

EVALUACIÓN DEL AVANCE DE LA CORROSIÓN DE REFUERZOS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

A. Vico, W. Morris, and M. Vazquez

División Corrosión, INTEMA
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata
Juan B. Justo 4302 - B7608FDQ Mar del Plata - Argentina
e-mail mvazquez@fi.mdp.edu.ar

Se presenta la metodología de diagnóstico empleada para evaluar el estado de deterioro existente en un edificio de más de veinticinco años de antigüedad ubicado en el centro de la ciudad de Mar del Plata. La estructura del hormigón armado del edificio presentaba, tanto en los subsuelos como en las plantas, problemas de corrosión de armaduras causados, en principio, por la suma de distintos factores tales como, defectos constructivos (escaso o inexistente recubrimiento de hormigón), filtraciones y acumulación de agua y empleo de materiales y dosificaciones de mezcla inapropiados. Se describen los resultados de los ensayos no destructivos realizados en la obra y en el laboratorio y se los analiza a fin de establecer las causas que provocan el deterioro y de determinar la extensión y grado de avance de éste.

This paper presents the diagnosis procedure followed to determine the degree of damage of a 25 years old reinforced concrete building located in downtown Mar del Plata city. The building presented several structural components affected by severe reinforcing steel bars (rebar) corrosion problems. In most cases, these problems were associated to several factors as construction defects (lack of concrete cover,) water leaks and inappropriate selection of materials and mix designs. The nondestructive field and laboratory tests performed are described. The results of the survey are used to determine the extension and degree of damage of each structural component.

I. FACTORES QUE CAUSAN LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.

La corrosión en el hormigón armado es un problema que no solo afecta la integridad estructural de edificios, dado que causa agrietamientos en el hormigón y reducción de espesor en las armaduras, sino que también compromete la seguridad de las personas que lo habitan y de terceros. Asimismo, la evidencia de problemas de corrosión (manchas de óxido, agrietamientos y desprendimiento de material) provoca la desvalorización del inmueble debido a su deterioro estético y funcional. El grado de compromiso estructural o de seguridad alcanzado en estos casos, se establece efectuando un diagnóstico en profundidad de la estructura.

En condiciones normales, el hormigón provee de un ambiente protector al acero de refuerzo ya que su elevada alcalinidad ($\text{pH} > 12.5$) hace que el acero se encuentre en un estado denominado *pasivo*, siendo su velocidad de corrosión despreciable. Sin embargo la presencia de agentes agresivos (cloruros, sulfatos y dióxido de carbono (CO_2)) en la superficie de las armaduras puede causar la pérdida de pasividad del acero y crear condiciones propicias para el inicio de la corrosión de las armaduras.

Para poder caracterizar el tipo de deterioro que sufre una estructura de hormigón armado afectada por la corrosión del acero de refuerzo y establecer la agresividad de este ataque es necesario identificar el factor desencadenante de la corrosión. Esencialmente

son dos las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la película pasivante del acero e iniciar la corrosión de las armaduras. Estas son la presencia de iones cloruro y la carbonatación.

I.a. Corrosión iniciada por iones cloruro

Es causada por la presencia en la superficie del acero de una concentración de iones cloruro superior a la *concentración crítica*. Los iones cloruro son los principales causantes de la corrosión de las armaduras en estructuras expuestas al ambiente marino y en estructuras construidas con hormigones contaminados. En el primer caso los iones cloruro pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros del hormigón. En el segundo, se incorporan al hormigón como contaminante de alguno de los componentes de la mezcla (agregados fino o grueso, agua, aditivos, etc.).

I.b. Corrosión iniciada por carbonatación

La carbonatación es el resultado de la reacción química que ocurre entre el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera y ciertos productos de hidratación del cemento disueltos en la solución de los poros del hormigón. Como resultado, el pH del hormigón carbonatado se reduce a valores menores que 9. Una vez que el *frente carbonatado* alcanza la armadura comienza la disolución de la película pasiva que protege el acero de la corrosión.

