

Capítulo 10

Inspección y monitoreo de corrosión a chimeneas de concreto reforzado

F. Almeraya Calderón¹, P. Zambrano Robledo¹, A. Borunda T², A. Martínez Villafañe², F.H. Estupiñan L¹, C. Gaona Tiburcio¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, FIME. Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIIA. Carretera a Salinas Victoria Km. 2.3; Aeropuerto Internacional del Norte. Apocada, Nuevo León. México.

² Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua. Chihuahua, Chih., México.

falmeraya.uanl.ciiia@gmail.com, facundo.almerayac@uanl.mx

Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.76>

Referenciar este capítulo

Almeraya Calderón F, Zambrano Robledo P, Borunda T A, Martínez Villafañe A, Estupiñan L FH, Gaona Tiburcio C. *Inspección y monitoreo de corrosión a chimeneas de concreto reforzado*. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). *Corrosión y preservación de la infraestructura industrial*. Barcelona, España: OmniaScience; 2013. pp. 207-224.

1. Introducción

Cuando el concreto empezó a utilizarse industrialmente, a principios del siglo XX, se pensó que se había encontrado un material de durabilidad ilimitada, ya que este aporta una protección de tipo químico al acero, debido a su elevada alcalinidad, y supone una barrera física que aísla a la armadura de la atmósfera.^{1,2}

El concreto reforzado con varilla de acero es uno de los materiales de construcción más ampliamente usados, sin embargo las estructuras que lo emplean tienen el inconveniente de ser susceptibles a la corrosión debido a la pérdida de protección natural ofrecida a la armadura por el recubrimiento del concreto. La corrosión en puentes, particularmente en ambientes marinos, es un problema grave que ha venido afectando al mundo, ya que se pueden presentar manifestaciones patológicas de significativa intensidad, lo que lleva a elevados costos de reparación de la estructura, posible reducción de su capacidad resistente a las cargas de servicio, falta de estética y dependiendo del grado de daño, podría verse afectada la seguridad de las personas.^{2,4}

El concreto armado es uno de los materiales más empleados en la construcción, para la elaboración de estructuras como:⁵

- Elementos estructurales de edificación e Infraestructura
- Puentes de concreto
- Muros de contención
- Uso de concreto armado en túneles
- Pavimentos rígidos
- Obras de drenaje
- Presas
- Silos de concreto armado
- Tanques de concreto armado para almacenamiento

Hoy en día en México los diseños de dichas estructuras se basan en mecanismos de fallas dúctiles, generados por distintos esfuerzos en las estructuras. Sin embargo, dichas estructuras están sometidas a otros factores distintos a aquellos para los que fueron diseñadas, los cuales de una u otra forma afectan la vida útil de las mismas, deteriorando tanto el concreto como el acero que las componen.

El desconocimiento de cómo afectan estos factores a la estructura, puede conducir a problemas críticos de corrosión y degradación en el interior del concreto armado, lo que puede producir daños irreparables como pueden ser:^{2,3,6}

- Grietas.
- Vibraciones.
- Deformaciones.
- Colapsos.

Es importante tener conocimiento de algunos de los distintos factores que pueden afectar la vida útil de una estructura de concreto, y los daños producidos pueden ocasionar grandes pérdidas económicas, humanas y materiales.⁷⁻⁸

El objetivo de este capítulo es compartir el tipo de estudios en campo que se pueden llevar a cabo cuando se realiza una Inspección, evaluación y diagnóstico en estructuras reales, como fueron dos Chimeneas de concreto reforzado, dentro de una empresa Siderúrgica. En este estudio de campo se emplearon las técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización y potenciales de corrosión, así como pruebas químicas de carbonatación y porcentaje de cloruros.

2. Metodología Experimental

Los estudios de campo se basan primordialmente en la experiencia del grupo de trabajo y de los alcances acordados con la empresa en interés. El alcance de este trabajo fue inspeccionar dos chimeneas y definir los sitios a evaluar (ver Figura 1), posteriormente se realizaron pruebas de corrosión y químicas en las zonas de interés acordadas con la empresa afectada.

