

DIAGNÓSTICO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO. USO DE HERRAMIENTAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS METÁLICOS EN INMUEBLES

TEZOSOMOC PÉREZ LÓPEZ

JANNEN CONTRERAS VARGAS

ISBN: 978-607-484-648-5

Se han mencionado en otros textos de esta publicación las principales características, causas y consecuencias del deterioro del concreto. Entender esto es indispensable al planear un diagnóstico, más aún para una intervención.

El deterioro resulta de una combinación de circunstancias provistas por factores como el diseño, prácticas de construcción, materiales, el ambiente y las cargas aplicadas a la estructura, entre otros (The Concrete Society 2000:7). Algunas alteraciones pueden identificarse visualmente a través de efectos como manchados o algunas formas de agrietamiento, por ello con frecuencia las estrategias de acercamiento deberían incluir levantamientos desarrollados inicialmente por arquitectos, ingenieros y/o restauradores, sensibilizados a la observación de aquellos efectos que sean relevantes, que podrían o deberían ser complementados por análisis conducidos por otros profesionales como los ingenieros químicos que indicarán las estrategias más adecuadas, pudiendo incluir pruebas *in situ* o muestreos, según lo amerite el caso o lo permitan las circunstancias del inmueble.

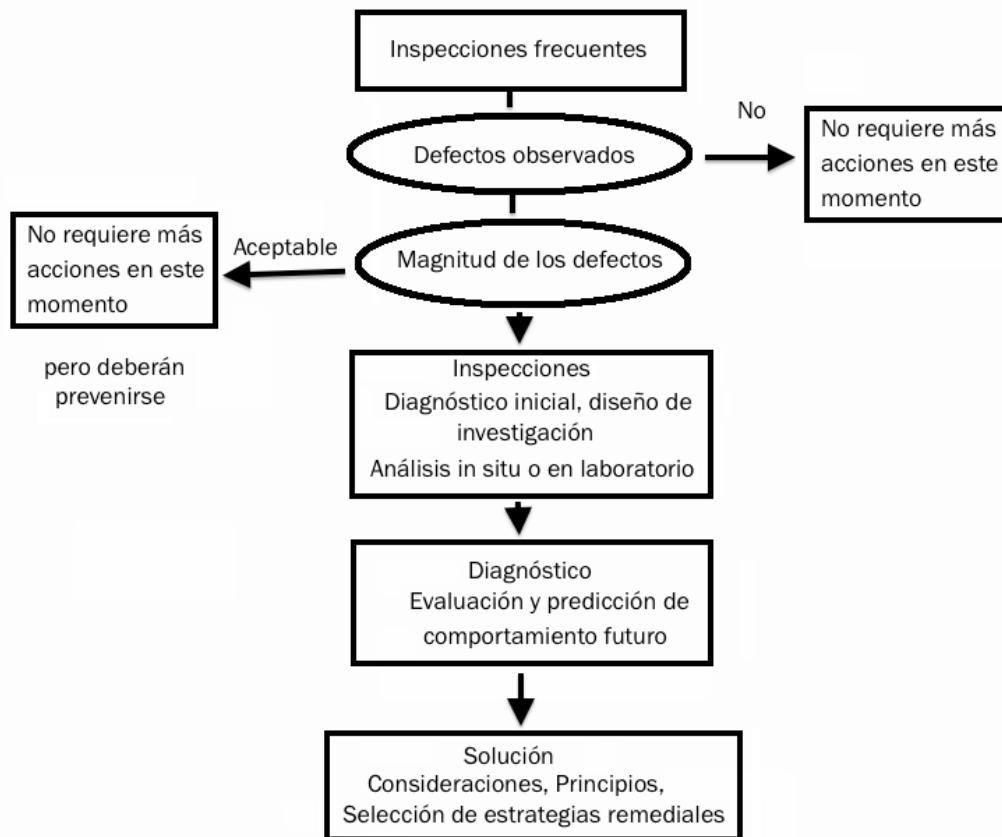


Figura 1. Diagrama de flujo de los pasos de la inspección a la propuesta de soluciones. Modificado de The Concrete Society 1994:7.

En cualquier caso, los especialistas en concretos y estructuras de concreto reforzado han establecido estrategias plasmadas en recomendaciones, manuales y normas diversas publicadas en diversos lugares del mundo, en las que se recomiendan inspecciones visuales o mediciones periódicas (Figura 1).

