

Divulgación de las
actividades científicas
de la Universidad Nacional
de Mar del Plata

ARTÍCULO:

Corrosión de hormigón armado
en ambientes marinos

ARTÍCULO:

Termas y Fuentes Huincó:
¿Una posibilidad turística
abortada?

SITUACIÓN:

“Todo lo que sabía de ellos era
que eran pobres...”



Paisaje Urbano y patrimonio modesto

Un reto a la preservación dinámica



EDITORIAL	3
ARTÍCULOS	
· Paisaje urbano y patrimonio modesto: un reto a la preservación dinámica. <i>Lorena Marina Sánchez</i>	4
· #Corrosión de estructuras de hormigón armado emplazadas en ambiente marino. <i>María Beatriz Valcarce y Marcela Vázquez</i>	12
· #Actividades productivas no tradicionales: la producción de pieles de chinchillas en el partido de General Pueyrredon. <i>Jorge Crespell y Victoria Lacaze</i>	19
OPINIÓN	
· #"Todo lo que sabía de ellos es que eran pobres ... Así que se había vuelto imposible para mí verlos como algo más que pobres". <i>Natacha Gentile</i>	25
ARTÍCULO	
· #Las Termas y Fuentes Huincó: ¿una posibilidad turística abortada? <i>María Cecilia Rigonat</i>	30
DIVERTIMIENTO MATEMÁTICO	
· #Gauss en el País de la inducción. <i>Osmar Cabrera y Jorge Nicolás López</i>	35

Corrosión de estructuras de hormigón armado emplazadas en ambiente marino

María Beatriz Valcarce y Marcela Vázquez

Se presenta la experiencia adquirida en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión, en su gran mayoría localizadas sobre el litoral marítimo. Las patologías más observadas fueron: agrietamientos paralelos a la dirección del refuerzo, manchas de óxido, delaminación y desprendimientos del recubrimiento, así como armaduras en estado avanzado de corrosión.

Gracias a la aplicación de un conjunto amplio de técnicas no-destructivas de ensayo y análisis es posible evaluar el grado de avance de la corrosión. En términos generales, el problema resulta de la suma de distintos factores tales como: defectos constructivos, filtraciones, acumulación de agua y empleo de materiales y dosificaciones de mezcla inapropiados, entre otros. Conocidas las causas, analizado el avance del deterioro e identificados los sectores más afectados, es posible recomendar métodos de reparación adecuados a la severidad de la situación, y que contribuyen a implementar soluciones efectivas.

Introducción

El hormigón armado es el material que predomina en la mayoría de las estructuras civiles y viales. Aunque no se las encuentre a la vista, el hormigón armado contiene, por definición, partes metálicas. El acero de sus armaduras es el que da refuerzo y sustento a estas estructuras. Es posible que, por hallarse ocultas, no se le otorgue a estas barras metálicas la relevancia que tienen, así como tampoco las consecuencias que puede acarrear su deterioro. La corrosión de las armaduras afecta la integridad estructural del conjunto, dado que causa agrietamientos y delaminación en el hormigón y conduce a la disminución de la sección de las barras. La evidencia de problemas de corrosión (manchas de óxido, grietas y desprendimiento de material) genera condiciones inseguras para los usuarios y provoca además la desvalorización de los inmuebles debido a su deterioro estético y funcional. El grado de compromiso estructural alcanzado se establece efectuando un diagnóstico en profundidad de la estructura.

En condiciones normales, el hormigón constituye un ambiente protector para el acero de refuerzo, ya que su elevada alcalinidad ($\text{pH} > 12.5$) crea un ambiente en que se corroe a velocidad muy baja. En esta condición se dice que el acero se encuentra pasivo. Sin embargo, la interacción del hormigón armado con

un ambiente agresivo o su elaboración con materiales contaminados puede provocar que se inicien los procesos corrosivos. En este caso el acero pasa a estar activo.

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 protectora del acero y promover el inicio de la corrosión de las armaduras: la presencia de iones cloruro y la carbonatación.