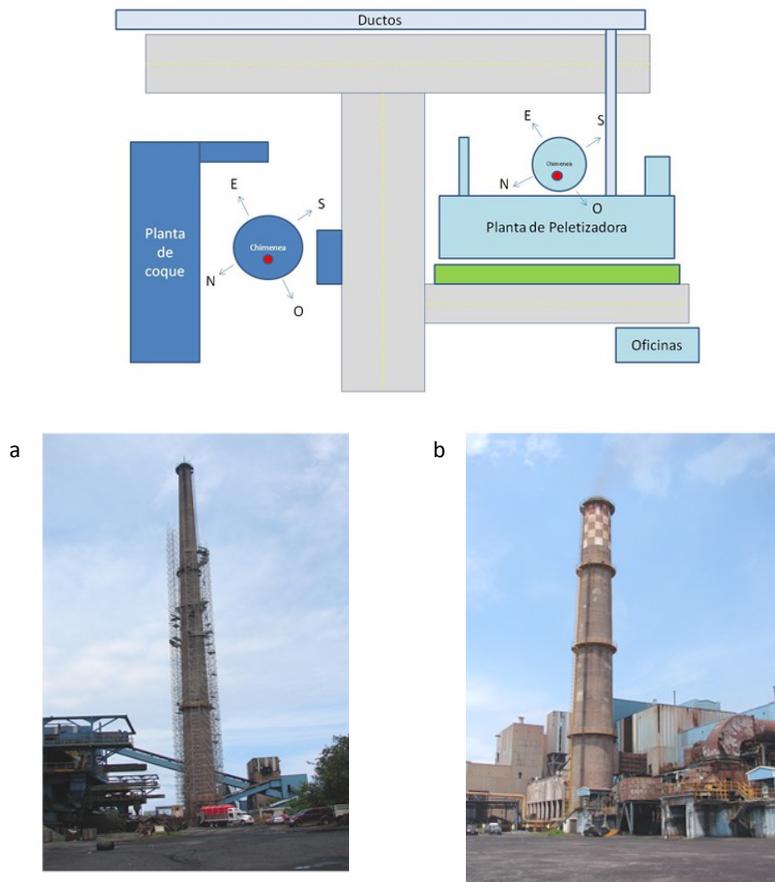


Figura 1. Plano de ubicación de las chimeneas, a) Chimenea de la planta de Coque y b) Chimenea de la planta de Peletizado

- a) Evaluación por corrosión de las zonas indicadas en el plano anexo.
- b) Técnicas a emplear:
 - Mapeo de potenciales de corrosión, ASTM C876.⁹
 - Técnica de resistencia a la polarización, ASTM G59.¹⁰
 - Determinación de Cloruros y Carbonatación.^{5,6}
 - Medición de pH del concreto.

Los sitios donde se acordó llevar a cabo el monitoreo de corrosión fue en los niveles 0.0-2 y 25-27 m, para la chimenea de una planta peletizadora, y en los niveles 4-6 y 30-32 m, para la chimenea de la planta coquizadora.

2.1. Equipos y Materiales a Emplear

El equipo y reactivos utilizados para llevar a cabo la evaluación de las chimeneas fue el siguiente:

- Brocha, cepillo, lima y otras herramientas para limpieza de la superficie.
- Cables y conectores.
- Electrodo de referencia (Cu/CuSO₄).
- Equipo de corrosión Gecor 6 NDT (Figura 2).
- Voltímetro de alta impedancia (Figura 3).
- Cámara fotográfica.
- Martillo y cincel.
- Conexiones (esponjas, cables, agua, electrodos).
- Sensores de corrosión: corrosión, humedad, resistividad y temperatura.
- Fenolftaleína.
- Medidor de pH (Figura 9; pH-meter Denver Instruments).
- Potenciómetro para determinar cloruros.



