

Estructuras de Concreto Reforzado Afectadas por Mecanismos de Corrosión: Casos de Estudio

Reinforced Concrete Structures Under Corrosion: Case Studies

Guzmán Marcelo^{1,2}, Palazzo Gustavo^{1,2*}, Roldan Víctor^{1,3}, Calderón Francisco³

RESUMEN

La corrosión de la armadura de refuerzo en el concreto consiste en la oxidación destructiva del acero, y la misma ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica en la cual el concreto húmedo es el electrolito donde se genera una corriente eléctrica. Aunque en la mayoría de los ambientes el concreto reforzado es un material muy durable, en aquellos contaminados con cloruros, o cuando las edades exceden 50 años, se puede producir la corrosión de las armaduras, y con ello, la degradación del concreto. Este mecanismo de deterioro es uno de los mayores problemas que afectan a las estructuras de concreto reforzado, lo cual implica elevados costos para la reparación de las mismas. Por ello, el diagnóstico preliminar de esta patología resulta de suma importancia. En el presente trabajo de investigación, se estudian tres casos de estructuras de concreto reforzado afectadas por corrosión. En cada caso, las condiciones ambientales a las que estaban expuestas cada estructura fue distinta (rural, urbana e industrial). Para la evaluación y diagnóstico, fueron utilizadas diversas técnicas de ensayos tanto in-situ como en laboratorio. Esto permitió la interpretación de los resultados obtenidos, y con ello, un adecuado diagnóstico de la situación.

Recibido: septiembre 2018
Aceptado: enero 2019
Publicado: febrero 2019

Palabras Clave:

Corrosión, Concreto reforzado, barras de acero

Keywords:

Corrosion, Reinforced Concrete, Steel Bars

ABSTRACT

The corrosion of the reinforcement in the concrete consists of the destructive oxidation of steel. It occurs as a result of the creation of an electrochemical cell in which wet concrete is the electrolyte and an electric current is generated. Although reinforced concrete is a very durable material in most environments, it does not apply when the environment is contaminated with chlorides, or when its age exceeds 50 years. In these cases, corrosion of the reinforcement and degradation of the concrete are both possible. This corrosion mechanism is one of the main problems that affect reinforced concrete structures, and it implies high repairing costs. Therefore, an early detection of this pathology is extremely important. In this paper, three reinforced concrete structures affected by corrosion are studied. The environmental condition for each structure was different: rural, urban and industrial. This allowed the interpretation of the results and as a consequence an adequate diagnostic of the structures.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de las armaduras embebidas en concreto consiste en la oxidación destructiva del acero; la misma ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica en la cual el concreto húmedo es el electrolito en donde se genera una corriente eléctrica debido al flujo de iones en un medio acuoso.

El concreto confiere al acero una protección de doble naturaleza: por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido encerrado en los poros del concreto es un electrolito que puede formar un óxido protector (pasivación) de forma duradera.

*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: Palazzo Gustavo, gpalazzo@frm.utn.edu.ar

(1) Doctor en Ingeniería, (2) Ingeniero en Construcciones; gpalazzo@frm.utn.edu.ar

(1) Doctor en Ingeniería, (2) Ingeniero en Construcciones; (3) Ingeniero Civil, SOLIDUS ingenieros Consultores.

La corrosión de armaduras es un problema frecuente en las estructuras de concreto reforzado, éste fenómeno afecta la vida útil de las mismas, causando el deterioro de las estructuras y/o de sus componentes y como consecuencia fallas inesperadas.

Las principales causas que inician una corrosión activa en las barras de acero embebidas en concreto son la carbonatación y el ingreso de iones cloruro. De hecho las reglamentaciones actuales abordan los problemas de corrosión tratando de mitigar estas causas ya que tienen consecuencias económicas y sociales muy importantes, no sólo por la necesidad de destinar fondos para la reparación sino también que en muchas ocasiones se deben cerrar las instalaciones para los trabajos de reparación y rehabilitación, esto tiene mayor impacto en costosas estructuras de concreto.

Si bien, el concreto reforzado resulta ser un material muy durable en la mayoría de los ambientes. Es importante mencionar que en aquellos contaminados con cloruros o cuando las edades exceden 50 años, se puede producir la corrosión de la armadura y con ello la degradación del concreto.

