



Deterioro por corrosión de elementos de concreto armado de un edificio industrial

G. F. San Miguel¹, P. V. Tamez¹, M. R. Alvarado², R. G. Alcorta¹, R. M. Garza², J. P. Farias¹

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, FIC, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, México.

²Av. El Roble #660, Col. Valle del Campestre, San Pedro Garza, Nuevo León, C.P. 66265, México

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i3.38>

Artículo recibido el 05 de Julio de 2012 y revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 18 de Septiembre de 2012.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el segundo número del año 2013 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2013

RESUMEN

La corrosión de las estructuras de concreto armado se acentúa cuando son colocadas en ambientes con microclimas extremadamente agresivos. La habilidad para evaluar la corrosión de las varillas de refuerzo en estas estructuras y poder estimar la vida en servicio remanente es tema de estudios en muchas partes del mundo. Este trabajo muestra la importancia de implementar una metodología de inspección y diagnóstico que genere, a través del empleo de equipos especializados y tecnología de punta, datos confiables que permitan el desarrollo de procesos de planeación en las intervenciones de rehabilitación y/o mantenimiento de los elementos de concreto reforzado. El conjunto de resultados permitió la optimización de recursos humanos y materiales del usuario final.

Palabras Clave: corrosión; concreto armado; evaluación; reparación.

ABSTRACT

Corrosion of reinforced concrete structures (RCS) is accentuated when there are placed in environments with extremely aggressive microclimates. In many parts of the world, the ability to evaluate the corrosion of rebars in these RCS and estimate the remaining service life is subject of study. This work shows that the implementation of an inspection and diagnosis methodology must generate reliable data, through the use of specialized equipment and technology. Additionally, the development of planning processes in rehabilitation interventions and/or maintenance of reinforced concrete elements should be privileged. The results obtained allowed the optimization of human and material resources of the end user.

Keywords: corrosion; reinforced concrete; evaluation; rehabilitation.

Autor de contacto: Gerardo Fajardo San Miguel (gerardo.fajardosn@uanl.edu.mx)

© 2012 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 2, No. 3, Septiembre - Diciembre 2012, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2012.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUCCIÓN

El costo anual estimado de mantenimiento y conservación de una estructura representa cerca del 2% de la inversión inicial, considerando la operación en una atmósfera promedio. Sin embargo, cuando se trata de estructuras sometidas a ambientes en los cuales se tiene una concentración de cloruros y dióxido de carbono muy superior a la media, el problema se manifiesta de forma pronunciada. Se ha visto que los problemas de corrosión en este tipo de estructuras pueden ser muy graves y que las reparaciones posibles de realizarse en las mismas pueden ser en ocasiones costosas e inclusive en algunos casos no ser las más adecuadas técnicamente o no incluir criterios relacionados con la durabilidad de los elementos (Troconis de Rincón, 1991; Troconis de Rincón, 2003; Sanchez, 2005).

En un ambiente agresivo los agentes químicos como los cloruros (Cl^-) o el dióxido de carbono (CO_2) se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento de concreto por la red de poros interconectados hasta llegar a los alrededores del acero de refuerzo. Una vez que los agentes químicos penetran en el concreto y que la capa pasiva es destruida, el acero embebido en el concreto se corroe y se forman productos de corrosión (óxidos Fe_3O_4 o hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_2$) en el perímetro de la armadura. El volumen ocupado por dichos óxidos (o hidróxidos) puede llegar a ser de hasta 7 veces mayor que el que ocupaba el acero original (Mehta, 2001), creando presiones contra el concreto que rodea al acero, la formación de grietas y los consecuentes desprendimientos del concreto. Estas grietas y/o desprendimientos del recubrimiento de concreto, además de ser antiestéticas, pueden disminuir el anclaje del acero, la adherencia de éste y potencialmente la resistencia del elemento estructural.

En este sentido, se ha comprobado la importancia de efectuar un seguimiento del proceso de corrosión, aún antes de detectar signos visibles como manchas, grietas, desprendimientos del concreto que rodea al acero o cualquier otro signo de deterioro de la estructura, que en la mayoría de los casos se presentan en un estado avanzado de deterioro. En general, una evaluación del estado de corrosión de los elementos de concreto reforzado resulta en una planeación de las intervenciones disminuyendo los costos de mantenimiento, optimizando los recursos propios de la empresa (tiempos, infraestructura, personal, etc.) y aportando soluciones con bases técnicas.

Los resultados obtenidos representaron para la empresa un impacto importante en sus procesos de planeación de las intervenciones que se realizan sobre los elementos de concreto reforzado que sufren deterioro por corrosión. De tal forma que la selección de materiales y metodologías de reparación de los diversos elementos de concreto que conforman la infraestructura del edificio de esta empresa pudo ser evaluada.

2. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

2.1. Selección de la muestra representativa de elementos de concreto armado.

Se llevaron a cabo una serie de reuniones técnicas con el objetivo de definir las estrategias para evaluar la efectividad de las reparaciones realizadas a diversos elementos estructurales de concreto armado del edificio en cuestión. Para ello se tomando en cuenta los siguientes criterios: periodo y frecuencia de reparación de los elementos, zonas donde se presentaron fallas estructurales, zonas donde se presentan cargas excesivas y ambientes agresivos, y los diferentes tipos de materiales constructivos utilizados en las reparaciones. En la Tabla 1 se muestra el tipo de estructura, algunas particularidades del ambiente, la fecha de reparación y la nomenclatura utilizada para la identificación de cada uno de los elementos evaluados seleccionados como una muestra representativa del total de elementos que conforman el edificio. Como se puede constatar, se evaluaron un total de 12 columnas y 4 vigas de concreto armado.

Tabla 1. Descripción de los elementos estudiados y particularidades de la zona en la que se encuentran.

#	Tipo de elemento	Particularidades del ambiente	Fecha de reparación	Nomenclatura
1	Columna	Temperatura y HR elevadas, exposición frecuente a soluciones conteniendo cloruros	05/01/1997	N5
2			06/01/1997	N9
3			25/08/1998	M19
4	Viga	Temperatura y HR cercana a la ambiental, exposición frecuente a soluciones conteniendo cloruros	20/08/1998	MN17
5			2006	N7-5
6			2004	N9-7
7			2005	N10-9
8	Columna	Vapor de agua, vibraciones y exposición predominante a CO ₂	1976	I13
9			12/08/1998	J15
10	Columna	Temperatura y HR elevada, exposición predominante a CO ₂ y vibraciones.	14/01/1997	Q5
11			25/08/1998	O7/2
12			27/07/1998	O9
13			17/01/1997	R6
14	Columna	Temperatura y HR elevada, exposición predominante a CO ₂	30/01/1997	D12
15			06/02/1997	D15
16			08/09/1998	A16

2.2. Inspección, evaluación y diagnóstico

Los procedimientos aquí descritos fueron realizados sobre las cuatro caras (NORTE, SUR, ESTE y OESTE) de cada uno de los elementos. En total fue evaluada una superficie aproximada de 80.0 m² de concreto, sobre las cuales se llevaron a cabo dos etapas. La primera constituyó una inspección visual general del edificio para disponer en su momento de datos de primera mano acerca de las dimensiones de los elementos, accesibilidad, y prever el equipamiento necesario para realizar las subsecuentes operaciones de evaluación y diagnóstico. Con la información recabada, se procedió con la segunda etapa en la cual se realizó un análisis para desarrollar la metodología de intervención que incluyó el levantamiento visual de daños y ensayos físico-químicos del tipo semi y no destructivo. A continuación se detallan algunos aspectos relevantes del procedimiento utilizado.