Figura 2. Equipo de Corrosión GECOR 6 de NDT Instruments

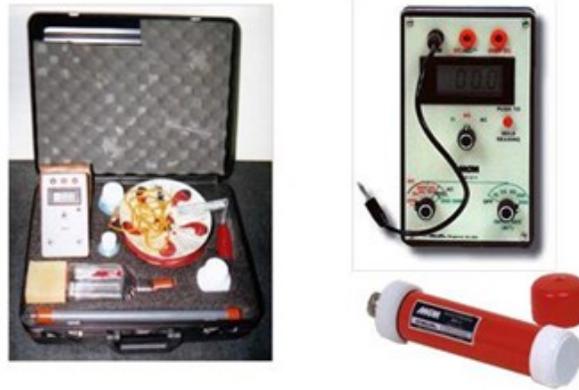


Figura 3. Equipo Para medición de Potenciales de Corrosión (voltmetro de alta impedancia)

2.2. Inspección a la estructura

Durante la inspección a la empresa Siderúrgica, se revisaron las dos chimeneas de las plantas de peletizado y coquizado; estas estructuras cuentan con más de 35 años de servicio.

En la Chimenea peletizadora se encontraron zonas con deterioros bastante severos, donde el concreto presenta una mala calidad, además de observarse corrosión en la varilla de acero, cuando el concreto ya no sirve como barrera protectora (Figura 4).



Figura 4. Deterioros en la Chimenea de la Planta Peletizadora

En el nivel 0.0 m se observan deterioros en el concreto, teniendo principalmente agrietamientos en el mismo. A partir de la primer plataforma (aproximadamente 25 m), los deterioros del concreto y de la varilla de acero se ven más notorios, además se puede ver que existe un mayor deterioro y desprendimiento del concreto en los lados Sur y Oriente, siendo menor en la zona norte (ver Figura 5).



Figura 5. Chimenea de la planta de Peletizado. Deterioros generales (en función de los puntos cardinales)

La chimenea ha tenido varias reparaciones en el concreto a través de parcheos, los cuales se realizaron a raíz del desprendimiento del concreto como consecuencia de las condiciones climatológicas prevaletientes en la región: temperatura, humedad relativa y presencia de gases generados en los procesos.

En la chimenea de la planta coquizadora, se encontró que el concreto no es de muy buena calidad, existen muchos agrietamientos en la estructura, se observa desconchamiento del concreto, y en algunas zonas hay presencia de corrosión.

En la Figura 6, se puede observar que cuando se realizó un orificio a la chimenea (nivel 4 m), la varilla presentaba oxidación, debido a la temperatura de los gases, y por otro lado, a las condiciones climatológicas de la región.



Figura 6. Deterioros en la Chimenea de la Planta Coquizadora

2.3. Potenciales de Corrosión

Consiste en medir el potencial de corrosión, ASTM C876-09 [9], del acero en el concreto mediante el uso de electrodos de referencia de Cobre / Sulfato de Cobre (ER). Se determinó el potencial electroquímico, que es el potencial eléctrico del metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto. Por lo anterior se realizó un mapeo de potenciales, siendo líneas de isopotencial que se dibujan sobre la superficie evaluada con la finalidad de establecer el área de cambio de potencial. En la Figura 7 se observa el esquema general para poder realizar la medición del potencial de corrosión del acero embebido en el concreto.

La interpretación de los potenciales de corrosión se realiza con base en la norma ASTM C-876 (ver Tabla 1), u organismos internacionales como el DURAR.

Potencial E_{corr} (V vs. ER)	Riesgo de Daño
< -0.200	10% de probabilidad de corrosión
-0.200 a -0.350	Cierta incertidumbre
> -0.350	90% de probabilidad de corrosión

a) ASTM C876-91 (reaprobada en 1999, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete").

Condición	Potencial (V vs. ER)	Observaciones	Riesgo de daño
Estado pasivo	0.200 a -0.200	Ausencia de Cl^- PH > 12.5 H_2O (HR ⁻)	Despreciable
Corrosión localizada	-0.200 a -0.600	Cl^- , O_2 , H_2O (HR ⁻)	Alto
	-0.150 a -0.600	Carbonatado O_2 , H_2O (HR ⁻)	Moderado alto
Corrosión uniforme	0.200 a -0.150	Carbonatado O_2 , seco (HR ⁻)	Bajo
	-0.400 a -0.600	Cl^- elevado, H_2O ó Carbonatado H_2O (HR ⁻)	Alto
	< -0.600	Cl^- elevado, H_2O^- (sin O_2)	Despreciable

b) DURAR (Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado). DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura. CYTED, (1997).