A partir de un estudio realizado en Argentina por Di Maio et al, [1] sobre un total de 177 estructuras evaluadas, se indica que el porcentaje de estructuras afectadas por procesos de corrosión de sus armaduras alcanzó aproximadamente el 16 %.

De un análisis de 1512 casos de diagnóstico con diferentes patologías en el sur de Brasil, Dal Molin [2] determinó que la incidencia de la corrosión de armaduras representa el 40 % del total de los daños.

Esto muestra como los problemas de degradación de las estructuras de concreto reforzado asociados a la corrosión de la armadura resultan ser muy significativos, y frente a ello, los elevados costos que implica la reparación de estas estructuras afectadas.

En el presente trabajo de investigación, se estudian tres casos de estructuras de concreto reforzado afectadas por corrosión. En cada caso, las condiciones ambientales a las que estaba expuesta cada estructura fueron distintas (rural, urbana e industrial). Para la evaluación y diagnóstico fueron utilizadas diversas técnicas de ensayos tanto in-situ como en laboratorio. Esto permitió la interpretación de los resultados obtenidos, y con ello, un adecuado diagnóstico de la situación.

2. PROCESO DE CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO EN EL CONCRETO

El concreto le confiere a la barra de acero embebida, una doble protección. Por un lado, es una barrera física que la separa del medio ambiente y, por

otro lado, el líquido contenido en sus poros capilares, el cual presenta una elevada alcalinidad (pH ~ 12.5), permite formar una película pasiva sobre su superficie (capa de óxido muy adherente, compacta e invisible) [3]. Esta película pasiva impide la disolución del hierro, imposibilitando la corrosión de las armaduras, incluso, en presencia de humedad y oxígeno. Sin embargo, la película puede destruirse localmente o en toda la superficie de la barra debido a la disminución de la alcalinidad de la solución de poros del concreto de recubrimiento, ya sea por carbonatación o bien por una concentración elevada de cloruros. Frente a ello, las armaduras se encuentran en condiciones de iniciar el proceso corrosivo siempre y cuando exista humedad y oxígeno en cantidades suficientes.

El proceso electroquímico de corrosión en una barra de acero embebida en el concreto (Figura 1), implica la formación de una zona anódica y otra catódica. En el ánodo los iones ferrosos (Fe^{++}) se disuelven y los electrones se liberan (Ecuación 1). Estos electrones se desplazan hacia el cátodo a través de la barra donde forman hidroxilos (OH^-) con el agua que se encuentra en los poros del concreto y el oxígeno disponible (Ecuación 2).

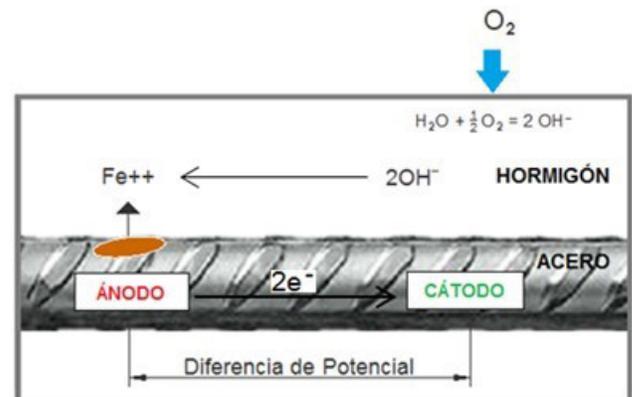
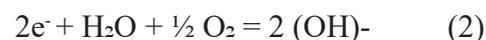


Figura 1. Proceso de corrosión en armaduras



Las Ecuaciones 1 y 2 muestran la reacción anódica y catódica respectivamente, y sólo son el primer paso en el proceso de producción de la corrosión. Se originan varias etapas más para que se forme “óxido”, y

su aparición puede expresarse de varias maneras. Una forma típica es cuando el hidróxido ferroso (ecuación 3) se convierte en el hidróxido férrico (ecuación 4) y luego se convierte en el óxido férrico hidratado u óxido (ecuación 5), comúnmente llamado herrumbre.



Cuando ocurre la corrosión, los productos de la oxidación incrementan el volumen con respecto a la barra de acero en su condición inicial no oxidada, dando lugar a esfuerzos internos de tracción dentro del concreto que no son capaces de ser resistidos, ocasionando así la fisuración y desprendimiento del mismo (Figura 2).