Generalidades sobre el ambiente de exposición.

No obstante, al interior del mismo, los elementos de concreto armado se encuentran expuestos a microclimas característicos que propician ambientes extremos de exposición en la mayor parte de las zonas evaluadas. Dichos microclimas son propios de los procesos de producción de la empresa y se encuentran caracterizados por ambientes con alta concentración de sales (como depósitos calcáreos), cloruros, dióxido de carbono; aunado a zonas con temperaturas próximas a los 60°C y humedad elevada.

Inspección visual

Sobre todos y cada uno de los elementos a evaluar se realizó una inspección visual previa limpieza superficial utilizando chorro de arena. La inspección consistió en reproducir las dimensiones del elemento, representar los daños físicos como agrietamientos y botaduras del concreto, realizar anotaciones relacionadas con las condiciones de exposición del elemento, estimar mediante el detector de acero la distribución del armado correspondiente, el diámetro del mismo y el espesor del recubrimiento de concreto. Lo anterior siguiendo las recomendaciones especificadas en el Manual de DURAR (Troconis de Rincón, 1997). Adicionalmente, este procedimiento permitió también identificar las zonas sobre las cuales se realizaría la conexión eléctrica para llevar al cabo las pruebas electroquímicas. En la Figura 1 se presenta el procedimiento utilizado para realizar las mediciones electroquímicas.

Mediciones electroquímicas in situ

Las mediciones del potencial (E_{corr}) y la velocidad de corrosión (i_{corr}) fueron realizadas con el sistema GalvaPulse, el cual consta de una computadora PSION con el programa FORCE para control, aplicación y registro de datos; y un circuito electrónico conteniendo el generador del

pulso galvanostático. La interface entre el equipo y la estructura se establece con un sensor (véase Figura 1d) el cual tiene integrado y un electrodo de referencia de calomel saturado (SCE, de sus siglas en inglés), y un electrodo auxiliar de acero inoxidable. Previo a la medición, se llevó a cabo una humectación superficial del concreto rociando agua tres veces durante 5 minutos cada 10 minutos (véase Figura 1c).

a) Potencial de corrosión

La detección del proceso de corrosión utilizando medidas del potencial de corrosión del acero es una de los primeros métodos utilizados cuando se busca realizar un diagnóstico de las estructuras de concreto reforzado. La técnica es muy conocida y ha sido objeto de una normalización en la ASTM C-876 (ASTM, 2009) y de recomendaciones elaboradas por reconocidos investigadores reflejadas en la RILEM TC 154-EMC (RILEM, 2003) y DURAR (Troconis de Rincón, 1997). La técnica permite localizar las áreas anódicas y catódicas de las armaduras de acero midiendo la diferencia de potencial con respecto a un electrodo de referencia localizado en la superficie del concreto. Hay que recalcar que la medida aporta principalmente la probabilidad de que el fenómeno de la corrosión este presente sobre el acero localizado en la superficie perpendicular en la cual se presenta el potencial más bajo.

Existen diversos criterios que han sido propuestos para la interpretación de las medidas del potencial de corrosión. Sin embargo, una interpretación estricta resulta difícil debido a que existen varios parámetros que tienen una influencia sobre este valor. En la Tabla 2 se muestran los valores referenciales que representan las condiciones de riesgo tomando en consideración algunos de los parámetros ambientales que rodean a la estructura. Tomando en cuenta la inspección visual, las condiciones ambientales encontradas en las inmediaciones de los elementos y la experiencia recabada; valores más negativos que -250mV vs SCE fueron considerados como indicativos de un elevado riesgo de corrosión generalizada.

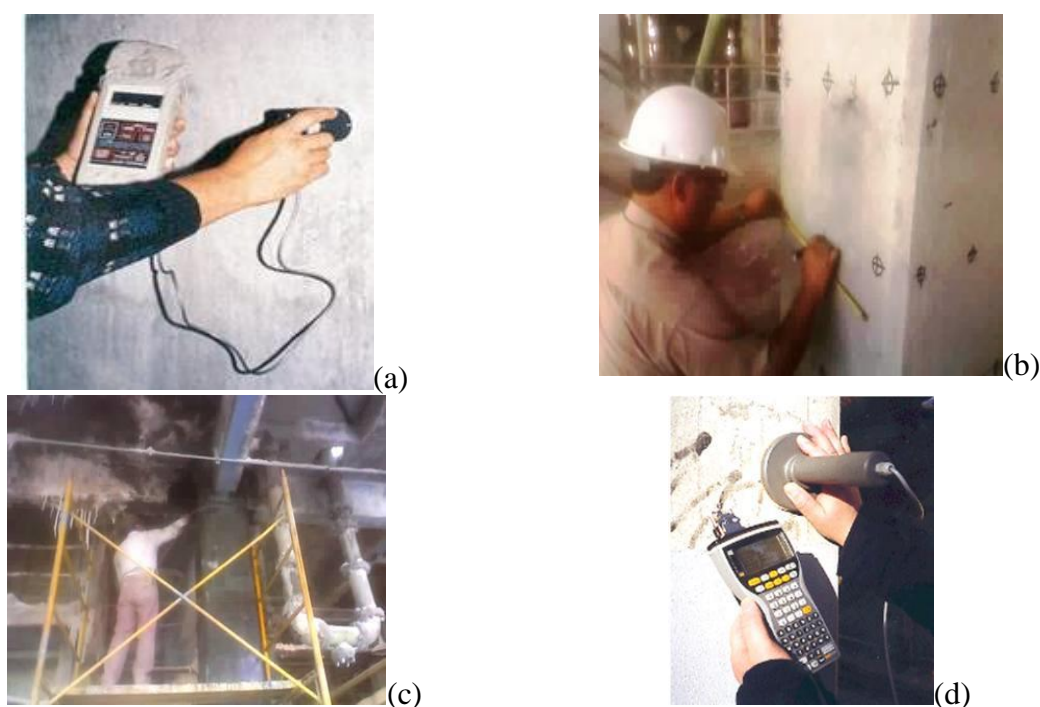


Figura 1. Procedimiento para a) detección y ubicación del acero de refuerzo, b) determinación de los puntos de mediciones electroquímicas, c) humectación de los elementos y c) medición del potencial y velocidad de corrosión.

Tabla 2. Criterios de potencial de electrodo según DURAR (Troconis de Rincón, 1997).

Condición del acero	Potencial E_{corr} vs SCE (mV)	Observaciones	Riesgo de daño
Estado pasivo	+120 a -120	Sin Cl ⁻ pH > 12,5 H ₂ O, (HR↑)	DESPRECIABLE
Corrosión localizada	-120 a -520	Cl ⁻ , O ₂ , H ₂ O (HR↑)	ELEVADO
Corrosión generalizada	-70 a -520	Concreto carbonatado O ₂ , H ₂ O, (HR↑)	MODERADO A ELEVADO
	+ 270 a -70	Concreto seco y carbonatado O ₂ , (HR↑)	BAJO
	-250 a -520	Concreto carbonatado o Cl ⁻ elevados H ₂ O, (HR↑)	ELEVADO
Corrosión generalizada	< -520	↑Cl ⁻ , ↑H ₂ O O ₂ indisponible	DESPRECIABLE

b) Velocidad de corrosión

La evolución de la cinética (velocidad) de corrosión del acero de refuerzo embebido fue determinada con la técnica de Pulso Galvanostático. Sin importar la técnica que se utilice, el valor de corriente obtenido es llamado densidad de corriente y expresado en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Varios criterios han sido retenidos (véase Tabla 3) para clasificar los valores de i_{corr} , no obstante, el que permanece como el más utilizado es propuesto por Andrade et al. (Andrade, 1986).