Tabla 1. Interpretación de resultados de los potenciales de corrosión

Los valores de potencial indican la probabilidad de que la corrosión del acero se esté presentando en la estructura de concreto, pero es muy importante que estos sean interpretados adecuadamente, considerando la información que pueda recopilarse acerca de las condiciones climatológicas y ambientales circundantes a la estructura, así como de la calidad de los materiales (concreto) empleados y su correcto uso.

El análisis de los gráficos de isopotenciales obtenidos durante el monitoreo por corrosión a las chimeneas, se realizó de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos por la norma ASTM C-876, y a criterios establecidos por organismos internacionales como el DURAR.^{6,9}

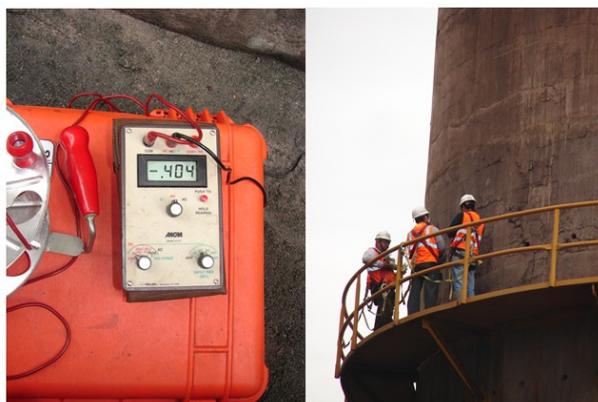


Figura 7. Personal realizando la medición de potenciales de corrosión

En el Nivel 0.0-2 m (Gráfica 1), se tienen potenciales entre +100 y -120 mV, cubriendo los 4 puntos cardinales (Norte, Este, Sur y Oeste). Estos potenciales se encuentran en un grado de 10% de probabilidad de corrosión, de acuerdo con el criterio de ASTM C876, pero solamente en la altura de los 2 m y del lado Sur a 1 m. En el lado Este, se tienen potenciales por debajo de los -250 mV, indicando incertidumbre en estas zonas, como lo indica ASTM C876.

Gráfica 1. Isopotenciales de Corrosión en la Chimenea de la Planta Peletizadora. Nivel 0-2 m

En la Gráfica 2, Nivel 25-27 m, se tienen potenciales positivos entre +20 y -150 mV, lo cual indicaría que el acero está pasivado, representando solamente un 10% de probabilidad de corrosión, conforme ASTM C876. Pero hay valores del potencial, situados en el lado Oeste, que están por debajo de los -250 mV.

Gráfica 2. Isopotenciales de Corrosión de la Chimenea en la Planta Peletizadora. Nivel 25-27 m

En las Gráficas 3 y 4 se pueden observar los isopotenciales para la Chimenea de la planta Coquizadora.

En el Nivel 4-6 m (Gráfica 3), se tienen potenciales entre +10 y -250 mV. Del nivel 4 m hasta los 6 m de altura, cubriendo casi todos los 4 puntos cardinales (Norte, Este, Sur y Oeste), los potenciales se encuentran entre un grado de 10% de probabilidad de corrosión y la

incertidumbre, de acuerdo con el criterio de ASTM C876. Y solamente en el lado Sur 1 m, se tienen potenciales por debajo de los -250 mV, indicando 90% de probabilidad de corrosión en estas zonas.

En la Gráfica 4, Nivel 30-32 m, se tienen potenciales desde -20 hasta -350 mV, lo cual indicaría que el acero ya está activo, representando incertidumbre y 90% de probabilidad de corrosión, conforme ASTM C876.

Gráfica 3. Isopotenciales de Corrosión en la Chimenea de la Planta Coquizadora. Nivel 4-6 m

Gráfica 4. Isopotenciales de Corrosión de la Chimenea de la Planta Coquizadora. Nivel 30-32 m

2.4. Velocidad de Corrosión

Las mediciones de la velocidad de corrosión se realizaron en base a la técnica electroquímica de Resistencia a la Polarización, Rp (ASTM G59-97).¹⁰ Se empleó el equipo científico de medición conocido como Gecor 6 de NDT (ver Figura 8). Este instrumento es capaz de medir la Resistencia a la Polarización (Rp), que se relacionan con la i_{corr} a través de la ecuación de Stern y Geary.¹¹

$$R_p = B / i_{corr}$$

Donde:

