and Dams International Journal* 6, 64 - 70.
- Duffó G.S., Farina S.B. (2009) Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials* 23, 2746 - 2751.
- Duffó G.S., Farina S.B. (2016) *La corrosión de estructuras de hormigón armado. Principios básicos, monitoreo y prevención*. Editorial Académica Española, Berlín.
- Fontana M. (1986) *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, Inc., 3rd Edition, New York.
- Galvele J.R., Duffó G.S. (2006) *Degradación de Materiales-Corrosión*. Editorial Baudino, Buenos Aires.
- Gani M (1997) *Cement and concrete*, Chapman and Hall, Londres.
- Grunau E. (1992) *Lesiones en el hormigón*. Biblioteca de Arquitectura y Construcción CEAC, Barcelona.
- Hewlett P.C. (Ed.) (1998) *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4th Edition, Arnold Publishers, Londres.
- Irassar E.F. (Ed.) (2001) *Durabilidad del hormigón estructural*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires.
- McCarter W.J.; Forde M.C., Whittington H.W. (1983) *Electrical-resistivity characteristics of air-entrained concrete*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 75, 23 - 127.
- Mehta P.K., Monteiro P.J.M. (2006) *Concrete. microstructure, properties and materials*, 3rd Edition, McGraw-Hill, Nueva York.
- Pedefferri P., Polder B., Bertolini L., Elsener B. (2004) *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*, Wiley-VCH, Weinheim.
- Rostam S. (Ed) (1992) *Durable concrete structure. Design guide*, Comité Euro-International du Beton, Thomas Telford, Lausanne.
- Taylor H.F.W. (1978) *La química de*

los cementos, Tomo 1, Ediciones Urmo, Bilbao.

Troconis de Rincón O., Romero de Carruyo A., Andrade M.C., Helene P., Diaz I. (2006) 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.

Tuuti K. (1982) Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, S-100 44, Stokholm.

Vázquez D.R., Duffó G.S. (2018) Monitoring Reinforcement Corrosion in Concretes for Nuclear Facilities, Material Performance, 57, 64-67.