3. MECANISMOS DE CORROSIÓN

Para que el proceso de corrosión pueda iniciarse, debe necesariamente producirse la rotura de la película

pasiva formada sobre la barra, lo cual se vincula con la pérdida de alcalinidad del concreto de recubrimiento ya sea por carbonatación o bien por la presencia de elevadas concentraciones de cloruros en el concreto en contacto con las armaduras.

Reducción de la alcalinidad por carbonatación

El hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formado durante la hidratación del cemento y disuelto en la red de poros capilares del concreto, junto con los álcalis del cemento y de los agregados, otorga al líquido de poros un pH comprendido entre 12.5 y 13.5.

El dióxido de carbono del aire, CO_2 , y que ingresa a la masa de concreto a través de sus poros, y en presencia de agua, transforman al hidróxido de calcio en carbonato de calcio, CaCO_3 , originando con ello una reducción en los niveles de pH del concreto, alcanzado valores de 9 e incluso menores.

Para que se produzca la reacción es necesaria la presencia de agua, siendo la situación preferencial una humedad relativa comprendida entre el 50 y el 60 %. Cuando el concreto tiene sus poros saturados, el CO_2 no puede ingresar y consecuentemente no se origina la carbonatación, situación que también ocurre cuando dicha red de poros se encuentra totalmente seca.

Experimentalmente se ha determinado que el espesor carbonatado es función directa de las características intrínsecas del concreto de recubrimiento y del



Figura 2. Fisuración y desprendimiento del concreto por corrosión del acero

tiempo de exposición. Estos parámetros se vinculan mediante la siguiente Ecuación:

$$d_c = K_c * t^{1/2} \quad (6)$$

donde d_c es la profundidad que alcanza el frente carbonatado, t el tiempo de exposición y K_c la constante que engloba las variables del concreto y del medio ambiente.

Experimentalmente el sector carbonatado del concreto se determina mediante la técnica colorimétrica de teñido con fenolftaleína diluida al 1 % en una solución de alcohol etílico. El concreto no carbonatado adopta una tonalidad de color violeta-rojizo, en tanto que el carbonatado no cambia su tonalidad original (Figura 3).



Figura 3. Determinación del frente de carbonatación mediante fenolftaleína

Acción de cloruros

El ataque por cloruros al concreto puede provenir de dos fuentes principales, en la primera los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla del concreto (p.e., áridos contaminados, agua de mar o agua contaminada, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda los cloruros ingresan desde el exterior. Esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, la exposición a los ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al concreto, entre otros [4].

Los iones cloro penetran el concreto a través de la solución en la red de poros, y se distribuyen como cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros corresponden a aquellos que se enlazan químicamente al reaccionar con el aluminato tricálcico (C_3A) presente en la pasta cementicia, formando así cloroaluminatos cálcicos los cuales quedan fijados y no resultan ser una amenaza para el proceso de corrosión del acero.

En los hormigones en contacto con atmósferas, aguas y/o suelos contaminados con cloro, el ingreso de estos se da principalmente por el mecanismo de transporte de difusión. En este proceso, los Cl se trasladan a través de los poros capilares del concreto húmedo con movimientos aleatorios en el sentido de las concentraciones decrecientes. Los iones Cl que se difunden en el concreto endurecido permanecen no combinados (cloruros libres), aunque una parte muy pequeña de estos puede fijarse al reaccionar con el hidróxido de calcio.

Al igual que en la carbonatación, puede plantearse que la velocidad de avance de los cloruros es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo:

$$d_{cl} = K_{cl} * t^{1/2} \quad (7)$$



Figura 4. Determinación de la concentración del ion Cl mediante RCT

donde d_{cl} es la profundidad alcanzada por los cloruros, t el tiempo de exposición y K_{cl} la constante que depende del concreto y del medio ambiente. Sin embargo, debe plantearse que el cálculo riguroso de la profundidad de ingreso de cloruros es más complejo y para su solución se emplea la segunda Ley de Fick.

La concentración del ion Cl presente en el concreto, puede ser determinado in-situ mediante la técnica de ensayo del RCT (Rapid Cloro Test) (Figura 4).

4. INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA SOBRE LA CORROSIÓN

El concreto reforzado es un material que al igual que otros interacciona con la atmósfera circundante modificando sus características originales. El tipo, intensidad y momento en que se desarrolla la interacción atmósfera-estructura, depende de las características del material puesto en obra, la tipología estructural y la agresividad atmosférica.