$B = \text{constante (26 - 52 mV)}$

$R_p = W - \text{cm}^2$

$i_{\text{corr}} = \text{mA} / \text{cm}^2$



Figura 8. Medición de Velocidad de Corrosión

La interpretación de la velocidad de corrosión se hace con base a la i_{corr} (ver Tabla 2).

i_{corr} (mA/cm ²)	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1-0.5	Moderado
0.5-1	Elevada
> 1	Muy elevada

Tabla 2. Interpretación de la i_{corr} de corrosión en concreto (DURAR)⁶

En la mayoría de todos los sitios el nivel de corrosión es considerado despreciable, de acuerdo a los valores de la velocidad de corrosión, ya que están dentro del intervalo menor a 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$; excepto el Nivel 0.0 (piso) cercano al silo 12, donde se tuvo un nivel de corrosión moderado por encontrarse en un intervalo de 0.1-0.5 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Zona	Nivel (m)	Sitio / i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		Este	Sur	Norte	Oeste
1	4	0.041 despreciable	0.117 moderado	S/D	0.063 despreciable
	4.5	0.034 despreciable	0.101 moderado	S/D	0.031 despreciable
2	30	0.254 moderado	0.399 moderado	0.950 elevado	0.124 moderado
	30.5	0.163 moderado	0.807 elevado	0.400 moderado	0.130 moderado

Tabla 3. Valores de Velocidad de corrosión en diversas zonas y niveles de la chimenea de la Planta Peletizadora

En la Chimenea de Peletizado (Tabla 3), el nivel de corrosión es considerado de moderado a elevado, ya que en el nivel inferior (4 m) se tienen valores entre 0.041 y 0.117 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, pero en los niveles más altos (zona 2 nivel 30 m) se encontraron valores entre 0.124 y 0.950 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Las velocidades de corrosión más elevadas se ubicaron en los lados Sur y Norte.

Zona	Nivel (m)	Sitio / Icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		Este	Sur	Norte	Oeste
1	0.5	0.923 elevado	0.152 moderado	0.008 despreciable	0.136 moderado
	1	0.328 moderado	0.258 moderado	S/D	0.088 despreciable
2	25	0.130 moderado	0.155 moderado	0.343 moderado	0.163 moderado
	25.5	0.230 moderado	0.181 moderado	0.177 moderado	0.296 moderado

Tabla 4. Valores de Velocidad de corrosión en diversas zonas y niveles de la chimenea de la Planta Coquizadora

En la Tabla 4, se puede observar que para los resultados obtenidos para el caso de la planta coquizadora, el nivel de corrosión es muy irregular, dado que en la zona 1 (nivel 0.5-1 m), hay valores de corrosión desde despreciables ($< 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), hasta elevados ($0.5-1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). En cambio, en la zona 2 (nivel 25-25.5 m), el riesgo de corrosión es en niveles moderados y los valores son constantes, ya que se encuentran en el intervalo de $0.1-0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Los niveles de corrosión que se presentaron se consideran en su gran mayoría entre moderados y elevados. En los niveles más altos de cada una de las chimeneas el concreto se ve dañado, pero como consecuencia de la dirección y fuerza de los vientos predominantes.

2.5. Carbonatación

La carbonatación en el concreto se define como la disminución de pH o reducción de la alcalinidad normal del concreto, que ocurre cuando el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera, reacciona con los álcalis dentro de los poros del concreto (usualmente hidróxido de calcio, sodio y potasio) en presencia de humedad, y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral.^{12,13}

Por naturaleza el concreto es altamente alcalino, con un rango de pH entre 12 y 13, y el concreto protege al acero de refuerzo contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero de refuerzo, que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Al disminuir el pH en el concreto, la capa pasiva deja de ser estable. En este nivel de pH, por debajo de 9.5, es donde comienza el fenómeno de la corrosión, teniendo consecuencias finalmente en el concreto con la aparición de agrietamientos.^{14,15}

En las Figuras 9 y 10, se pueden observar los testigos (corazones de concreto) que fueron extraídos de las zonas 1 (nivel 0.0 m) y 6 (nivel 45 m) de la chimenea. A cada testigo se le aplicó el reactivo químico de fenolftaleína, que es un indicador ácido-base que permite determinar la pérdida de alcalinidad. Con esta prueba se puede determinar la profundidad de carbonatación en cada testigo, y así poder saber cómo está la estructura de concreto en relación con su durabilidad.