Tabla 3. Criterios de velocidad de corrosión (Andrade, 1986).

i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}$	Estado de la armadura
< 0.1	Pasivo
0.1 a 0.5	Corrosión débil
0.5 a 1.0	Corrosión moderada
> 1.0	Corrosión elevada

En nuestro caso, una vez realizada la conexión y asegurada la continuidad eléctrica (medición directa de la continuidad con el voltámetro) entre dos armaduras localizadas en diferentes aristas de un mismo elemento, se procedió según la norma ASTM C-876 (para las mediciones de E_{corr}) y según las recomendaciones de la RILEM TC 154-EMC: “Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion” (para la obtención de los valores de i_{corr}). Los parámetros de operación (intensidad de corriente y tiempo de aplicación del pulso de corriente, principalmente) fueron ajustados previas mediciones de puesta a punto realizadas sobre cada cara del elemento a evaluar. Las lecturas de potencial y velocidad de corrosión fueron registradas automáticamente para su posterior tratamiento.

c) Elaboración de mapas equipotenciales e isocorrientes de corrosión

Con las lecturas de cada uno de los puntos de la malla trazada sobre cada cara de los elementos se procedió a su tratamiento para la elaboración de los consecuentes mapas de equipotenciales, que en conjunto con los mapas de isocorrientes de corrosión permitieron la definición de las zonas preferenciales de extracción de núcleos de concreto. Cabe mencionar que se estableció

previamente no extraer más de dos núcleos por elemento de concreto armado. No obstante, la localización del sitio final de extracción del núcleo o corazón de concreto podría diferir de la inicialmente determinada por los mapas debido a la accesibilidad del equipo de extracción de corazones.

Muestreo y mediciones en laboratorio

Los mapas equipotenciales evidenciaron zonas de degradación preferencial, las cuales fueron jerarquizadas, procediendo a la selección de dos zonas de extracción de núcleos por elemento (i.e. una zona por cara). Sobre los núcleos extraídos se llevaron a cabo pruebas de resistividad eléctrica, determinación del espesor carbonatado y obtención del contenido de cloruros.

d) Extracción de núcleos de concreto

Sobre cada zona se procedió a la extracción de un núcleo de concreto. Las dimensiones establecidas fueron inicialmente de 7.5cm. (3'') de diámetro por 20cm. (8'') de longitud. Esta última dimensión fue determinada con el objetivo de tener una muestra representativa de las condiciones prevalecientes más allá de la profundidad a la cual se encontraba el acero de refuerzo (que en promedio fue de 8 cm).

e) Resistividad del concreto

La resistividad eléctrica del concreto (ρ , $k\Omega\text{-cm}$) es un parámetro que mide la facilidad con la que se establece la transferencia iónica entre las diferentes zonas (anódica y catódica) que intervienen en el mecanismo de corrosión. A menor resistividad menor oposición al movimiento y viceversa, a mayor resistividad mayor oposición al flujo iónico. En estructuras sanas, la resistividad es influenciada principalmente por la porosidad de la matriz de concreto. En estas condiciones, su valor podría dar una idea de la calidad del recubrimiento de concreto. Por otro lado, en estructuras expuestas a ambientes agresivos, este parámetro estaría principalmente influenciado por las especies iónicas contenidas en el concreto. A pesar de las diferencias entre los valores límite propuestos por los investigadores, existe un acuerdo general: la resistividad eléctrica del concreto puede ser utilizada como un parámetro de evaluación del riesgo de corrosión del acero de refuerzo (Millard, 1989, Morris, 2002 y Fajardo, 2009) utilizando los criterios cuantitativos resumidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de resistividad asociados al estado de corrosión del acero.

ρ ($k\Omega\text{-cm}$)	Corrosión del acero
> 12	Poco probable
5 a 12	Probable
< 5	Segura

La ρ puede ser medida utilizando varios métodos, ya sea sobre probetas o muestras obtenidas en laboratorio, por extracción de núcleos de concreto o sobre elementos estructurales (véase Figura 2). El principio es simple, se trata de hacer pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos y medir la caída de potencial entre ellos. Una señal de corriente alterna es necesaria a fin de evitar una polarización excesiva, así como un buen contacto entre los electrodos y la superficie del material para facilitar el flujo de corriente.

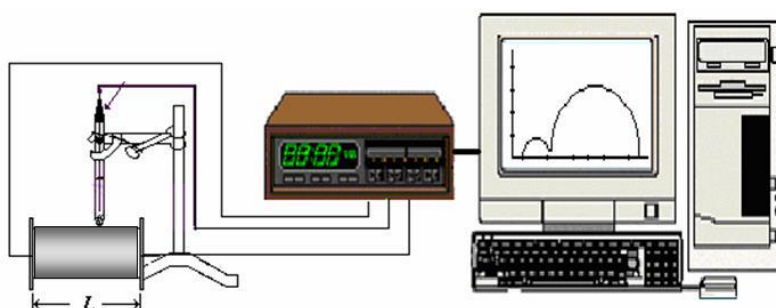


Figura 2. Método utilizado para la medida de la resistividad.

En este trabajo, la resistividad eléctrica fue medida en laboratorio sobre el total de núcleos extraídos utilizando para ello la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, de sus siglas en inglés) en el rango de frecuencias de 100 kHz a 1 Hz y aplicando una amplitud de 10 mV. Esta técnica ha sido empleada para la determinación de la resistividad en laboratorio en otros trabajos (Fajardo et al., 2006 y 2009). Antes de efectuar la medición, se cortó una longitud de 1cm de cada extremo para tener superficies paralelas y después se llevó a cabo un proceso de saturación de agua de la totalidad de los núcleos. Dicho proceso consistió en ponerlos en inmersión en agua potable, hasta que la diferencia entre dos pesos sucesivos fuera inferior a 0.5% del peso inmediato anterior. Esto se realizó con el objetivo de tener un valor representativo en la condición crítica de saturación de humedad. En los extremos de cada núcleo se colocaron dos esponjas saturadas y posteriormente dos placas de acero inoxidable fueron fijadas. Los datos obtenidos fueron tratados con el programa Zview 2.0 para la obtención de la resistencia eléctrica del concreto (R_c), la cual posteriormente fue introducida en la fórmula siguiente para la consecuente determinación de la resistividad:

$\rho = R_c * \frac{A}{L}, k\Omega \cdot cm,$	Donde L es la longitud de la probeta (o núcleo de concreto), A el área transversal y R_c la resistencia eléctrica del concreto obtenida directamente del ensayo de EIS.
---	---

f) Medición del espesor carbonatado

Uno de los objetivos de la obtención de muestras de concreto a través de la extracción de núcleos fue, evidentemente, la cuantificación del nivel de contaminación que presentaban los elementos de concreto reforzado. Principalmente, fueron dos los parámetros medidos: la carbonatación y la concentración de cloruros totales, referidos estos últimos a la dosificación de material cementante utilizado.