La corrosión es iniciada por iones cloruro cuando en la superficie del acero éstos alcanzan una concentración superior a un cierto valor crítico. 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. Se considera ambiente marino a la franja de tierra que abarca hasta 1000 m de la costa del mar. En estas condiciones, los iones cloruro pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros del hormigón. En el caso de los hormigones contaminados, los iones cloruros se incorporan como contaminante de alguno de los componentes de la mezcla (agregados fino o grueso, agua y aditivos, entre otros).



La corrosión iniciada por carbonatación es el resultado de la reacción química que ocurre entre el dióxido de carbono (CO₂) presente en la atmósfera y ciertos productos de hidratación del cemento disueltos en la solución que impregna los poros del hormigón. Como resultado, el pH del hormigón carbonatado desciende hasta alcanzar valores menores a 9. Una vez que el frente carbonatado llega a la posición que ocupa la armadura, comienza la disolución de la película que protege el acero de la corrosión.

Hay además, otros factores que influyen en la corrosión de los refuerzos. La humedad del hormigón juega un papel importante en la corrosión del acero, 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. La eficacia del recubrimiento como barrera depende fundamentalmente de dos factores: su espesor y el diseño de la mezcla. En cuanto al primero, se recomienda para ambientes marinos que tenga 2,5 cm como mínimo. Con respecto a la mezcla, bajas relaciones agua/cemento y altos contenidos de este último garantizan un hormigón de buena calidad.

Para efectuar un diagnóstico que permita establecer el grado de deterioro existente en una estructura de hormigón armado afectada por problemas de corrosión es necesario llevar a cabo una inspección visual detallada de la estructura. Algunos de los aspectos a analizar son la extensión de la zona afectada por corrosión, el tipo de componente estructural comprometido y el riesgo de posibles desprendimientos de material. La medición de la disminución de la sección transversal de los refuerzos principales causados por la corrosión permite, en términos generales, evaluar las implicancias estructurales del problema. En este sentido, los criterios de evaluación generalmente empleados establecen que una disminución del 20% en la sección



Fotografía 1. Procedimiento para la extracción de testigos de hormigón

transversal de los refuerzos principales compromete la integridad estructural del componente afectado, mientras que una disminución de apenas 1% puede provocar riesgos de desprendimientos de mampostería y comprometer la seguridad de personas o bienes materiales. Además se necesita evaluar una serie de parámetros más específicos que permitan cuantificar el grado de deterioro de la estructura, identificar las causas de la falla y estimar la durabilidad de la estructura. Algunos de estos parámetros son: la resistividad eléctrica del hormigón, el contenido de iones cloruro, el grado de acidez del hormigón (presencia de carbonatación), un mapeo de potenciales de corrosión y la velocidad de corrosión de la armadura, entre otros. Se los describe a continuación, con mayor detalle.

Procedimiento de diagnóstico

Para establecer el grado de deterioro de una estructura de hormigón armado afectada por corrosión es necesario efectuar una inspección exhaustiva a la estructura. Algunos de los aspectos que deben ser evaluados son los siguientes:

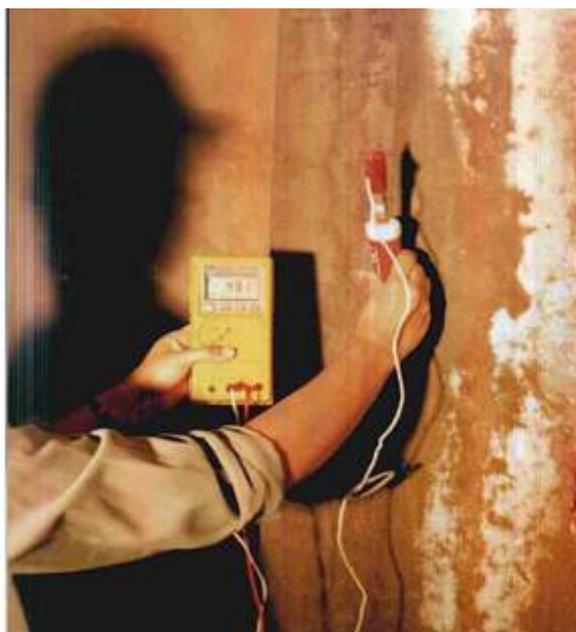
1- Detección de grietas, manchas de óxido y sectores con delaminación o desprendimientos del recubrimiento de hormigón. Los productos de corrosión de la armadura ocupan un volumen considerablemente superior al del acero original. Esto causa tensiones de tracción en el interior del hormigón que originan grietas paralelas a la dirección de los refuerzos de acero 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". En los sectores de la estructura donde el hormigón se encuentra saturado con agua o muy húmedo, la corrosión en las armaduras se manifiestan a través de manchas de óxido en la superficie del hormigón, sin que aparezcan signos de delaminación o agrietamientos.