Figura 9. Testigos (corazones de concreto) extraídos de las chimeneas

La profundidad de carbonatación obtenida (por medio del método de la fenolftaleína), de los testigos evaluados en diferentes zonas y alturas de la estructura, indican que el concreto ya no cuenta con propiedades adecuadas para detener los agentes agresivos del ambiente. Los valores obtenidos en algunas muestras de concreto indican una disminución de pH 13 a pH 8-9 (ver Figuras 11 y 12).



Figura 10. Testigos (corazones de concreto) para Carbonatación

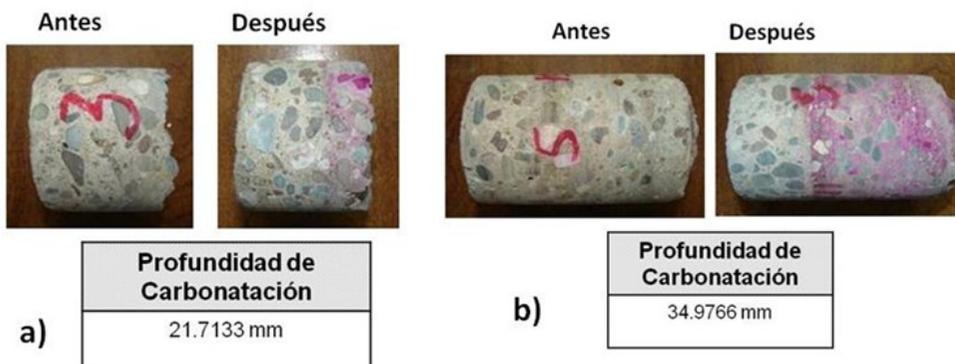


Figura 11. Profundidad de Carbonatación. Chimenea Peletizadora (Nivel Base), a) Testigo 3 y b) Testigo 5

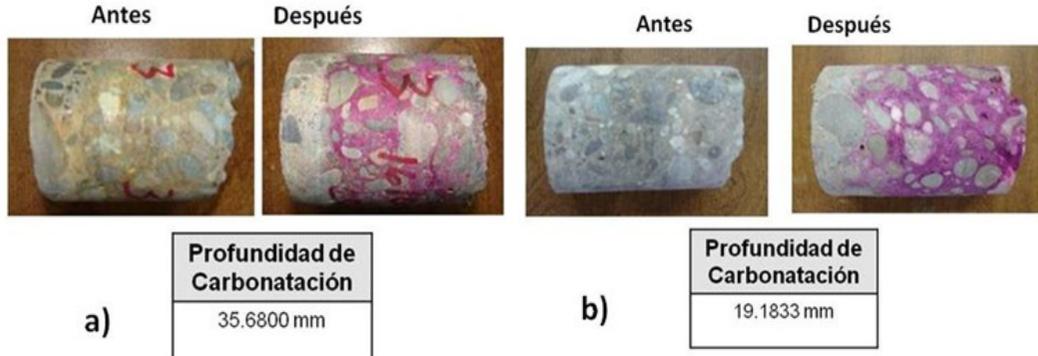


Figura 12. Profundidad de Carbonatación. Chimenea Coquizadora (Nivel 4-6 m), a) Testigo 3 y b) Testigo 10

2.5.1. Carbonatación *in situ*

Con la finalidad de visualizar *in situ*, el efecto de la carbonatación en el concreto de las chimeneas de la planta Siderúrgica, se aplicó en diversas zonas fenolftaleína (Figura 13), y se observó que si existe un deterioro del concreto por efectos del CO₂ y la humedad relativa, y que es consecuencia del medio circundante, donde están ubicadas las chimeneas.



Figura 13. Aplicación de Fenolftaleína en la Chimenea de la planta de Peletizado, Nivel 1.20 m, y resultados de la pérdida de alcalinidad de la estructura

2.6. Porcentaje de Cloruros

La corrosión del acero de refuerzo existente dentro del concreto se origina por la presencia exclusiva de oxígeno y humedad en las proximidades de las barras, y la existencia de cloruros libres en el medio que las rodea es un desencadenante del proceso.¹⁶

Los cloruros pueden estar presentes desde el inicio en la mezcla de concreto fresco (disueltos en los agregados, en los aditivos o en el agua). Se refieren como *cloruros totales calculados* y se expresan como el porcentaje de ion cloruro respecto al peso de cemento, y deben limitarse.