La evaluación integral del grado de afectación y por supuesto la planeación de los pasos a seguir para resolver los problemas identificados es una labor que debe realizarse en conjunto, considerando no sólo el diseño, las cargas a soportar y los materiales involucrados, sino el uso, la significación estética y cultural, los costos, las implicaciones políticas y sociales, etcétera, lo que como de costumbre resulta en un asunto complejo que requiere de trabajo colaborativo para su correcto desarrollo.

En el presente texto se hará referencia a técnicas útiles, desde el punto de vista de un ingeniero químico, para identificar y evaluar los daños del concreto y los elementos metálicos en la estructura, de tal manera que sea posible tomar una acción pertinente que prolongue su vida de servicio.

TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO

Si bien existen complejas y sofisticadas técnicas de análisis, cabe iniciar por las más accesibles; obviamente por una cuidadosa observación y registro de aquellas cosas que sí es posible identificar desde el exterior como los cambios de coloración y manchado del concreto, y empleando técnicas como el uso de indicadores ácido-base.

De manera visual: uso de indicadores ácido-base

Como ya se ha explicado, la alcalinidad del concreto puede ser modificada debido a la carbonatación de los productos de hidratación del cemento, hasta llegar a valores cercanos a $\text{pH}=8$. Físicamente no se aprecian cambios en la pasta que indiquen el avance del proceso de carbonatación, por lo que se le presta poca atención. Sin embargo, el cambio químico puede ser visualizado a través del uso de indicadores ácido-base, que tienen la propiedad de cambiar de coloración en diferentes intervalos de pH .

Para el caso del concreto se tienen como indicadores a la timolftaleína y la fenolftaleína. La timolftaleína toma un color azul de Prusia en valores de pH mayores de 10.5 y cambia

a incoloro cuando el pH es menor de 9.3, por su parte la fenolftaleína adquiere una coloración rosada para pH mayores a 10 y cambia a incoloro cuando el pH es inferior a 8.3.

El procedimiento de campo para precisar el avance del frente de carbonatación en estructuras de concreto consiste en romper la sección que se desea inspeccionar. La parte de la pieza que va expuesta al medio, se toma como punto de referencia para las mediciones. La aplicación requiere que primero se limpie de polvo la superficie, se rocíen los indicadores y se espere de dos a tres minutos para observar la coloración que toman. Generalmente, cerca de la superficie los indicadores aparecen sin color y sólo adquieren el color violeta a una cierta profundidad y en ocasiones la coloración azul sólo se ve en la parte más interna de la pieza de concreto.

El frente de carbonatación es la distancia que aparece decolorada desde el extremo de la muestra que estaba expuesto al medio, hasta el punto en que se presenta el color violeta. En los casos que se observe también la coloración azul, será en la parte que cuente con menor grado de reacción con el CO_2 .



Figura 2 A.- Coloración de indicadores aplicados en concreto con poco avance de carbonatación. **B.-** Coloración de indicadores aplicados en concreto con un considerable avance de carbonatación.

La Figura 2a muestra un trozo de concreto que fue expuesto al medio marino y rociado con los indicadores timolftaleína y fenolftaleína. Se observa que ambas sustancias mantienen su color correspondiente al medio alcalino, es decir azul para la timolftaleína y violeta para la fenolftaleína: lo que indica que en la pieza el frente de carbonatación es muy limitado y por lo tanto conserva su integridad química, sin riesgo de promover la corrosión de la varilla. En la Figura 2b la parte sin coloración muestra una pieza con un avance considerable de carbonatación; se observa que la alcalinidad se conserva sólo en el centro del corte.

Medición de la resistividad

El concreto puede ser un conductor eléctrico. Como resultado de la porosidad del concreto, se tiene un volumen hueco que puede ser llenado con agua de acuerdo a las condiciones de exposición de la estructura. Cuando está sumergida, los poros se saturan de agua; en el caso de una pieza de concreto colocada a la intemperie, la cantidad de agua en los poros es función de la humedad relativa del medio ambiente, como se ilustra en la siguiente Figura 3.

La capacidad del concreto para conducir corriente eléctrica depende del grado de llenado de los poros: cuando

está saturado se alcanza la máxima conductividad y esta propiedad va disminuyendo a medida que los poros se van quedando vacíos. La resistividad es el recíproco de la conductividad y es la forma común de medir y reportar una característica eléctrica del concreto.