Las propiedades de las barras de acero son características intrínsecas del material, mientras que la resistencia a la corrosión depende también de la interrelación con el medio que la rodea. Por lo tanto un material puede ser resistente a la corrosión en una atmósfera y no serlo para otra.

Las atmósferas en las cuales se emplazan las estructuras pueden ser clasificadas en cuatro tipos básicos: rurales, urbanas, marinas e industriales [3]. La clasificación de las atmósferas se basa generalmente en la velocidad de deposición del dióxido de azufre y de los cloruros.

La temperatura modifica la velocidad de reacción, duplicándose por cada $10^{\circ}C$ que se aumenta la temperatura ambiente. Pero también, esta influencia de la temperatura sobre el proceso corrosivo depende de la humedad relativa ambiente. En ambientes secos, un aumento de la temperatura hace disminuir el electrolito y se dificulta el proceso de corrosión, mientras que en ambientes húmedos, prevalece el efecto acelerante antes indicado.

5. NIVELES DE DAÑO DE ACUERDO A LA EVOLUCIÓN DE LA CORROSIÓN

Siendo la corrosión el principal mecanismo de deterioro o degradación del concreto, se utiliza para la clasificación del nivel de daño la propuesta por el Comité Eurointernacional du Béton [5] el cual califica a los daños de la siguiente forma:

- Nivel A: signos iniciales de corrosión (manchas de óxido)
- Nivel B: manchas de óxido y fisuras de espesor $< 0,4$ mm
- Nivel C: desprendimientos del recubrimiento y fisuras de mayor espesor
- Nivel D: reducción de la sección de las barras
- Nivel E: flexión y pandeo de elementos estructurales con reducción de la sección de las barras mayor al 10%

6. CASOS DE ESTUDIO

Estructura de soporte de tanque elevado: atmósfera rural

El presente caso evaluado (Figura 5), corresponde al de una estructura de concreto reforzado que sirve de sustento a un tanque elevado de igual material, y que es utilizado para almacenamiento de agua. Dicho sistema estructural, está constituido por seis columnas las cuales se encuentran arriostradas a determinadas alturas por vigas.



Figura 5. Estructura de concreto reforzado para sostenimiento de tanque elevado

El relevamiento geométrico llevado a cabo permitió establecer que el tanque presenta una capacidad aproximada de 30 m^3 , con un diámetro de la cuba de 4.45 m, una altura de 2.70 m, y un espesor de las paredes de 0.20 m. La altura total del sistema estructural de sostén, es de 11.6 m, presentando tanto las columnas como las vigas, una sección transversal de $0.20 \times 0.20 \text{ m}$. La antigüedad de la construcción de acuerdo a los datos recabados es de aproximadamente 50 años.

El sistema estructural se encuentra emplazado al exterior, en una zona de clima árido donde la temperatura media anual es de aproximadamente 15° , registrando una máxima absoluta de 43° y una mínima absoluta de -8° . En verano la temperatura media es de 24° y en invierno es de 6° . En cuanto a las precipitaciones, estas alcanzan los 192 mm anuales.

Si bien el Reglamento CIRSOC 2016 es de aplicación a estructuras de concreto por construir, a modo de referencia y fundamentado en el mismo, por las condiciones climáticas antes indicadas y de acuerdo con las características de los elementos estructurales, se establece una clase de exposición designada como A2, donde el tipo de proceso de degradación a desarrollarse corresponde al de corrosión de la armadura por carbonatación.

Para estas condiciones de agresividad y para garantizar una vida útil de 50 años, entre otros requisitos de durabilidad, la resistencia característica a compresión del concreto debiera ser de 25 MPa, con un recubrimiento mínimo de las armaduras de 30 mm.

Luego del relevamiento geométrico, se procedió a la evaluación del estado de conservación y descripción de patologías observables. En general se observó un importante avance de procesos corrosivos tanto en las armaduras vigas como de columnas (Figura 6), situación que motivo la degradación del concreto. Dicho mecanismo de degradación ha ocasionado en algunos casos fisuras en el concreto, así como agrietamiento en algunas zonas, llegando a producirse el desprendimiento del concreto y del revoque.

Este mecanismo de degradación presente en el concreto, se debe a las condiciones de exposición a las cuales estuvieron sujetos los elementos estructurales a lo largo del tiempo. Dichas condiciones han estado asociadas a la despasivación de la armadura, a elevados contenidos de humedad en el concreto, y a la penetración de oxígeno en el mismo, permitiendo así el desarrollo del mecanismo indicado.