Para ello, sobre cada núcleo de concreto se practicó el ensayo de tensión por compresión diametral (comúnmente llamado ensayo brasileño) para obtener dos secciones longitudinales (véase Figura 3). Para determinar el grado de carbonatación del concreto, se mide la profundidad de carbonatación convenida como la profundidad a la cual el pH es inferior a 9. Esta profundidad es evidenciada gracias a un indicador de fenolftaleína que se vaporiza directamente sobre el material. La profundidad carbonatada corresponde al espesor de concreto que no cambia de coloración, después de la aplicación de la fenolftaleína (el concreto no carbonatado adquiere una coloración rosa acentuado).



Figura 3. Núcleo ensayado y aplicación del indicado alcalino.

g) Mediciones de las concentraciones de cloruros

En lo que respecta a la determinación del contenido de cloruros, sobre la sección restante del núcleo se hicieron cortes transversales entre 6 y 8 cm, a partir del extremo más cercano a la interface concreto – medio ambiente. Este intervalo correspondería a la profundidad media en

la cual fue encontrado el acero de refuerzo y que fue medido sobre el conjunto de elementos seleccionados. Las muestras obtenidas de los cortes fueron sometidas a un proceso de molienda y posteriormente los cloruros fueron extraídos en solución mediante digestión ácida (cloruros totales). El contenido de cloruros totales fue determinado por triplicado en la disolución resultante por potenciometría utilizando un electrodo de ion selectivo integrado a un sistema 848 Titropackage plus automático.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Inspección visual y levantamiento de daños

La inspección visual fue realizada sobre cada cara de los elementos seleccionados, reproduciendo los daños percibidos a simple vista sobre esquemas previamente diseñados. En la Figura 4 se muestra un ejemplo del esquema elaborado para la columna N5. En ella se observa el patrón de agrietamientos, el espesor del recubrimiento del concreto, la ubicación de los sitios de extracción de núcleos y las dimensiones del elemento. También se anotan las observaciones realizadas en relación con el ambiente que rodea al elemento.

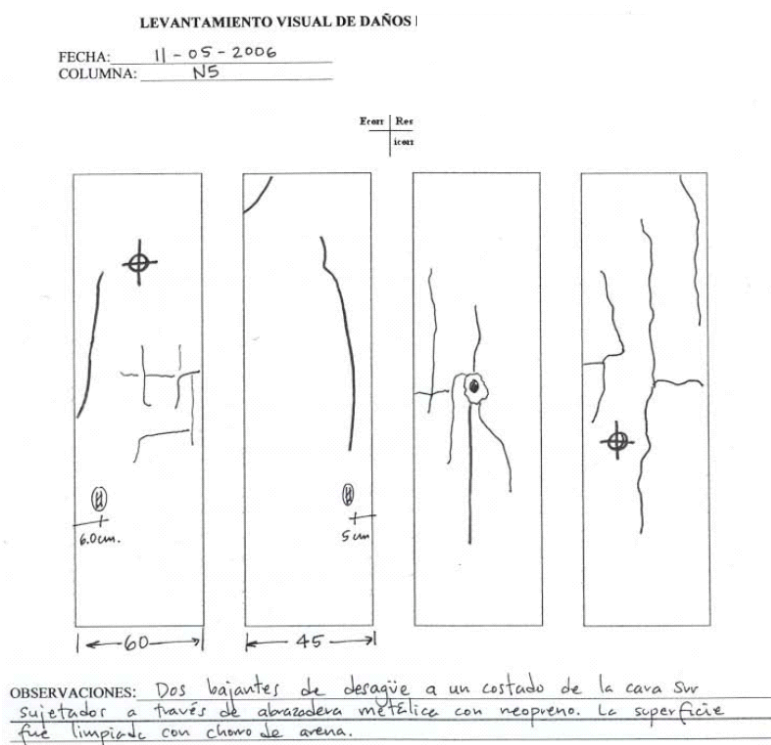


Figura 4. Reproducción de daños y observaciones en la inspección visual del elemento N5.

De manera general un 88% de los elementos evaluados presentaron una morfología de agrietamiento ocasionada por la expansión de los productos de corrosión, manifestándose la mayoría de éstas en la dirección vertical, es decir paralelo al acero principal.

Durante esta fase se constató que existe una variabilidad en ambientes de exposición derivados del propio proceso industrial (alta concentración externa de cloruros, dióxido de carbono, humedad, etc.) lo que permitió mecanismos de corrosión preferenciales en función de estos microclimas. En algunos casos, aunado a este efecto se encontraron elementos expuestos a fuentes externas de calor (desde dispositivos ubicados en las proximidades operando con elevadas temperaturas hasta conductos de vapor fijados a los mismos) y vibraciones. En este sentido, se sabe que la temperatura influye, principalmente, sobre dos parámetros del mecanismo de corrosión: sobre el ingreso o penetración de agentes agresivos facilitando su movilidad y sobre la solubilidad del oxígeno, lo cual permite una disponibilidad suficiente en

la interface acero – concreto. En condiciones de elevada temperatura, el proceso de degradación se ve favorecido, acentuando las manifestaciones del mismo a través de una mayor cantidad de grietas, manchas de corrosión, disminución de la sección transversal del acero, etc.

3.2 Potencial y velocidad de corrosión

En la Figura 5 y 6, se presentan los resultados obtenidos del potencial de corrosión del acero (E_{corr} vs SCE, parte superior de las figuras) y de la velocidad de corrosión (i_{corr} , parte inferior de las figuras) en cada uno de los puntos de la malla en las caras de la columna N5 y de la viga MN17.

El código de colores adoptado para la presentación y análisis de resultados de E_{corr} obedece a los límites comúnmente aceptados para definir las zonas en las cuales los valores de E_{corr} indican una alta probabilidad ($E_{corr} < -250$ mV vs SCE) o una baja probabilidad ($E_{corr} > -250$ mV vs SCE) de corrosión del acero de refuerzo (criterios tomados de la Tabla 2, para corrosión generalizada en ambiente con CO_2 y cloruros). En relación a la presentación de los valores de i_{corr} , se optó por definir cinco intervalos en orden creciente desde 0 hasta $1 \mu A/cm^2$, correspondiendo el intervalo entre 0.8 y $1 \mu A/cm^2$ a la zona en violeta. En elementos cuyos valores fueron mayores a $1 \mu A/cm^2$ se representaron en rosa. Acorde a las previsiones realizadas durante la inspección visual, fue imposible obtener respuesta de algunos elementos debido a que presentaban, como ya se ha mencionado, desprendimiento de prácticamente el 90% del concreto que rodeaba al acero. Esto impidió la continuidad electrolytica del medio, necesaria para la correcta aplicación de cualquier técnica electroquímica.

En lo que al E_{corr} se refiere, se encontró que al menos 40% del total de las lecturas registradas fueron más negativas que -250 mV, llegando en algunos casos a -600 mV, indicativos de una alta probabilidad de corrosión activa en estas zonas. Del total de elementos evaluados, aquellos denominados N5, I13, J15, M19, Q5, D12, O7/2 y R6, fueron encontrados en un estado de mayor probabilidad de corrosión. De manera generalizada, se obtuvieron valores de E_{corr} más negativos que -250 mV en las secciones extremas de los elementos que los conectan con el resto de la estructura del edificio evaluado. Lo anterior, probablemente debido a un proceso de corrosión galvánica derivada de las diferentes condiciones ambientales dentro del concreto que lo rodea (algunas armaduras en concreto sano y otras en concreto contaminado).