El ion cloruro puede también penetrar posteriormente al interior del concreto por difusión desde el exterior, en cuyo caso el riesgo de corrosión se incrementa grandemente.

Los cloruros totales en el concreto se pueden subdividir químicamente en ligados y libres. Esta distinción resulta importante ya que son los cloruros libres los responsables de la corrosión del acero de refuerzo.

Los cloruros ligados son los que están íntimamente asociados al cemento hidratado y no son solubles en agua, por lo que no causan corrosión; por lo tanto, los límites en las especificaciones deben aplicarse al contenido de cloruros libres en lugar de al contenido total o soluble en ácido. No obstante, con los datos de las actuales investigaciones no es posible calcular con precisión su proporción en relación con el contenido total de cloruros, ya que varía con los cambios en el contenido de cloruros totales, aunque, considerando que el cloruro libre es soluble en agua, se lo puede extraer y así determinar su proporción.

Para determinar el porcentaje de cloruros de las chimeneas, se procedió a obtener polvo de concreto de los testigos (ver Figura 15).



Figura 15. Equipo para determinar cloruros

El contenido crítico de cloruros solubles en el concreto, que en un momento dado representa condiciones propicias para que se produzca corrosión en el acero de refuerzo, suele llamarse “*umbral de riesgo de corrosión por cloruros*”, y puede variar de acuerdo con numerosos factores.^{17,18}

En cuanto al sistema de refuerzo del concreto, hay que distinguir entre el reforzado y el presforzado, pues en este último los efectos de la corrosión son más drásticos por el reducido diámetro del acero de presfuerzo, por la elevada pérdida de capacidad estructural y porque el acero sometido a altos niveles de esfuerzo resulta más susceptible a la corrosión. Por consiguiente la concentración tolerable de cloruros en el concreto recién mezclado debe ser menor en el caso del concreto presforzado.

Para tomar en cuenta lo anterior, en el informe del Comité ACI 201 sugieren los siguientes contenidos máximos permisibles de ión cloruro en el concreto antes de ser expuesto a servicio, expresados como porcentaje en peso del cemento:

- Concreto presforzado: 0.06%
- Concreto reforzado: 0.15%

En una revisión nacional de dicho informe, menos conservadora, se proponen los contenidos máximos permisibles de cloruro, aplicables al concreto recién mezclado, pero un concreto ya expuesto deberá de tener un límite de al menos 0.4% de cloruros.

Para determinar el porcentaje de cloruros se obtuvieron tres muestras a diferentes profundidades, de cada uno de los testigos. Estas mediciones se pueden observar en la Tabla 6.

Los valores obtenidos de cloruros están por debajo del límite establecido, solamente algunas muestras alcanzaron 0.1%.

Planta/Testigo		Muestra 1 (%)	Muestra 2 (%)	Muestra 3 (%)
Coquizadora	3	0.028	0.019	0.015
	10	0.048	0.015	0.0061
Peletizadora	3	0.024	0.0067	0.0096
	5	0.107	0.044	0.043
	8	0.023	0.014	0.022
	9	0.049	0.011	0.041

Tabla 6. Valores de % de Cloruros

3. Conclusiones

- Los resultados de Potenciales y de velocidad de corrosión, indican que las Chimeneas tiene problemas de corrosión como consecuencia de que el concreto presenta un nivel de carbonatación elevado, y ello hace que el mismo concreto se vaya desprendiendo, y ocasione que el acero quede expuesto, permitiendo que se presente la corrosión en el componente metálico. El nivel de cloruros es bajo en el concreto, aunque debe de considerarse que solamente se realizaron mediciones hasta cierto nivel, no en toda la estructura.
- En términos de “durabilidad”, la estructura por estar carbonatada, se encuentra en condiciones desfavorables para desempeñar las funciones para las que fue construida.
- Los potenciales de corrosión de acuerdo con ASTM C-876, indican incertidumbre de corrosión, y bajo los criterios de DURAR representan una corrosión localizada, siendo el riesgo de daño de moderado a alto.
- El nivel de corrosión es considerado elevado en ciertas zonas.
- La profundidad de carbonatación obtenida de los testigos, indica que la mayoría de las estructuras presentan problemas de carbonatación, por lo cual ya perdió su alcalinidad.