Al respecto, el medio ambiente ha aportado las condiciones necesarias para la despasivación de la



Figura 6. Proceso corrosivo en armaduras. Degradación del concreto

armadura (carbonatación), y a para la penetración de oxígeno, en tanto que las filtraciones de agua propias del tanque, han constituido el aporte de humedad necesario para el desarrollo del proceso electroquímico de corrosión.

A efecto de caracterizar el concreto constituyente del sistema estructural, se procedió a la realización de ensayos no destructivos y semi-destructivos. Estos ensayos y su respectiva correlación, permitieron inferir la calidad del concreto en términos de resistencia.

En cuanto a la caracterización de la armadura, se procedió a la inspección visual de la armadura expuesta, así como, a la realización de sondeos en aquellos sectores no visibles a simple vista. Al mismo tiempo, se procedió a la evaluación del nivel de avance del frente de carbonatación en el concreto a efectos de establecer si la armadura se encontraba en condición despasivada.

En primer lugar se procedió a inferir la resistencia a tracción superficial del concreto, utilizando para ello

el equipo de Pull-Off ELCOMETER 106 Scale 6 (Figura 7). Se siguió el protocolo de ensayo establecido en la Norma ASTM C 15837.

De los ensayos realizados tanto en columnas como en vigas, se pudo inferir una resistencia a la tracción del concreto del orden de 1.0 MPa.

Por otra parte, y con el objetivo de inferir la resistencia superficial a compresión del concreto, se procedió a la realización de ensayos de esclerometría, utilizando para ello el equipo ELCOMETER 181 (Figura 8). Este ensayo permite inferir la calidad del concreto en términos de resistencia a la compresión. Se siguió el protocolo de ensayo establecido en la Norma ASTM C 8058.

De los ensayos realizados, se obtuvo un índice esclerométrico medio del orden de 30. Esto permitió inferir que la resistencia a compresión del concreto, correlacionada a la resistencia correspondiente a probetas cilíndricas y teniendo en cuenta el avance del



Figura 7. Ensayo de Pull-Off

frente de carbonatación, resultó ser de aproximadamente 17 MPa. Este frente carbonatado fue determinado mediante el ensayo con la técnica colorimétrica de teñido con fenolftaleína (Figura 9).

Los resultados obtenidos indicaron un avance del frente de carbonatación de aproximadamente 15 mm, medido desde la superficie del sustrato de concreto (habiendo retirado revoque) hacia el interior del mismo. En cuanto a la ubicación de la armadura con respecto

a la misma referencia antes indicada, en los casos de mayor compromiso esta resultó de aproximadamente unos 10 mm, por lo que el frente de carbonatación ya había alcanzado a la armadura, y en consecuencia despasivandola. Otros sectores en cambio, presentaron recubrimientos de la armadura del orden de los 20 mm, por lo que aún mantenían su pasivación.

Aplicando la ecuación 6 y de acuerdo a los parámetros obtenidos en la evaluación, K_c resulta ser de



Figura 8. Ensayo de esclerometría



Figura 9. Ensayo de carbonatación



Figura 10. Puente vial evaluado

2.12 mm/año^{1/2}. Por lo tanto de no aplicar medidas que morigeren la velocidad de avance del frente de carbonatación, el tiempo t que deberá transcurrir desde la fecha de evaluación hasta que las armaduras actualmente pasivadas se despasiven, será de aproximadamente unos 6 años.

De la evaluación llevada a cabo, se puede establecer como diagnóstico que en varios sectores de los elementos estructurales hay un avanzado proceso de corrosión en las armaduras, motivado por la conjunción de varias razones, tales como las condiciones ambientales, la baja calidad del concreto, el humedecimiento de las superficies por filtraciones, y por la falta de mantenimiento preventivo. Por otra parte en aquellos sectores en donde aún no se manifiesta degradación, de no intervenir en el corto plazo, los mismos se verán afectados en el transcurso de unos pocos años.

Ante ello, el nivel de daño asignado al sistema estructural corresponde al del Nivel C. Por lo tanto, el sistema estructural evaluado requiere de una inmediata intervención a fin de restituir su capacidad estructural, y con ello, evitar riesgo en la estabilidad estructural del tanque elevado.