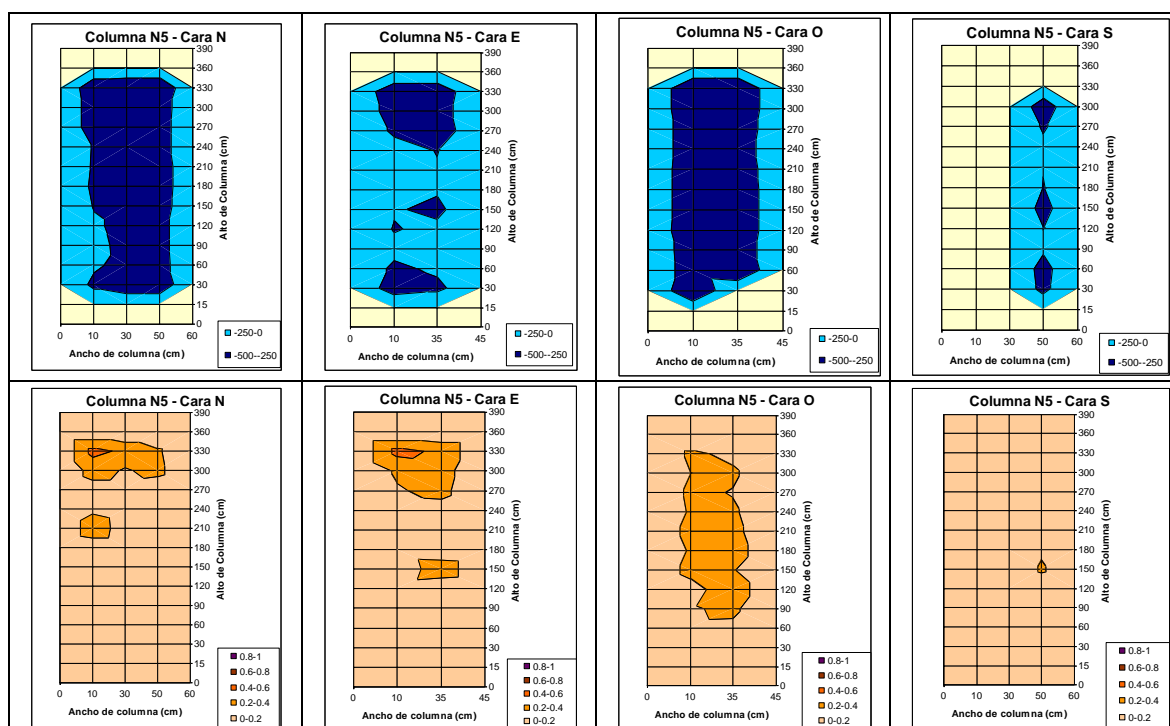


Figura 5. Potenciales y velocidades de corrosión de la columna N5.

Es importante mencionar que los valores de E_{corr} son exclusivamente indicativos de una probabilidad a que el elemento involucrado se encuentre en un estado de corrosión activa o pasiva. En este sentido, los valores de E_{corr} sugieren que se han reunido las condiciones mínimas (principalmente electrolíticas) necesarias para el inicio del proceso de corrosión.

Es así, que para una correcta interpretación de los resultados se recomienda obtener al menos un parámetro electroquímico adicional, en este caso, se trató de la velocidad de corrosión medida instantáneamente en la forma de densidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), y cuyos resultados pueden ser observados en la parte inferior de las figuras antes mencionadas.

Se obtuvieron correlaciones aceptables entre los valores de E_{corr} e i_{corr} medidos. De manera general, se encontraron valores de i_{corr} superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en las zonas que indicaron mayor probabilidad de corrosión. Por el contrario, zonas que en un principio fueron determinadas como de baja probabilidad de corrosión en relación con la E_{corr} medida, presentaron zonas que indicaban una alta velocidad de degradación (i.e. elemento MN17, para el cual el 95% de valores de E_{corr} fue más positivo que -250 mV , presentó valores de i_{corr} del orden de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Lo anterior podría ser debido a que el acero de la columna N17 en continuidad con aquel de la viga MN17 se encuentra en un estado de mayor actividad galvánica.

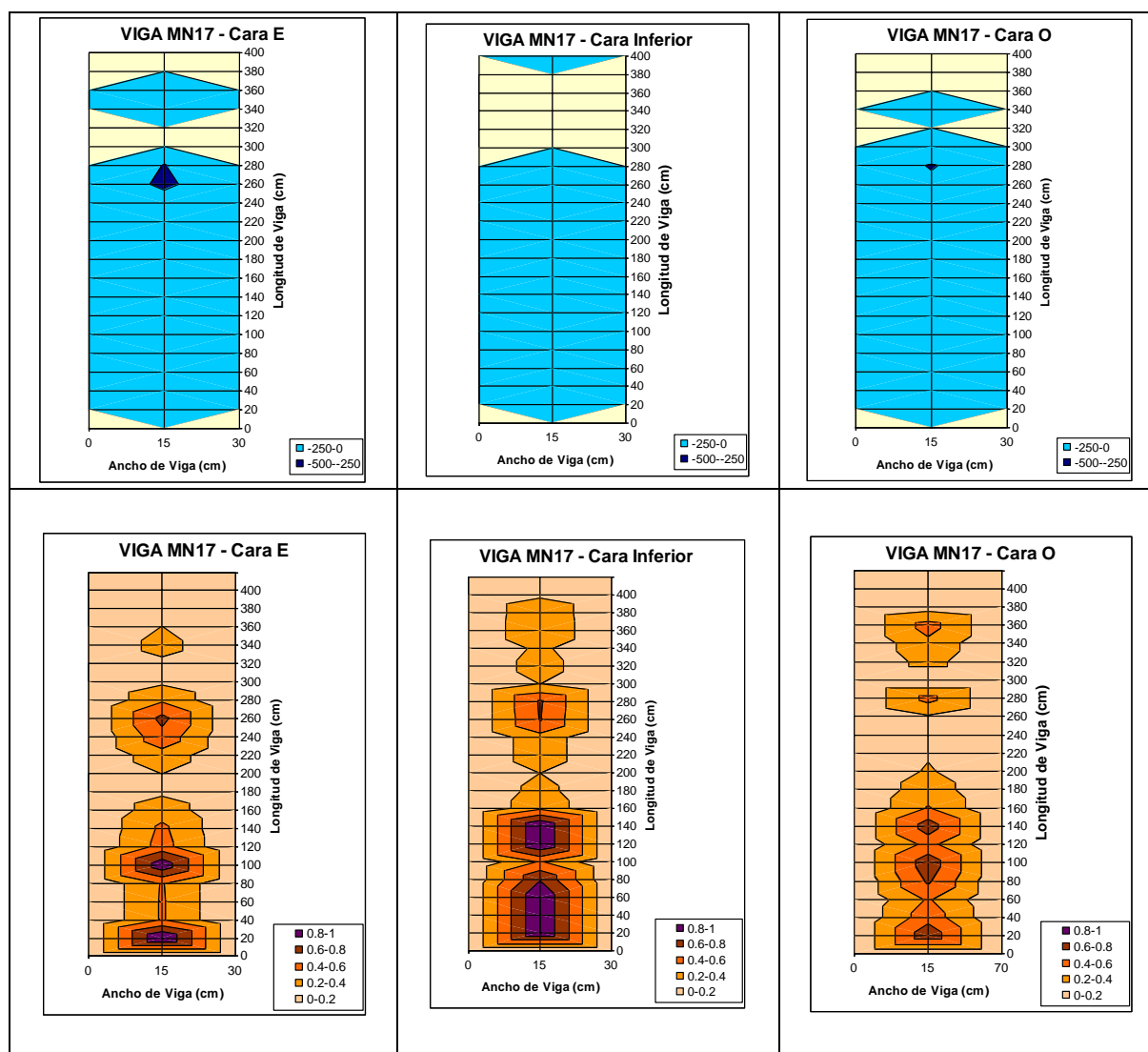


Figura 6. Potenciales y velocidades de corrosión de la viga MN17.