I.c. Otros factores que influyen en la corrosión de las armaduras

La humedad del hormigón juega un papel importante en la corrosión de las armaduras ya que favorece la penetración y disolución de los agentes agresivos y proporciona el vehículo para que la corrosión avance. Por otro lado, el recubrimiento de hormigón sobre la armadura provee una barrera física contra la penetración de agentes agresivos desde el medio ambiente exterior. Su eficiencia depende fundamentalmente de dos factores:

El espesor del recubrimiento (ER): Se recomienda para ambiente marino emplear un espesor de recubrimiento mínimo de 2.5 cm.

El diseño de mezcla: Bajas relaciones agua-cemento y altos contenidos de cemento garantizan un hormigón de buena calidad.

II. TÉCNICAS Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN.

La evaluación del grado de deterioro en los componentes estructurales de hormigón armado, afectados por la corrosión se realizó mediante una inspección minuciosa, que consistió en la caracterización de diferentes parámetros, utilizando los métodos no destructivos que se describen a continuación.

II.a. Detección de la delaminación del recubrimiento de hormigón

Los productos de corrosión de la armadura ocupan un volumen considerablemente superior al del acero original. Esto causa tensiones de tracción en el interior del hormigón que originan agrietamientos y delaminación del recubrimiento de hormigón. Inicialmente este tipo de patología no se observa a simple vista por lo que las zonas afectadas se detectan golpeando la superficie del hormigón para identificar las áreas con sonido “hueco”.

II.b. Localización de la armadura y verificación de la continuidad eléctrica.

La localización de la armadura se realiza mediante un detector electromagnético denominado *pacómetro*. Este equipo permite detectar la posición de los refuerzos ubicados a menos de 100 mm de la superficie y estimar el espesor de recubrimiento de hormigón. La verificación de continuidad eléctrica entre distintos refuerzos de acero de un componente estructural, permite determinar la existencia de óxido aislante entre los refuerzos. La verificación implica, dejar parte de la armadura expuesta y limpia, y constituye un paso previo a la medición de potenciales de corrosión, ya que provee los puntos de contacto necesarios para efectuar dichas mediciones. Esta verificación se efectúa conectando un multímetro entre los puntos de contacto.

II.c. Extracción de testigos de hormigón.

La extracción de testigos se realizó empleando una máquina perforadora que emplea una broca de diamante refrigerada con agua. Los testigos extraídos tienen un diámetro de 50 mm y su largo es variable. En la gran mayoría de los casos los testigos fueron extraídos de manera de dejar la armadura parcialmente expuesta para posibilitar la ejecución de ensayos electroquímicos. Los testigos se usan para realizar estudios de laboratorio.

II.d. Determinación del contenido de cloruros en el hormigón

El contenido de iones cloruro en el hormigón se determina mediante el análisis químico de muestras de hormigón extraídas de la estructura. El método de evaluación empleado es el recomendado en el procedimiento ASTM 1152 para determinación de cloruros totales (solubles en ácido).

Nivel crítico de concentración de cloruro (C_C):

La corrosión de la armadura se inicia una vez que la concentración de cloruros alcanza un *nivel crítico* en la superficie del acero. El valor de C_C generalmente adoptado es 0.4% (en peso) respecto al contenido de cemento en el hormigón.

II.e. Determinación del espesor de la capa carbonatada

La profundidad del frente carbonatado (x_c) fue medida en distintos sectores de la estructura en los orificios realizados para la extracción de testigos. La medición se efectuó mediante la pulverización de una solución indicadora de pH sobre la superficie del hormigón recientemente expuesta. El indicador de pH empleado fue una solución de fenolftaleína 1% p/v en alcohol etílico. Esta solución se caracteriza por dejar incoloro el hormigón que se encuentra carbonatado (pH menor que 9.5, resultante de la acidificación producida por el CO₂ ambiental).

II.f. Determinación de la reducción del diámetro de la armadura

La reducción de la sección transversal de la armadura se determinó tomando mediciones del diámetro del refuerzo en los sectores puntuales de la armadura que fueron expuestos y limpiados. La disminución porcentual de la sección de las armaduras se estima en base al diámetro inicial y final del refuerzo.

II.g. Determinación de la resistividad eléctrica del hormigón.

La resistividad eléctrica del hormigón (r) es un parámetro que depende fundamentalmente del contenido de humedad y de los electrolitos presentes en el hormigón (cloruros, sulfatos, etc.), así como de la

estructura y composición de los poros del hormigón. Las mediciones de r fueron efectuadas empleando el método conocido como “técnica de Wenner” o “de 4 puntas”. Para ello se empleó un dispositivo de diseño propio, conectado a un medidor de resistencia tipo Nilsson modelo 400.