Puente vial: atmósfera urbana

El siguiente caso evaluado (Figura 10), corresponde al de un puente vial de tres vanos. Los tableros de concreto reforzado se apoyan en un sistema estructural constituido por catorce columnas de igual material.

De los antecedentes recopilados, se pudo establecer que el puente en estudio fue construido en el año 1960, presentando a la fecha de la evaluación una edad aproximada de 57 años desde su puesta en servicio. El

puente se encuentra emplazado en una zona de clima húmedo y templado, con una humedad relativa ambiente elevada y con temperaturas medias que oscilan entre los 10° y los 23°. Se registran precipitaciones medias anuales superiores a los 1000 mm.

De acuerdo al Reglamento CIRSOC 2016, ante las condiciones climáticas indicadas y de acuerdo con las características de los elementos estructurales, se establece una clase de exposición designada como A3 donde el tipo de proceso de degradación a desarrollarse corresponde al de corrosión de la armadura por carbonatación. Para estas condiciones de agresividad, entre otros requisitos de durabilidad, la resistencia característica a compresión del concreto debiera ser de 30 MPa, con un recubrimiento mínimo de las armaduras de 45 mm.

Como parte inicial de la evaluación, se procedió en sectores seleccionados a la detección de las armaduras, utilizando para ello el equipo PROCEQ Profometer 650 AI (Figura 11). Una vez localizada las armaduras tanto en columnas como en tableros, en algunos de estas localizaciones se hicieron sondeos mecánicos a fin de evaluar visualmente las características y estado de las armaduras (Figura 12).

En algunos sectores de la parte inferior del tablero y dadas las condiciones de degradación a las cuales se encontraba sujeto el concreto, las armaduras se encontraba a la vista debido al desprendimiento de su recubrimiento (Figura 13).

A fin de inferir la resistencia a compresión del concreto, se utilizaron diversas técnicas de ensayos no destructivos tales como esclerometría y ultrasonido, y también ensayos destructivos a partir de la extracción



Figura 11. Detección de armaduras en columna

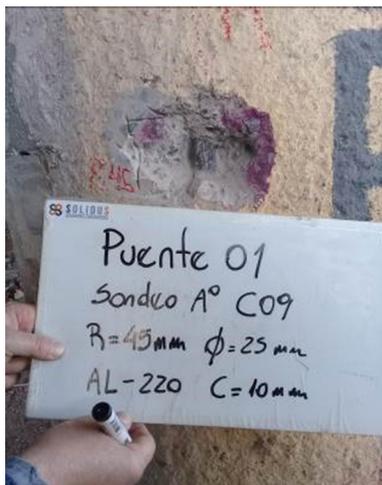


Figura 12. Sondeo mecánico de armaduras en columna y en tablero

de testigos de concreto. Para los ensayos de ultrasonido se utilizó el PROCEQ Pundit PL-2 siguiendo el protocolo de ensayo establecido en la Norma Americana ASTM C 5979 (Figura 14).

Para la valoración de la resistencia a tracción superficial del concreto, se llevaron a cabo ensayos de Pull-Off, aprovechando en la extracción de los “dollys” a realizar ensayos de carbonatación (Figura 15).

La determinación in-situ del potencial de corrosión de las armaduras, fue llevado a cabo mediante el dispositivo PROCEQ Profometer 650 AI (Figura 16). En tanto que en laboratorio y sobre testigos de concreto, se evaluaron parámetros de durabilidad tales como resistividad eléctrica [10] (PROCEQ Canin) y velocidad de succión capilar [11], mientras que también parámetros asociados a la calidad del concreto

tales como velocidad del pulso de onda y resistencia a compresión (Figura 17).

A partir de la interpretación de los resultados obtenidos en los diversos ensayos llevados a cabo para el caso analizado, se pudo diagnosticar que las columnas presentan un adecuado nivel de conservación, no presentando al momento de la evaluación un mecanismo de degradación cuya evolución y/o velocidad haya puesto en compromiso el monolitismo primario. Se pudo establecer que los hormigones presentan una adecuada resistencia y una muy buena homogeneidad (de acuerdo a los ensayos de resistencia mecánica y de ultrasonido). Por otra parte, los ensayos de succión capilar mostraron una baja velocidad de penetración del agua, indicando ello también una baja permeabilidad del concreto. De los ensayos de resistividad eléctrica llevados a cabo, se observó que el concreto presenta