El objetivo de medir la i_{corr} es cuantificar la pérdida de material (en este caso del acero de refuerzo). Con ayuda de la Ley de Faraday se pueden transformar estos valores en pérdida de espesor del acero en función del tiempo:

$\frac{\mu m}{año} = \frac{M}{\delta \cdot n \cdot F} \cdot i_{corr}$	Donde M es la masa atómica del metal, n el número de electrones transferidos, F la constante de Faraday, δ la densidad del metal e i_{corr} la densidad de corriente en $\mu A/cm^2$.
---	---

La vida útil de ese elemento estará determinada por la zona en la cual se presente el máximo valor de velocidad de corrosión. En la Tabla 5 se presentan los valores máximos de i_{corr} , resultado de un análisis llevado al cabo sobre cada uno de los elementos analizados.

Tabla 5. Valores máximos de velocidad de corrosión.

ELEMENTO	i_{corr} , $\mu A/cm^2$	i_{corr} , $\mu m/año$
O7/2	66.3	782
R6	53.2	628
D12	49.7	587
M19	35.8	422
I13	22.7	268
N9	22.6	267
Q5	5.1	60
A16	4.4	52
MN17	3.0	35
N5	0.5	6
O9	0.5	6
J15	0.4	5

De la Tabla 5, se puede constatar que se definen dos grupos de elementos. El 75% de los cuales presentan valores superiores a $11 \mu m/año$ ($1 \mu A/cm^2$) y el restante (25%) cuyo valor es cercano a $5 \mu m/año$ ($0.5 \mu A/cm^2$). También, se puede notar que la máxima i_{corr} fue obtenida de la columna O7/2 ($782 \mu m/año$) lo que representa una pérdida de espesor considerable del acero de refuerzo.

Es importante mencionar que la máxima i_{corr} registrada en la literatura en mediciones de campo sobre estructuras de concreto reforzado expuesta a cloruros ha sido $10 \mu A/cm^2$ (Andrade y Alonso, 1996). En este sentido, visto que el 50% de los elementos analizados presentan valores de i_{corr} muy superiores a $10 \mu A/cm^2$ se puede concluir que el proceso de degradación está fuertemente influenciado por el alto grado de agrietamiento. Bajo estas condiciones el recubrimiento de concreto no es un parámetro que controle el mecanismo de corrosión.

3.3 Resistividad del concreto

En la Figura 7 se muestra el promedio de los resultados de la resistividad eléctrica del concreto medida sobre los núcleos extraídos de los elementos. La línea horizontal punteada presentada en la figura define el límite propuesto para diferenciar la región en la cual la resistividad se constituye como un parámetro que controla el proceso de corrosión (resistividades $> 10 \text{ kohm} \cdot \text{cm}$).

De manera general se observa que la mayor parte de los elementos tienen una resistividad que sobrepasa el valor límite propuesto, llegando a alcanzar valores cercanos a los $90 \text{ kohm} \cdot \text{cm}$. No obstante, solo los elementos designados Q5 cara Oeste (Q5O), N7/9 cara Sur (N7/9S), I13 cara Norte (I13N), A16 cara Norte (A16N) presentan una resistividad por debajo del valor límite.

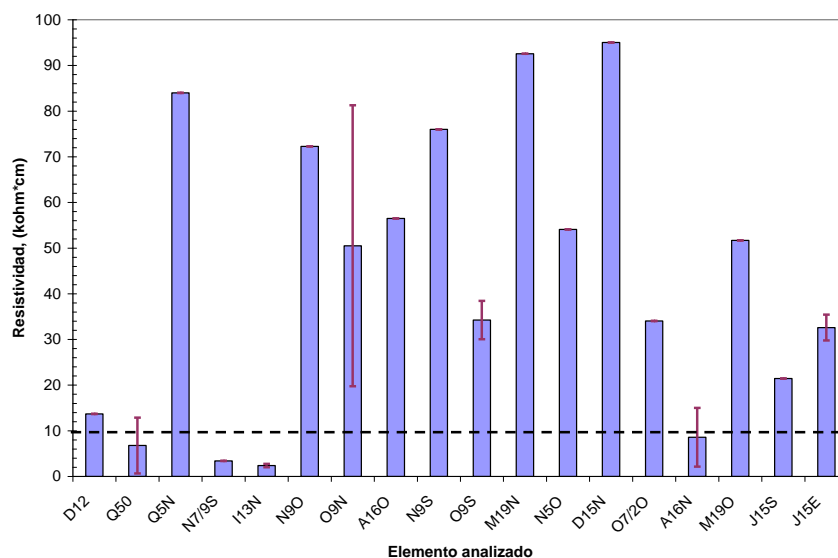


Figura 7. Resistividad medida sobre los núcleos extraídos de los elementos.

La resistividad está influenciada directamente por el proceso de carbonatación, ya que este fenómeno produce compuestos estables que precipitan en los poros del concreto disminuyendo consecuentemente la porosidad del mismo. La carbonatación es un proceso que avanza del exterior hacia el interior de la matriz, por lo que el valor obtenido utilizando el proceso aplicado en este trabajo, involucra tanto al concreto carbonatado como al no carbonatado. Es así que, la resistividad obtenida se presenta como un promedio y un incremento puede atribuirse al efecto de la carbonatación de la matriz.

3.4 Carbonatación y cloruros

Los resultados obtenidos de la aplicación de la fenolftaleína a los núcleos extraídos de las probetas son presentados en la Tabla 6. Las pruebas fueron llevadas a cabo a partir de muestras obtenidas de núcleos de concreto sin grietas aparentes.

Tabla 6. Medición y progresión del avance de la carbonatación de los elementos.

Designación de Especímenes*	Fecha de reparación	Recubrimiento, mm	Espesor carbonatado, mm	Progresión, mm/año ^{0.5}
D12	1997	78	2	0.3
M19O	1998	80	4	0.5
A16O	1998	80	4	0.5
I13N	1976	58	23	0.8
O7/2O	1998	60	12	1.5
J15S	1998	71	13	1.6
D15N	1997	71	15	1.7
N5O	1997	55	17	1.9
N9O	1997	70	17	1.9
Q5N	1997	80	17	1.9
MN17E	1998	50	18	2.2
O9N	1998	65	20	2.5
N7-9S	2004	50	12	5.8

*Los valores presentados corresponden a la Cara en la cual se obtuvo la máxima carbonatación.

Se obtuvieron índices de avance de la carbonatación entre 0.3 (elemento D12) y 5.8 mm/año (elemento N7-9S), para los concretos utilizados en las reparaciones de los elementos estudiados. Por otro lado, el máximo espesor carbonatado se obtuvo en el elemento I13N (23 mm). Dicho elemento fue reparado en 1976, lo cual indica que en términos de progresión del fenómeno se tiene un avance de 0.8 mm/año, cercano a la progresión media obtenida en estructuras de concreto convencional y sometidas a un ambiente urbano - industrial.