2- Localización y verificación de la continuidad eléctrica de las armaduras. La localización de la armadura y la determinación de su diámetro y cantidad es de fundamental importancia para evaluar la capacidad portante del componente estructural afectado por problemas de corrosión. Esta información puede ser obtenida mediante el empleo de un detector electromagnético de armaduras denominado "pacómetro". Este equipo permite detectar la posición de los refuerzos ubicados a menos de 10 cm 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 eléctrico necesarios para efectuar dichas mediciones. Esta verificación se efectúa conectando un multímetro entre los puntos de interés.

3- Extracción de testigos de hormigón. La extracción de testigos se realiza mediante una máquina perforadora que emplea una broca de diamante refrigerada con agua, como se muestra en la fotografía 1. Los testigos extraídos tienen un diámetro de 5 cm y su largo es variable. En la gran mayoría de los casos los testigos se retiran dejando la armadura parcialmente expuesta para posibilitar la ejecución de ensayos electroquímicos. Los testigos se usan para realizar estudios de laboratorio sobre las muestras de hormigón.

4- Medición de potenciales electroquímicos de corrosión. El potencial de corrosión del acero en el hormigón armado es un parámetro que indica el estado de avance de la corrosión (activo o pasivo) de la armadura. Mediante esta técnica es posible detectar los sectores de la estructura donde las armaduras presentan corrosión activa aun cuando no existan manifestaciones visibles de deterioro. La medición e interpretación de los resultados se efectúa de acuerdo con la norma ASTM C 876. Para llevar adelante la medida es necesario hacer contacto eléctrico con el acero desnudo y contar con un electrodo de referencia y un multímetro de alta impedancia de entrada, como se muestra en la fotografía 2. 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).



Fotografía 2. Procedimiento para la evaluación de potenciales de corrosión en barras de refuerzo

5- Medición de la resistividad eléctrica del hormigón. La resistividad eléctrica del hormigón es un parámetro que depende fundamentalmente de la morfología y la porosidad del hormigón, así como del contenido de humedad, el grado de acidez o carbonatación y el contenido de cloruros en el hormigón. La medición de resistividad permite caracterizar la calidad del hormigón y complementar la evaluación del riesgo de corrosión de las armaduras. La técnica más empleada para medir la resistividad eléctrica del hormigón in-situ se conoce como "método de Wenner" o "de las cuatro puntas". 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.

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

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

E_{CORR} vs. referencia Cu/CuSO ₄ sat	Riesgo por corrosión	Tipo de corrosión
> -200	Bajo	Acero en estado pasivo
-200 a -300	Moderado	Transición activo-pasiva
< -300	Alto	Corrosión activa

6- Medición de la velocidad de corrosión de las armaduras. La medición de la velocidad de corrosión (VC) de la armadura permite establecer su velocidad de deterioro, expresada como la disminución de la sección

transversal en función del tiempo. La técnica más empleada para la determinación de VC de las armaduras en estructuras en servicio es la denominada resistencia a la polarización (R_p) y su implementación en campo se muestra en la fotografía 3. 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.



Fotografía 3. Procedimiento para la evaluación de velocidades de corrosión en barras de refuerzo refuerzo

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

Nivel de daño	VC / $\mu\text{m/año}$	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

7- Determinación de la profundidad del frente carbonatado. La profundidad del frente carbonatado se mide en distintos sectores de la estructura aprovechando los orificios realizados para la extracción de testigos. La medición se efectúa mediante la pulverización de una solución indicadora de pH sobre la superficie del hormigón recientemente expuesta, como se muestra en la fotografía 4. El indicador de pH más habitualmente empleado es una solución de fenoltaleína preparada 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 CO_2 ambiental). En contraste, se torna púrpura si el hormigón ha permanecido alcalino. Mediante este tipo de mediciones es posible estimar el tiempo que tardará en iniciarse la corrosión de las armaduras como resultado del ingreso del dióxido de carbono del aire a través de la red de poros del hormigón.