Figura 13. Degradación del concreto por corrosión de armaduras



Figura 14. Determinación de la velocidad del pulso de onda (ensayo de ultrasonido)



Figura 15. Extracción de dollys para ensayo de tracción. Ensayo de carbonatación



Figura 16. Evaluación del potencial de corrosión en armaduras de tablero



Figura 17. Ensayos en testigos de concreto extraídos

características propicias para el desarrollo de un proceso corrosivo de la armadura, siempre y cuando se den condiciones de penetración de humedad y oxígeno al concreto. Aunque cabe destacar que del avance del frente de carbonatación medido, así como del espesor de recubrimiento de las armaduras, estas se

encontrarían pasivadas, dando lugar a un mecanismo de protección frente a la corrosión.

En cuanto a los tableros, se presentan en los mismos anchos de fisuras importantes en gran parte de su superficie. Se observó un matriz superficial no cerrado del concreto, debido a su rugosidad, la cual favorece

el ingreso desde el exterior de agentes agresivos. En cuanto a la homogeneidad del concreto, la misma es inadecuada debido a la presencia generalizada de fisuras. Las armaduras presentaron distintos niveles de recubrimiento, desde armaduras expuestas naturalmente por desprendimiento del recubrimiento, hasta recubrimientos aún existentes del orden de los 40 mm. En general, las armaduras ubicadas en la parte inferior del tablero presentaban una corrosión casi generalizada, dando lugar a este mecanismo de degradación a distintos niveles de daño observables visualmente. En algunas de las barras de acero y en algunos sectores, se observó una delaminación significativa de la armadura, dando lugar a una reducción importante o pérdida casi total de la sección de la barra. Esto último ha motivado el desprendimiento del concreto de recubrimiento. Ante ello, el nivel de daño asignado a los tableros corresponde al del Nivel D. Por lo tanto, los tableros evaluados requieren de una inmediata intervención a fin de restituir su capacidad estructural, y con ello, evitar riesgo en la estabilidad de los mismos ante las cargas de servicio que lo solicitan.

Sistema de fundación y losa de entrepiso de nave: atmósfera industrial

El último caso evaluado (Figura 18), corresponde al de las bases y pedestales, así como también, de una losa de concreto reforzado de una nave industrial. En dicha nave se empaqueta un producto final obtenido de un proceso industrial, que da lugar a una elevada concentración de cloruros, los cuales son propios del producto procesado.



Figura 18. Bases y losa de concreto reforzado evaluadas en el sector industrial

De los antecedentes recopilados, se pudo establecer que la nave industrial en estudio fue construida en el año 1997, presentando a la fecha de la evaluación

una edad aproximada de 20 años desde su puesta en servicio. En el interior de dicha construcción, y debido a las condiciones propias del proceso industrial, se presentan húmeda y temperatura ambiente elevadas. Los registros de humedad ambiente resultaron ser del orden del 56%, en tanto que la temperatura, del orden de los 24°.

De acuerdo al Reglamento CIRSOC 2016, ante las condiciones ambientales indicadas y de acuerdo al tipo de proceso industrial (elevadas concentraciones de Cl), la clase de exposición corresponde a CL donde el tipo de proceso de degradación a desarrollarse es el de corrosión de la armadura por penetración de cloruros. Para estas condiciones de agresividad, entre otros requisitos de durabilidad, la resistencia característica a compresión del concreto debiera ser de 35 MPa, con una relación a/c menor o igual a 0.45, con una velocidad de succión capilar menor o igual a los 4 g/m² s^{1/2}, y con un recubrimiento mínimo de las armaduras de 45 mm.

Las estructuras a evaluar correspondieron a bases y pedestales de concreto reforzado que sustentan a columnas metálicas (Figura 19), así como también, a una losa de entrepiso de concreto reforzado la cual sustenta una máquina centrífuga (Figura 20).

Se procedió in-situ a establecer los espesores de recubrimiento de las armaduras de bases y pedestales (Figura 21), así como también, de las armaduras de la losa de entrepiso. Estas determinaciones fueron llevadas a cabo utilizando detector de armadura y sondeos mecánicos. En general los recubrimientos de las armaduras de bases y pedestales estuvieron en el orden de los 70 mm, en tanto que las armaduras de la losa presentaron un recubrimiento del orden de los 20 mm.