Existen varias técnicas de laboratorio para determinar la resistividad del concreto, pero la más utilizada en campo consiste de la colocación de cuatro varillas colocadas equidistantes a través de las cuales se hace pasar un flujo

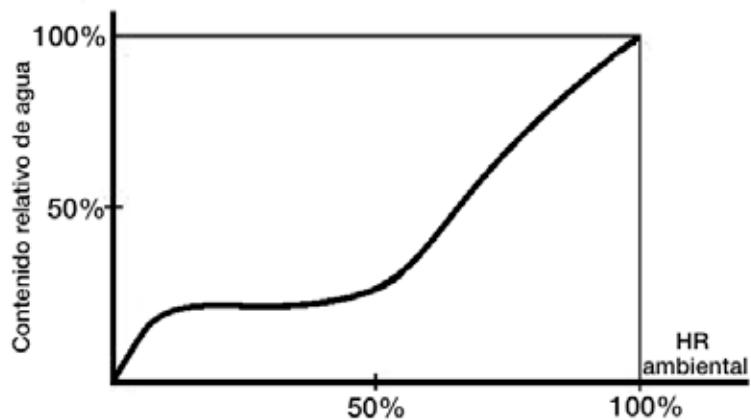


Figura 3. Relación de la H. R. ambiental con el contenido de agua en los poros del concreto.

de corriente y se mide una diferencia de potencial, como se puede ver en la figura 4.

La ecuación para conocer la resistividad se deriva de la Ley de Ohm y al tomar en cuenta la geometría del campo eléctrico que genera que dé la siguiente forma:

$$\rho = 2\pi a(V / I)$$

Donde:

a la distancia de separación entre los electrodos (se recomienda 2 o 3 cm, de acuerdo al espaciamiento entre varillas de la armadura),

I el valor de la corriente que circula por el circuito y

V la diferencia de potencial (voltaje) debida a la resistencia del concreto.

Aunque no existe alguna normativa que establezca los valores de resistividad como parámetro para establecer un criterio de riesgo de corrosión para el refuerzo de acero, sí están reportados resultados de estudios que han corroborado las condiciones para propiciar el inicio y desarrollo del proceso de corrosión, que se anotan en la Figura 5.

MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE CORROSIÓN

El aprovechamiento de una propiedad electroquímica para el diagnóstico de las estructuras. La condición de estabilidad en la interfase acero-concreto es determinante para que se mantenga el estado de pasivación o que se presente la corrosión del acero de refuerzo. Una manera de aproximar el estado de conservación de la varilla

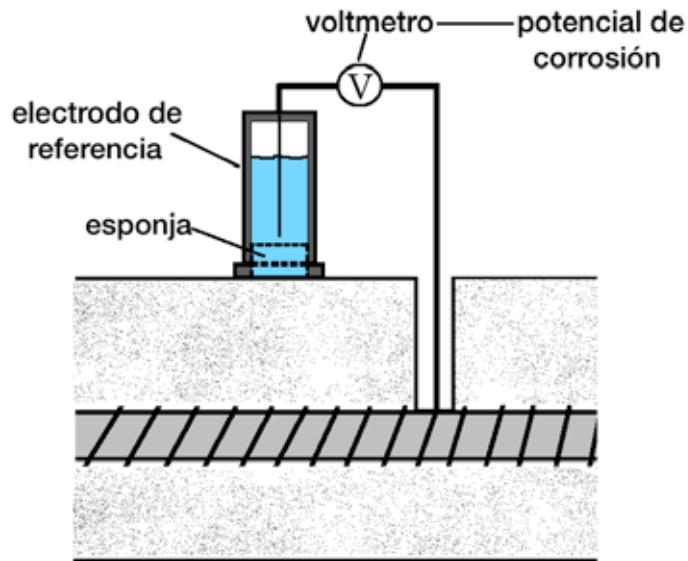


Figura 4. Diagrama para la medición de la resistividad del concreto.

Resistividad (ρ)	Probabilidad de corrosión
$\rho > 200 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Poco Riesgo
$200 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm} < \rho < 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Riesgo Moderado
$\rho < 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	Alto Riesgo

Figura 5. Criterios de probabilidad de corrosión en función de la resistividad ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$).

de refuerzo es mediante la determinación del potencial electroquímico, que mide la situación termodinámica del acero con respecto al concreto que lo rodea. Es la técnica electroquímica más simple y de mayor facilidad de manejo. Aunque la medida de un potencial electroquímico no aporta información cuantitativa sobre la velocidad de corrosión, ofrece indicaciones cualitativas que pueden complementarse con otros ensayos. El procedimiento para la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto está contenido en la Norma ASTM-C-876-87, la cual establece criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión como se exhibe en la Figura 7.