La evaluación de la agresividad del hormigón a partir de estas lecturas se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2. AGRESIVIDAD DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (ρ).

Rango de r ($k\Omega\text{cm}$)	Agresividad del hormigón
> 200	Bajo
20 a 200	Moderado
< 20	Alto

II.h. Determinación de la porosidad del hormigón.

El porcentaje de poros fue determinado empleando probetas cilíndricas sin barras según se especifica en la norma ASTM C-642 “Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption and Voids in Hardened Concrete”. El procedimiento consiste en obtener el peso de muestras de hormigón en tres condiciones diferentes: muestra secada a 105°C en estufa hasta peso constante (P_A), muestra saturada de agua con superficie seca (P_B), peso de la muestra inmersa en agua (P_C). El porcentaje de poros ($P\%$) en el hormigón se determina como:

$$P\% = \frac{P_B - P_A}{P_B - P_C} \times 100$$

El criterio de evaluación establece que si $\%P < 10$ la calidad del hormigón es alta, entre 10 y 15 es buena y finalmente, si es > 15 la calidad es baja.

II.i. Medición del Potencial de Corrosión (E_{CORR})

El potencial electroquímico de corrosión (E_{CORR}) del acero en el hormigón es un parámetro que indica el estado de avance de la corrosión de la armadura (pasivo o activo). La medición de E_{CORR} se realizó empleando un electrodo de referencia estándar de Cobre/Sulfato de Cobre (Cu/CuSO_4) saturado (CSE), conectado a un multímetro de alta impedancia de entrada. Los valores de E_{CORR} fueron interpretados según se especifica en la norma ASTM C-876. En la Tabla 1 se presentan los intervalos de potencial que definen distintos estados de corrosión para acero en hormigón. Estos valores permiten establecer si la armadura se encuentra en estado *pasivo* (velocidad de

corrosión despreciable) o en estado activo (velocidad de corrosión considerable).

TABLA 1. RANGOS DE POTENCIAL DE CORROSIÓN PARA ACERO EN HORMIGÓN.

E_{CORR} vs. CSE	Riesgo por corrosión	Tipo de corrosión
> -200	Bajo	Acero en estado pasivo
-200 a -300	Moderado	Transición activo-pasiva
< -300	Alto	Corrosión activa

II.j. Velocidad de corrosión de la armadura.

La medición de velocidad de corrosión (VC) de la armadura permite predecir su velocidad de deterioro en términos de la disminución esperada para su sección transversal.

La Tabla 3 presenta la clasificación de VC propuesta por la Red Iberoamericana DURAR (Durabilidad de la Armadura), donde se evalúa el riesgo de daño de las estructuras de hormigón armado por corrosión en función de algunas características del hormigón y algunos de los agentes agresivos que causan la corrosión del acero.

Las mediciones de VC fueron efectuadas mediante ensayos in-situ de resistencia a la polarización (R_p). Los ensayos de R_p se realizaron empleando un potencióstato portable marca Gamry. Para las mediciones se utilizó un contraelectrodo de anillo con confinación física de señal y un electrodo de referencia de CSE.

TABLA 3. VALORES TÍPICOS DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN VC PARA ACERO EN HORMIGÓN.

Nivel de daño	VC / mm/año	Condición del hormigón
Muy leve	< 1	Muy seco sin contaminación de cloruros.
Leve	1 – 5	Seco, carbonatado o poco contaminado con Cl ⁻
Moderado	5 – 10	Húmedo, carbonatado o poco contaminado con Cl ⁻
Alto	10 – 100	Muy húmedo, carbonatado o contaminado con Cl ⁻
Muy alto	> 100	Muy húmedo, carbonatado o muy contaminado con Cl ⁻

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al método presentado en la sección anterior, los resultados se pueden resumir diferenciando dos tipos de daños causados por corrosión. Por un lado los daños existentes en los componentes estructurales ubicados en el sector perimetral de la estructura en los niveles del subsuelo y por otro los problemas de corrosión observados en las plantas del edificio. Los componentes se identifican según los planos provistos por la empresa contratante. Se omiten los resultados numéricos obtenidos para los diferentes parámetros a fin de simplificar la presentación.