Fotografía 4. Procedimiento para la evaluación del frente carbonatado

8- Medición de la disminución de la sección transversal de las armaduras. La medición de la disminución de sección transversal de la armadura ocasionada por la corrosión permite evaluar el grado de compromiso estructural del componente afectado. La medición puede ser realizada directamente con un calibre en el sector de la armadura afectado por la corrosión una vez eliminado todo el óxido existente o indirectamente con técnicas más sofisticadas de diagnóstico por imágenes.

9- Determinación del contenido de iones cloruros. El análisis de los perfiles de concentración de iones cloruro en el hormigón permite establecer la velocidad de ingreso de estos iones agresivos al interior del

hormigón y predecir el tiempo que tardarán en alcanzar la superficie de la armadura en una concentración suficiente como para iniciar la corrosión del refuerzo de acero. La corrosión de la armadura se inicia una vez que la concentración de cloruros alcanza un nivel crítico en la superficie del acero. El nivel crítico de concentración de cloruro generalmente adoptado es 0.4% (en peso) respecto del contenido de cemento en el hormigón

10- Extracción de muestras de hormigón para determinar su porosidad. El porcentaje total de poros en el hormigón (evaluado según la norma ASTM C 642) es un parámetro empleado para caracterizar la calidad del hormigón. Está estrechamente relacionado con su durabilidad, dado que constituye un indicador de la permeabilidad del hormigón al agua y a los agentes agresivos presentes en el medio ambiente. El procedimiento consiste en obtener el peso de muestras de hormigón en tres condiciones diferentes: muestra secada a 105 0C en estufa hasta peso constante (PA), muestra saturada de agua con superficie seca (PB), peso de la muestra inmersa en agua (PC). 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, si es > 15 la calidad es baja.

A partir de la información recabada en los estudios de campo y los correspondientes ensayos de laboratorio efectuados con muestras de hormigón extraídas de las estructuras inspeccionadas, es posible determinar:

- Los factores que desencadenaron el proceso de corrosión del acero en el hormigón.
- Las propiedades durables del hormigón, nivel de agresividad, porosidad, calidad, etc.
- El grado de deterioro existente en la estructura.
- La vida residual de la estructura en servicio.
- Las bases para seleccionar un esquema de reparación eficiente y de prolongada durabilidad.



Fotografía 5. Columnas, vigas, lozas y fachada de un edificio con signos visibles de deterioro causados por la corrosión de las armaduras.



Fotografía 6. Pilote de un puente, con signos visibles de deterioro causados por la corrosión de las armaduras.

Resumen de la experiencia adquirida

En la División Electroquímica y Corrosión del Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA, CONICET-UNMdP) se han realizado numerosos estudios en estructuras de hormigón armado afectadas con problemas de corrosión, varios de los cuales fueron efectuados en estructuras viales (puentes) y las restantes en edificios ubicados, en su gran mayoría, en ciudades próximas al litoral marítimo. Las patologías más comúnmente observadas en las estructuras inspeccionadas fueron: agrietamientos paralelos a la dirección del refuerzo, manchas de óxido, delaminación y desprendimientos del recubrimiento de hormigón, así como armaduras en estado avanzado de corrosión. Las fotografías 5 y 6 muestran casos típicos.

Los resultados de los estudios reflejaron que el origen del proceso de corrosión en las armaduras depende fuertemente del tipo de ambiente al que está expuesta la estructura. En las estructuras expuestas a ambiente marino la corrosión es generalmente iniciada por los elevados contenidos de iones cloruro en el

hormigón. Las altas concentraciones de iones cloruro registradas en las estructuras civiles ubicadas en regiones próximas al litoral marítimo se deben en parte a su penetración desde el medio ambiente exterior, pero también al empleo de agregados finos y gruesos contaminados con sales del mar durante la elaboración del hormigón.