- Los valores obtenidos de cloruros están por debajo del límite establecido, solamente algunas muestras alcanzaron un 0.1%.
- Cuando el concreto pierde su característica protectora hacia el acero, este material comienza a presentar corrosión, misma que se ha observado en diversas zonas, niveles y sitios evaluados en la estructura.
- Es importante tomar en cuenta que estas Chimeneas se encuentran en un ambiente marino-industrial, y es importante observar los niveles de humedad relativa, dirección y velocidad del viento. Los lados más afectados son el Sur y el Oeste, para las dos chimeneas.
- Las reparaciones de concreto observadas en la chimenea de la planta de peletizado, están mal realizadas, porque solamente se realizaron parcheos en las zonas donde se desprendió el concreto, y además no existió limpieza del acero.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo en los trabajos de campo a los técnicos académicos del CIMAV., M.C. Víctor Orozco Carmona, M.C. Juan Pablo Flores. y Lic. Jair Lugo Cuevas.

Los autores agradecen el apoyo a la UANL - Cuerpo Académico UANL-CA-316 y al proyecto Promep /103.5/12/3585. (UANL-PTC-562).

Referencias

1. ACI Committee 201. *Guide to durable concrete*. Report ACI 201R, American Concrete Institute, Detroit, EUA. 1982.
2. Helene P, Pereira F. *Manual de Rehabilitación de Estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección*. Rehabilitar Red Temática XV.F CYTED. Primera edición 2003: 39-44.
3. Helene P. *La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón*. Hormigón, AAT. Mayo-Agosto 1983; 10: 25-35.
4. Castro BP, Sanjuán BMA. *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. IMCYC. Primera Edición 2001: 1-2.
5. Andrade C. *Manual-Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España. 1989.
6. DURAR. *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura. CYTED. 1997.
7. Sulaimani AL, Kaleemullah J, Bsulbul M, Rasheeduzzafar A. *Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members*. ACI structural Journal. March-April 1992: 220-231.
8. Andrade C. *Vida útil de las estructuras de hormigón armado: obras nuevas y deterioradas*. Seminario Internacional EPUSP/FOSROC sobre patología das estruturas de concreto-Uma Visao moderna. Anis. San Paulo. 1992: 16.
9. ASTM C876-91 (reapproved 1999). *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.

10. ASTM Standard G 57. *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method.*
11. Stern M, Geary AL. *Electrochemical Polarization: I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves.* J. of the Electrochemical Society. 1957; 104(1): 56-63. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2428496>
12. Ho DWS, Lewis RK. *Carbonation of concrete and prediction.* Cement and Concrete Research. 1987; 17(3): 489-504. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(87\)90012-3](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(87)90012-3)
13. Moreno El. *Carbonation of Blended-Cement Concretes.* Tesis de Doctorado, University of South Florida, Florida, Estados Unidos de América. 1999.
14. Alonso C, Andrade C. *Life time of rebars in carbonated concrete.* En Proceedings of the 10th European Corrosion Congress, trabajo No. 165, Barcelona, España. 1993.
15. González JA, Benito M, Bautista A, Ramirez E. *Inspección y diagnóstico de las estructuras de hormigón armado.* Rev Metal Madrid. 1994; 30: 271.
16. Keer JG. *Surface treatments.* En *Durability of Concrete Structures-Investigation, repair, protection*, Mays G. (Editor), E&F Spon, Londres, Reino Unido. 1992: 143-157.
17. Castro Borges P. (1995). *Difusión y corrosión por iones cloruro en el concreto reforzado.* Doctoral dissertation, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
18. Castorena J, Pérez JL, Borunda A, Gaona C, Torres-Acosta A, Velázquez I et al. *Modelación con elementos finitos del agrietamiento en el hormigón por corrosión localizada en la armadura.* Revista Ingeniería de Construcción. Abril 2007; 22(1); 35-42.