De los sondeos mecánicos llevados a cabo (Figuras 22) y de los testigos extraídos, se pudo establecer que la armadura de las bases no presentaba corrosión; en cuanto a los pedestales, la armadura por encima del nivel de contrapiso tampoco presentaba corrosión, sí en cambio presentaba un cierto nivel de corrosión la armadura ubicada por debajo de dicho contrapiso. En tanto que las armaduras de la losa presentaba un avanzado proceso de corrosión.

Por otra parte, mediante el ensayo de RCT (Figura 23) se procedió a la determinación in-situ de la concentración de ion cloruros totales presentes en el concreto mediante extracción ácida y posterior medición del potencial eléctrico.

De las evaluaciones llevadas a cabo, se pudo inferir que el concreto de las bases presentaba una adecuada calidad en términos de homogeneidad y resistencia. En cuanto a los pedestales, por debajo del contrapiso presentaban fisuras en el interior de la masa



Figura 19

a) Base de concreto reforzado.



b) Pedestal de columna metálica



Figura 20. Losa de entpiso de concreto reforzado. Apoyo de centrifugadora



Figura 21. Detección de armadura en pedestal



a) Pedestal



b) Losa de entpiso

Figura 22. Sondeos de armadura



Figura 23. Preparación de muestra para determinación de ion Cl mediante RCT

de concreto obedeciendo las mismas a un incipiente estado de corrosión de sus armaduras. Los pedestales por encima del contrapiso, presentaban fisuras en el concreto debidas al proceso de corrosión que afecta a las pletinas de vinculación entre la columna metálica y el pedestal. Ante ello, los pedestales presentan un nivel de daño entre tipo B y C, requiriendo su pronta intervención.

En cuanto a la losa de entpiso, esta presentaba un mal estado de conservación producto del avanzado estado de corrosión de sus armaduras, lo cual ha ocasionado fisuras, desprendimiento y en algunos casos, la pérdida material del concreto de recubrimiento. Por otra parte, este estado de corrosión ha motivado pérdida en la sección original de la armadura de refuerzo. Frente a ello, la losa presenta un nivel de daño del tipo E, donde su recuperación mediante alguna técnica de intervención no resultaría viable, proponiéndose entonces su demolición y posterior restitución.

7. CONCLUSIONES

Como se sabe, la corrosión es el mecanismo de degradación que con mayor frecuencia se presenta en las estructuras de concreto reforzado. Si bien la velocidad con la cual se desarrolla dicho proceso está condicionada por la agresividad del medio ambiente al cual se encuentra expuesta la estructura, el mecanismo de corrosión se presenta independiente de las atmósferas (rural, urbana, industrial).

La determinación del estado de conservación, y con ello del nivel de daño de una estructura de concreto reforzado, requiere de la valoración mediante la utilización de diversas técnicas de ensayos disponibles, tanto in-situ como en laboratorio.

Por ello, la evaluación y el diagnóstico constituyen el paso más importante, puesto que con su definición vendrá la decisión acerca del procedimiento de rehabilitación. Acertar en el diagnóstico representa así el éxito de la inversión, y por supuesto, en la solución de las patologías causantes del problema.

REFERENCIAS

[1] Di Maio A., Sota J., Traversa L., 1999. "Patología de estructuras de hormigón. Análisis de algunos casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años", III Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y V Congreso Iberoamericano de Control de Calidad, La Habana, Cuba.

[2] Dal Molin D., 1988. "Fisuras en estructuras de concreto armado: Análisis das manifestacoes típicas e levantamento de casos ocurridos no Estado do Rio Grande do Sul", Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

[3] Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2001. "Durabilidad del Hormigón Estructural", AATH, La Plata, Bs. As., Argentina.

[4] Aguirre A. y Gutiérrez R., 2013. "Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas", Materiales de Construcción, Vol. 63. 309, 7-38.

[5] Comité Eurointernational du Béton (CEB). Bulletin N° 162.

[6] CIRSOC 201, 2005. "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", INTI CIRSOC, Bs. As., Argentina.

[7] ASTM C1583 / C1583M-13, 2013. "Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)", ASTM International.

[8] ASTM C805 / C805M-13a, 2013. "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA.

[9] ASTM C597-16, 2016. “Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”, ASTM International.

[10] UNE-83988-2, 2008. “Durabilidad del hormigón. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas”, Madrid, España.

[11] IRAM 1871, 2004. “Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido”. IRAM.