Existe una serie de factores que son comunes a todas las estructuras afectadas. Algunos de éstos son: reducidos espesores del recubrimiento de hormigón (en casos inferiores a 1 cm), poca separación entre las barras de acero, empleo de hormigones de baja calidad (elaborados con relaciones agua/cemento elevadas) y la presencia de humedad o el contacto directo con agua. Particularmente en vigas y en losas se observan con frecuencia sectores donde estribos y armaduras de distribución se encuentran prácticamente a la vista o presentan espesores de recubrimiento excesivamente delgados.

En ninguna de las estructuras inspeccionadas se observó un nivel de deterioro superior al establecido por el criterio de integridad estructural, el cual considera como nivel crítico de deterioro una disminución de sección transversal en los refuerzos principales superior al 20%. Sin embargo, en la mayoría de los casos analizados, el deterioro existente comprometía la seguridad de personas y bienes materiales debido al riesgo de desprendimientos de mampostería. Únicamente en refuerzos de poco diámetro, como es el caso de los estribos en vigas y columnas, se observó una disminución de sección apreciable, y en casos puntuales hasta la desaparición del acero.

Las mediciones de potencial de corrosión fueron utilizadas para identificar los sectores de la estructura donde la armadura presentaba corrosión activa, aun cuando todavía no se evidenciaban signos visibles de deterioro. Esta técnica fue empleada para delimitar la extensión de los sectores de la estructura a reparar. Los daños por corrosión de armaduras fueron generalmente observados en estructuras cuyo hormigón presentaba una resistividad eléctrica inferior a $20 \text{ k}\Omega\text{cm}$.

Gracias a la aplicación de un conjunto amplio de técnicas no-destructivas de ensayo y análisis es posible evaluar el grado de avance de la corrosión en estructuras de hormigón armado. En términos generales, el problema resulta de 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 inapropiadas. Conocidas las causas y el grado de avance del deterioro es posible identificar los sectores más afectados y recomendar

métodos de reparación adecuados a la severidad del problema tratado y que contribuyan a implementar soluciones efectivas.

Para determinar la durabilidad de una estructura de hormigón armado afectada por corrosión es necesario identificar el o los factores que originaron el problema (cloruros, carbonatación) y establecer el ritmo de deterioro de la estructura mediante mediciones de velocidad de corrosión. Estudios de este tipo son fundamentales a la hora de encarar tareas de mantenimiento o de reparación. Sólo así es factible recomendar la implementación de algunas de las múltiples medidas preventivas disponibles en el mercado, tales como el empleo de recubrimientos específicos y/o de inhibidores de corrosión.

Lecturas complementarias

- McCafferty, E. (2010). 'Introduction to Corrosion Science'. Springer-Verlag, New York. ISBN 978-1-4419-0454-6.
- Davis, J. (2000). 'Corrosion: understanding the basics'. ASM International. ISBN-10: 0871706415
- González Fernández, JA. (1989). 'Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas'. CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS. ISBN: 9788400069902
- Vázquez, M. (2014). 'La corrosión: El peor de los villanos cuando dominan los metales'. Editorial de la Universidad Nacional de Mar del Plata (EUDEM). ISBN 978-987-1921-31-7
- Vázquez, M y Fernández, R. (2004). 'Hormigón armado: la corrosión ataca desde adentro'. Ciencia Hoy, vol 14, nº 82: 40-47. ISSN 1666-5171.

María Beatriz Valcarce es Licenciada en Ciencias Químicas y Doctora en Ciencia de Materiales (ambos por la UNMDP), Investigadora Adjunta de CONICET, JTP en la Facultad de Ingeniería de la UNMDP e integrante la División Electroquímica y Corrosión del INTEMA (Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales, CONICET-UNMDP). mvalca@fi.mdp.edu.ar

Marcela Vázquez es Licenciada y Doctora en Ciencias Químicas (ambos por la UNMDP), Investigadora Principal de CONICET, Profesora Asociada en la Facultad de Ingeniería de la UNMDP e integrante la División Electroquímica y Corrosión del INTEMA (Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales, CONICET-UNMDP). mvazquez@fi.mdp.edu.ar




NEXOS


UNIVERSIDAD NACIONAL
de MAR DEL PLATA
.....



DIAGONAL ALBERDI 2695 (B7600GYI)
MAR DEL PLATA | ARGENTINA



+54 0223 492 1705 INT. 141



WWW.MDP.EDU.AR