III.a. Subsuelos del edificio.

Las columnas y vigas que conforman la estructura perimetral de los subsuelos presentan un proceso de corrosión generalizado en sus refuerzos principales que se propaga a una elevada velocidad. La pérdida de sección transversal en los refuerzos principales de los componentes más afectados por corrosión es de 80 % en una de las viga (V10-1S) y 37 % en una de las columnas (C4-2S). El hormigón se encuentra permanentemente húmedo y presenta un

elevado nivel de agresividad medido en términos de su resistividad eléctrica.

Los restantes componentes estructurales del subsuelo, incluyendo las lozas, presentan un nivel de deterioro menor. Los signos visibles de deterioro, caracterizados por la delaminación y los desprendimientos sectorizados del recubrimiento de hormigón se deben al proceso de corrosión de las armaduras que avanza a una velocidad entre moderada y elevada. En estos sectores, la disminución promedio de sección transversal de los refuerzos es inferior al 10%.

III.b. Plantas del edificio

Los problemas de corrosión se manifiestan en aquellos sectores de la estructura donde se producen acumulaciones de agua o filtraciones a través de la medianera del edificio. Las lozas de los pisos 9 y 10 presentan importantes daños, evidenciados en el estado avanzado de corrosión de las armaduras cuya disminución de sección transversal alcanza el 40%.

El grado de agresividad del hormigón que conforma las lozas es moderado y presenta un nivel de carbonatación que en general es superior al espesor de recubrimiento de hormigón.

En las demás plantas del edificio se observan sectores que presentan signos puntuales de deterioro originados en su gran mayoría por los escasos espesores de recubrimiento de hormigón existentes. La disminución de sección transversal en los refuerzos afectados por corrosión es inferior a 10 %. En estos sectores el hormigón presenta un carácter poco agresivo mientras que los potenciales y las velocidades de corrosión de los refuerzos son propios de acero en estado pasivo de corrosión.

IV. CONCLUSIONES

Gracias a la aplicación de un conjunto amplio de técnicas no-destructivas de ensayo y análisis pudo determinarse que la estructura del hormigón armado del edificio en cuestión presentaba, tanto en los subsuelos como en las plantas, problemas de corrosión de armaduras causados, en principio, por la suma de distintos factores tales como, defectos constructivos (escaso o inexistente recubrimiento de hormigón), filtraciones y acumulación de agua, empleo de materiales y dosificaciones de mezcla inapropiados.

Conocidas las causas y el grado de avance del deterioro pudieron recomendarse métodos de reparación adecuados a la severidad del problema tratado.

V. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. Andrade, C., Castelo, V., Alonso, M. C. y Gonzalez, J. A., "The Determination of the Corrosion Rate in Steel Embedded in Concrete by the Polarization Resistance and A. C. Impedance", ASTM STP 906, Ed. V Chaker, ASTM, Philadelphia, 1986.
2. Hannson, M., Sorensen, B., "The threshold concentration of chlorides in concrete for the initiation of reinforcement corrosion", ASTM STP 1065, Eds. M.s. Berke, V. Chaker and W. Witingng, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, p. 3,1990.
3. Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, Red DURAR (Durabilidad de la armadura), CYTED, ISBN 980-296-541-3, 1997.
4. Millard, S. G., Harrison, J. A., and Eduards, A. J., "Measurement of the Electrical Resistivity of Reinforced Concrete Structures for the Assessment of Corrosion Risk", Br. J. of Nondestructive Testing. Vol. 31, p.616, 1989.
5. Parrott, L. J., "Assessing Carbonation in Concrete Structures", Durability of Building Materials and Components. Proceedings of the Fifth International Conference held in Brighton, U.K., 7-9, p. 575, 1990.
6. Rasheeduzzafar, "Influence on Cement Composition on Concrete Durability", ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 6, p.574, 1992.
7. Sagüés, A., "Corrosion Measurements Techniques for Steel in Concrete", CORROSION/93, Paper No. 353, National Association of Corrosion Engineers, 1993.
8. Tuuti, K., Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Institute, Stockholm, 1982.