Después de haber realizado un examen visual del núcleo de la viga N7/9S (cara Sur), se pudo constatar la existencia de dos tipos de concreto, evidenciada por una junta localizada a 17 cm de la superficie del elemento (correspondiente al concreto utilizado en la reparación efectuada en el 2004). También, se observó la presencia de un agrietamiento interno en el concreto original, probablemente ocasionado por la expansión de los productos de corrosión que generó el estribo, el cual se aprecia en la imagen (véase Figura 8).

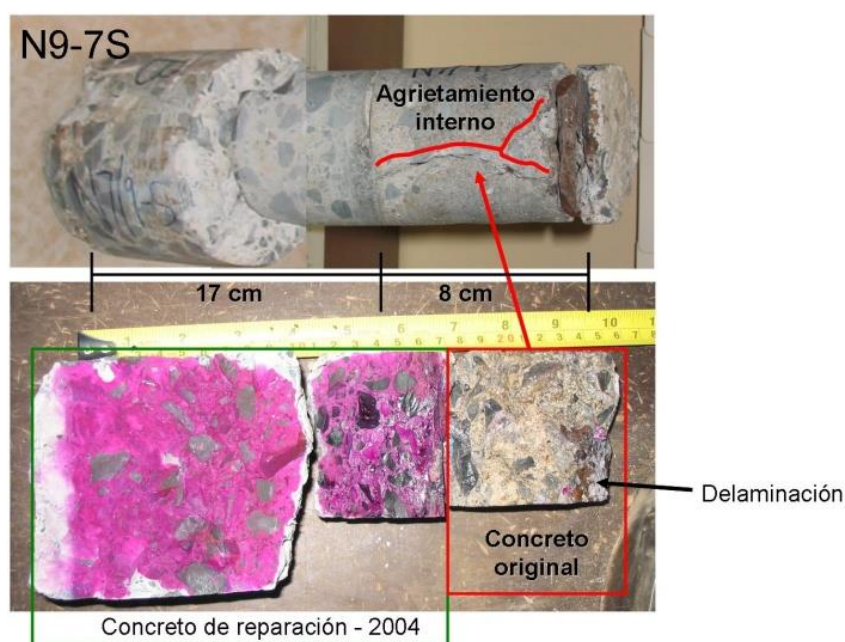


Figura 8. Aplicación de la fenolftaleína para la obtención del espesor carbonatado.

En lo que respecta al espesor carbonatado, a la fecha se presentan 12 mm en el concreto utilizado en la reparación. El concreto original se encuentra totalmente carbonatado y se observa que el acero vertical, ubicado a 25 cm de la superficie exterior del elemento, se encuentra embebido en éste. Dicho acero presentó delaminaciones propias de un estado avanzado de degradación. Basado en lo anterior, se deduce la importancia de las diferentes zonas de exposición dentro de la planta, las cuales generan diferentes microclimas que acentúan el fenómeno de la carbonatación. Sin embargo, del análisis realizado se concluye que la carbonatación no es un parámetro que determina la degradación por corrosión de las columnas evaluadas, no así para las vigas como se ha descrito para el caso de la viga N9-7S.

La Figura 9 muestra los contenidos de cloruros (libres y totales) obtenidos en el conjunto de núcleos extraídos de los elementos analizados. La línea horizontal representa el límite máximo de cloruros libres establecido por el Comité del ACI 318-05 para la protección contra la corrosión del acero de refuerzo en concreto endurecido.

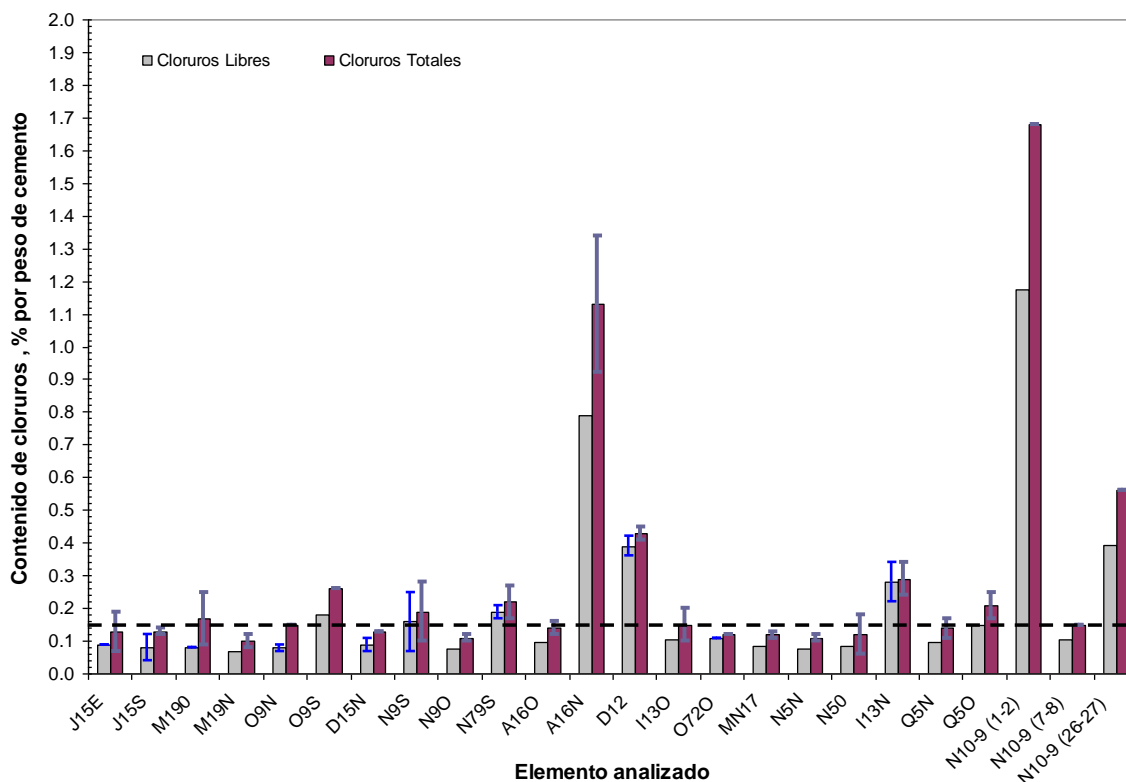


Figura 9. Contenidos de cloruros entre 6 y 8 cm de profundidad hacia el interior del elemento. Adicionalmente, para el elemento N10-9 se obtuvieron contenidos de cloruros en dos secciones: entre 1 y 2 cm de profundidad (interface concreto-medio ambiente) y en la sección final del núcleo entre 26 y 27 cm de profundidad.

Las concentraciones de cloruros libres en la interface acero-concreto variaron entre 0.07 y 0.8% por peso de cemento. Posterior a los análisis químicos para determinar la concentración de los cloruros totales (enlazados + libres), se calcula que el 75% de los cloruros totales se presentan en una condición iónica, siendo ésta la que inicia el proceso de corrosión del acero. Adicionalmente, se constata que el 50% de los elementos analizados (O9, N9, N7/9, A16, D12, Q5, I13 y N10-9) en alguna de sus caras cuenta con la cantidad mínima de cloruros necesaria para el inicio y desarrollo del proceso de corrosión. Es importante mencionar que se estimó un consumo de cemento de 300 kg/m^3 para efectos comparativos. Actualmente, se sabe que en intervenciones recientes se utilizan rangos que van desde los 400 hasta los 500 kg/m^3 de cemento. Esto supone una mayor resistencia a la penetración de cloruros y por ende un mayor tiempo de exposición de los elementos de concreto para sobrepasar los límites considerados como potencialmente dañinos.