Es un ensayo no destructivo que se realiza conectando una terminal de un voltmetro de alta impedancia interna al acero embebido en concreto y la otra terminal del voltmetro a un electrodo de referencia. De esta forma se mide un potencial de media celda, como se ilustra en la Figura 6.

Diversos autores han contribuido en el análisis y crítica de la técnica, encontrando que el potencial de acero en concreto es influenciado por el contenido de humedad y que con un alto contenido de cloruros puede ser agresivo o

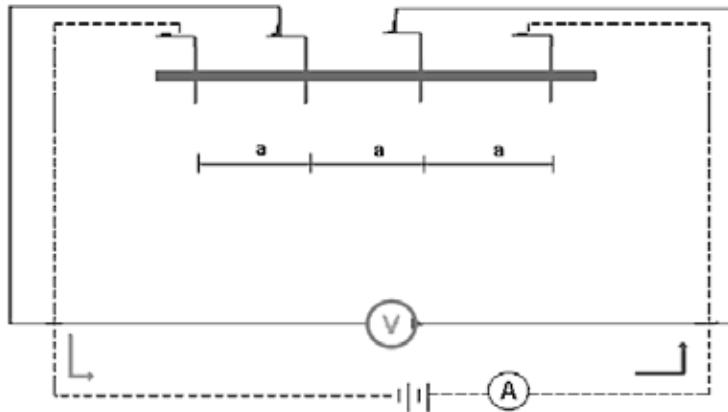


Figura 6. Medición de Potencial.

pasivo dependiendo de la cantidad de humedad. También mencionan que en el caso donde el potencial de corrosión decrece con el tiempo se debe a que puede o no haber ocurrido despasivación, ya que este decremento de potencial puede ser asociado con el rompimiento de la capa pasiva o de la restricción progresiva de suministro de oxígeno a la superficie del acero (Torres et al 2006:23). Otros reportes señalan que debido a la variación inherente en permeabilidad de un espécimen de concreto reforzado a otro, no puede ser asumido que estos al ser expuestos a una solución salina por un largo periodo tenderán con el tiempo a potenciales más negativos. Así mismo, se menciona que la medición de potenciales es limitada al contenido de humedad en el concreto, indicando que en condiciones de inmer-

E_{corr} vs Electrodo de Cobre /Sulfato de cobre (mV).	Probabilidad de corrosión.
$E_{corr} > -200$	10 % que se presente
$-200 < E_{corr} < -350$	zona incierta
$E_{corr} < -350$	90% que se presente

Figura 7. Norma ASTM.C-876-87. Criterio de probabilidad de corrosión.

sión los potenciales no son totalmente confiables. A su vez, después de estudios de 5 años con pruebas de laboratorio y de campo, se encontró una buena correlación entre los valores de potencial de corrosión y velocidad de corrosión (Torres et al 2006:23).

DETERMINACIÓN DE CLORUROS

Como se ha mencionado, la cantidad del ion cloruro es determinante para el inicio y desarrollo del proceso de corrosión del acero de refuerzo, por lo cual su medición es fundamental en medio marino y en zonas donde se aplican sales deshielantes sobre las estructuras.

Para conocer el avance de los iones cloruro al interior del concreto, es necesario tomar muestras en dirección perpendicular a la superficie de la estructura que se analizará. Dependiendo de la disponibilidad de equipo y accesibilidad en campo, será el tipo de toma de muestra que se determine. Es recomendable la práctica de extracción de núcleos para tener certeza de la trayectoria de ingreso de iones cloruro. En este caso, deberá usarse un flujo reducido de agua para enfriamiento del equipo que no contenga sales para

evitar contaminar los testigos. Otra forma de obtener las muestras es con porciones de polvo a diferentes profundidades mediante el uso de un taladro que cuente con algunas adaptaciones como una guía para precisar las distancias de penetración de la broca y una bolsa de recolección de al menos 20 gramos del polvo. Una tercera opción es desprender un trozo de concreto de la estructura mediante golpeo con cincel y martillo; este procedimiento es utilizado particularmente para obras que muestran zonas delaminadas, lo cual facilita la obtención del pedazo. La cantidad y los sitios de muestreo se determinan de acuerdo al grado de deterioro y alcance del estudio a realizar.

Una vez obtenida la muestra con alguno de los procedimientos anteriores, es necesario guardarlas en una bolsa de plástico bien sellada o en recipientes herméticos e impermeables, a fin de evitar que se contaminen. Para los casos de núcleos y trazos de concreto, se procede a segmentarlos en pedazos de igual longitud partiendo de la sección expuesta al medio ambiente hasta la correspondiente a la parte interna de la estructura de concreto, anotando la distancia como profundidad respecto a la superficie.

La preparación de la muestra para los análisis de contenido de cloruro consiste de pulverizar en mortero con mano de porcelana, hasta que pasen por una malla No. 200. El polvo que se colecta es sometido a diferentes condiciones, de acuerdo al tipo de determinación que se desea realizar: cloruro libre o cloruro total. En ambos casos, la medición se realiza por vía húmeda, siendo posible aplicar los métodos volumétricos de Volhard y/o Mhor o por potenciometría con electrodo de ión selectivo, de acuerdo a la norma ASTM C-1152.

Con los datos adquiridos se traza la gráfica de la concentración de ión cloruro en función de la profundidad. Generalmente se forma una línea de tipo parabólica, con una concentración elevada en la superficie de la muestra, que va disminuyendo a medida que la profundidad es mayor. A esta gráfica se le conoce como perfil de penetración de cloruro y es posible saber si ya se tiene una cantidad de cloruro crítica al nivel de colocación de la armadura.

Un método que ha reducido el tiempo para estimar perfiles de concentración de cloruro a periodos prolongados, es el empleo de ecuaciones matemáticas avanzadas que apro-

ximen las condiciones bajo las cuales se presenta el proceso por el cual la materia es transportada de una parte de un sistema a otra debida a una diferencia de concentración, fenómeno conocido como difusión. El uso de estas herramientas matemáticas es un apoyo para la predicción de los tiempos de iniciación y toma de decisiones oportunas.

CONSIDERACIONES FINALES

La durabilidad de una estructura de concreto depende tanto del medio de exposición como de su dosificación y colocación en obra. Es necesario entonces promover una cultura de supervisión continua que involucre la participación comprometida de profesionales de diferentes disciplinas para elaborar, supervisar, dar seguimiento y hacer las recomendaciones pertinentes y oportunas de reparación y/o rehabilitación para contar con obras civiles de concreto confiables, seguras y durables.

FUENTES CONSULTADAS

- Bockris, John O'M, Amulya K.N. Reddy, y Maria E. Gamboa-Aldeco. 1998. "Fundamentals of Electrode Processes", en *Modern Electrochemistry 2A*, Public Academic/Plenum Publishers, Nueva York.
- Torres Acosta, Andrés A, Pérez Quiroz, Trinidad, Ramírez Rentarúa, agosto J, Martínez Madrid, Miguel. 2006. Estudio de la corrosión en barras de acero inoxidable en concreto conataminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales, Publicación Técnica No. 287, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.
- The Concrete Society, 2000, Diagnosis of Deterioration in Concrete Structures. Identification of defects, evaluation and developmetn of remedial action, Concrete Society Technical Report No. 54.

LECTURAS RECOMENDADAS

- CYTED, "Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado", Brasil, 1997.
- S. Feliú y C. Andrade, "Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras", Acor, Madrid, 1989.

NORMAS REFERIDAS EN EL TEXTO

- ASTM C876 – 09, "Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", 2009.
- ASTM C1152/C1152M-03. Historical Standard: ASTM C1152/C1152M-03 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.

TEZOMOC PÉREZ LÓPEZ

Ingeniero Químico, Maestro en Metalurgia y Doctor en Ciencias Químicas por la Facultad de Química de la UNAM. Profesor e Investigador del Centro de Investigación en Corrosión (CICORR) de la Universidad Autónoma de Campeche desde 1995. Director Científico del CICORR de junio de 2002 a abril de 2011. Investigador Nacional del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II. Asesor de proyectos del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), responsable de proyectos de investigación con financiamiento externo.

JANNEN CONTRERAS VARGAS

Licenciada en Restauración de Bienes Muebles (ENCRYM-INAH, México); Maestra en Ciencias, Conservación Forense (Universidad de Lincoln, Reino Unido). Acreedora al Premio Nacional INAH Paul Core-

mans en dos ocasiones. Titular del Área de Conservación de Patrimonio Cultural Metálico y participante en asignaturas de ciencia aplicada a la restauración del patrimonio cultural, en la ENCRYM desde 2001. Su actividad se centra en el estudio del patrimonio cultural metálico, sus mecanismos de alteración, posibilidades para su tratamiento y evaluación. Participa en proyectos de investigación CONACYT, PAPIIT Y PROMEP-SEP.