En la viga N10-9 (véase Figura 10) se obtuvieron concentraciones de cloruros en diferentes secciones: en la superficie (0-1 cm), en la sección media del concreto de más reciente reparación (6-7 cm) y en la sección interior (24-25 cm) del concreto originalmente colocado. Debido a la condición de exposición, la concentración de cloruros libres en la superficie alcanza un valor de 1.18%, el cual representó el máximo encontrado del total de elementos analizados. En la sección media, se encontró una concentración de 0.19%, inferior al valor obtenido en la superficie. Se asume que esta variación es debida a las características del concreto utilizado en la reparación realizada en el 2005. Sin embargo, la concentración en la sección interior de la viga (0.4%) es superior al límite especificado. Cabe mencionar que, debido al gradiente de concentraciones generado por la elevada diferencia en el contenido de cloruros entre el exterior y la sección media, se presentó un rápido ingreso de cloruros.

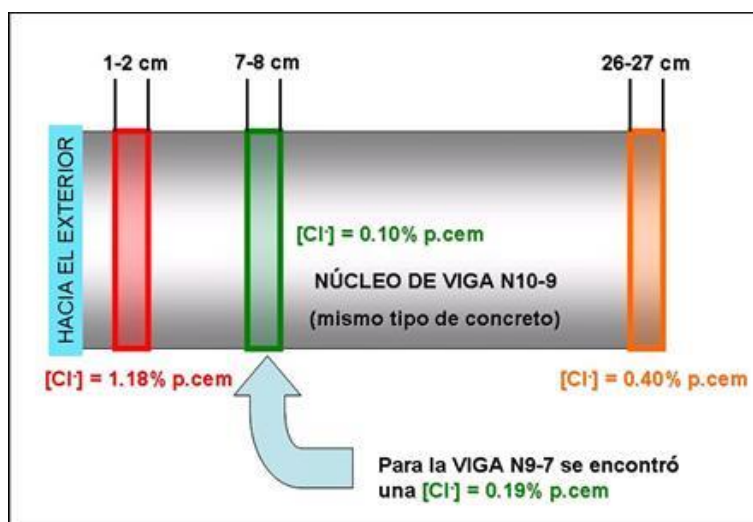


Figura 10. Representación esquemática de las concentraciones de cloruros obtenidas a diferentes profundidades del núcleo de la viga N10-9.

En la práctica, son múltiples las razones por las cuales una intervención no permite cumplir con todos los procedimientos establecidos para garantizar su éxito. Por ejemplo, para el caso particular de las vigas N7-9 y N10-9, se pudo constatar que el concreto original del elemento y que se encontraba carbonatado y/o contaminado con cloruros, no fue retirado. Una vista general de los alrededores de estos elementos evidencia la presencia de una cantidad considerable de válvulas, conductos a presión y equipamiento auxiliar para el adecuado desempeño de la planta. Así mismo, las cargas que actúan sobre los mismos son considerablemente importantes lo que contribuyó a optar por un encamisado con concreto armado sano. Algunos elementos se encuentran restringidos, no solo en espacio sino en tiempo. Aunque se lleve a cabo una programación de las intervenciones algunas veces se dispone de muy poco tiempo para llevarlas a cabo o bien se deben realizar en condiciones de operación continua de la planta, por razones económicas relacionadas a los procesos de producción.

4. CONCLUSIONES

1. Cada elemento de concreto reforzado evaluado se encuentra en una condición de exposición ambiental característica del área del proceso de la planta, esta condición es clasificada como químicamente agresiva, además, algunos de ellos son afectados por fuentes generadoras de vibración, temperatura, vapores y humedad, lo que acelera el proceso de deterioro. Lo anterior se constituye como la principal justificación para la selección de los 16 elementos estudiados.
2. Los elementos evaluados presentan agrietamientos y desprendimientos del recubrimiento de concreto, ocasionado por la fuerza de expansión producida por los compuestos producto del proceso de corrosión. Dichos agrietamientos y desprendimientos provocan que los diferentes agentes agresivos tales como cloruros, bióxido de carbono, sales, humedad, etc., aceleren la destrucción del refuerzo.
3. La carbonatación no es un parámetro que determina el proceso de corrosión en las columnas evaluadas. Sin embargo, en la viga N7-9, se presenta corrosión en el acero utilizado como refuerzo transversal (o también conocido como estribos) ya que el concreto original se encuentra totalmente carbonatado.
4. El 50% de los elementos analizados cuenta con la cantidad mínima de cloruros necesaria para el inicio y desarrollo del proceso de corrosión.
5. Las velocidades de corrosión obtenidas en la condición física actual indican que el 75% de elementos estudiados se encuentran en una condición de elevada velocidad de degradación del acero.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade C., Castelo V., Alonso C. and Gonzalez J.A. (1986) *The determination of corrosion rate of steel embedded in concrete by polarization resistance and AC impedance*, Corrosion Effect of Stray Currents and the Techniques for Evaluating Corrosion of Rebars in Concrete, Ed: V. Chaker, ASTM STP 906, pp. 43 – 63.
- Andrade C. and Alonso C. (1996) *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*, Construction and Building Materials, 10 (5), 315-328.
- ASTM (2009) Standard C-876 *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Philadelphia. USA.
- DURACON Collaboration. Trocónis de Rincón O. and co-authors (2007) *Effect of the Marine Environment on Reinforced Concrete Durability in Iberoamerican Countries: DURACON Project/CYTED*, Corrosion Science, Elsevier Science LTD Publication, Volumen 49, Issue 7, pp. 2832-2843.
- Fajardo G., Escadeillas G., Arliguie G. (2006) *Electrochemical chloride extraction from steel reinforced concrete specimens contaminated from artificial sea-water*, Corrosion Science, 48, 110–125, ISSN: 0010-938X, doi:10.1016/j.corsci.2004.11.015.
- Fajardo G., Valdez P., Pacheco J. (2009) *Corrosion of steel rebar in natural pozzolan based mortars exposed to chlorides*, Construction & Building Materials, 23, Issue 2, 768-774, , ISSN: 0950-0618, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.02.023
- Mehta P.K., Monteiro P. J. M. (2001) *CONCRETE - Microstructure, Properties and Materials*, October, 20.
- Millard S., Harrison J. and Edwards A. (1989) *British Journal Non-destructive Testing*, 31, p. 616.
- Morris W., Vico A., Vazquez M., and Sanchez S.R. (2002) *Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements*, Corrosion Science, 44, pp. 81 – 99.
- RILEM TC 154-EMC: *Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion Half-cell potential measurements*, Elsener B., et al. (2003) *Potential mapping on reinforced concrete structures*, Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 36, August-September, pp 461-471.
- Sanchez M., Troconis de Rincón O., Sanchez E., Garcia D., Sanchez E., Sadaba M., Delgado S. and Troconis de Rincón O. y Miembros de la Red DURAR. Red Temática XV.B. (1997) *Durabilidad de la Armadura. Manual De Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, CYTED ISBN 980-296-541-3. Maracaibo. Venezuela.
- Troconis de Rincón O., Arrieta de Bustillos L., Vezga C. (2003) *Evaluation, Diagnosis and Rehabilitation of Buildings in Rural Environments*, Journal of Architecture & Environment. Vol.2, No. 1, pp. 45-54.
- Troconis de Rincón O., Sánchez M., Pérez O., Contreras D., García O. y Vezga C. (1991) *A Study of Practical Cases of Steel Corrosion in Reinforced Concrete. Causes and Solutions*, Materials Performance, Vol. 30, No. 8, pp. 42-45