

EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS PATRIMONIALES DE HORMIGÓN ARMADO AFECTADAS POR CORROSIÓN POR CLORURO EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Villagrán Zaccardi*, Y.A., Traversa, L.P., Di Maio, A.A., Zicarelli, S.S.

LEMIT, 52 entre 121 y 122 - 1900 La Plata, Argentina
direccion@lemit.gov.ar, yuryvillagran@yahoo.com.ar

RESUMEN

La presencia de cloruro en el hormigón es un factor desencadenante del proceso de corrosión de armaduras. Diversas causas pueden concurrir para que se alcance el contenido límite de cloruro que despasiva al acero empotrado. Entre ellas las características del hormigón de recubrimiento, la agresividad del medio, la calidad constructiva, y los materiales empleados. En este trabajo se presenta una revisión de los parámetros ambientales, locales y de los materiales que deben tenerse en cuenta al momento de evaluar una estructura respecto a la corrosión por cloruro. Se incluyen metodologías y técnicas de evaluación, y su aplicación en estructuras de hormigón armado construidas en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, durante el siglo XX y pertenecientes al patrimonio moderno. Se realizaron relevamientos in situ, mediciones in situ de parámetros de corrosión y extracción de muestras para su evaluación en laboratorio. Los resultados mostraron patologías por corrosión de armaduras vinculadas a la falta de mantenimiento preventivo, falta de control de materiales y ejecución durante la construcción y/o reparación de las estructuras analizadas. Como requerimiento para las reparaciones de este tipo de estructuras se incluyen especialmente las consideraciones del medio circundante.

INTRODUCCIÓN

El hormigón armado es un material empleado fundamentalmente a partir de las primeras décadas del siglo XX. Construcciones de este tipo pueden presentar patologías debido a la corrosión de armaduras, que se manifiesta por diversos mecanismos de trascendencia creciente [1] (Figura 1). Inicialmente las armaduras están pasivas dentro del hormigón, hasta que se pierde la protección química y se inicia el proceso. Con el deterioro ya avanzado, un volumen suficiente de productos de corrosión conduce a la fisuración del hormigón de recubrimiento, perdiéndose la protección física. Si la fisuración avanza sin control, comienza el desprendimiento del recubrimiento y las armaduras se ven más expuestas al medio. Finalmente, ya sea por la pérdida de adherencia entre acero y hormigón o por la pérdida de sección de las armaduras, la estructura colapsa. Generalmente se concibe como límite mínimo del nivel de comportamiento al que produce una fisuración generalizada [2, 3].

El proceso se desarrolla aproximadamente según el modelo propuesto por Tuutti [4]. La vida útil es dividida en dos períodos, uno de iniciación y otro de propagación

(Figura 2). El período de iniciación es el tiempo de incubación de las condiciones necesarias para el comienzo de la degradación. El período de propagación es el tiempo transcurrido entre el inicio del proceso y el momento en el cual el grado de deterioro de la estructura es tal que no cumple con las condiciones de servicio requeridas. En general se concibe como período de iniciación a aquel que se requiere para la despasivación de las armaduras, mientras que los mecanismos de fisuración y desprendimiento del recubrimiento se consideran posteriores.

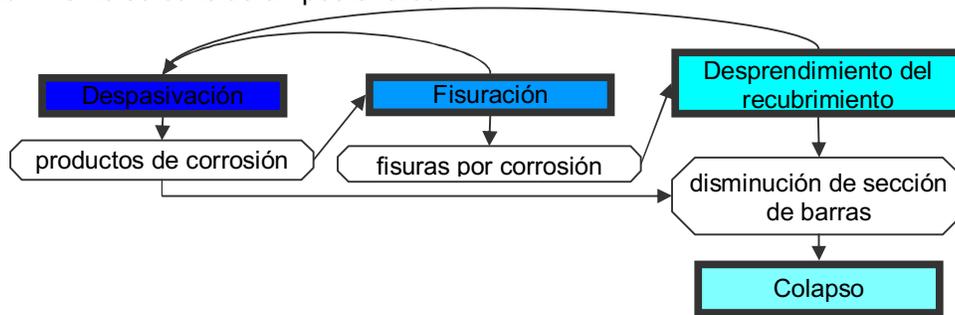


Figura 1. Deterioro del hormigón armado por corrosión de armaduras.

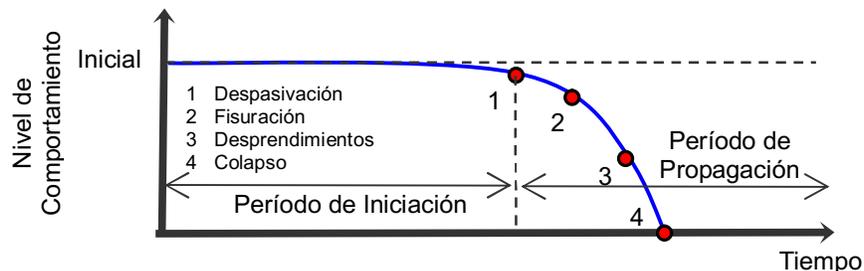


Figura 2. Evolución de la corrosión de armaduras en hormigón armado.

Factores internos y externos que influyen en la duración del período de iniciación. Los factores internos se relacionan principalmente con las características del hormigón de recubrimiento, y son los que determinan la resistencia del material al transporte de materia por su estructura. Los factores externos están determinados por la agresividad del medio [5], caracterizada por la temperatura media y humedad relativa, condición de los vientos y las precipitaciones, distancia y altura respecto al nivel del mar (en el caso de ambiente marino), películas protectoras y revestimientos de la estructura.

Se debe deducir que el alcanzar el fin de la vida proyectada no implica la demolición de una estructura, sino que el costo del mantenimiento a partir de ese momento se incrementa por encima del considerado en el proyecto.

El ambiente con cloruro es de tipo severo respecto a la durabilidad, ya que las sales en el agua y en la atmósfera que rodea a las estructuras interactúan con el hormigón y con las armaduras. El grado de exposición al medio con cloruro puede ser variado y pueden establecerse condiciones micro, meso y macroclimáticas.

Ingreso de cloruro y despasivación de armaduras

El cloruro rompe la capa pasiva del acero en forma localizada posibilitando la corrosión a altas velocidades. Para que esta corrosión localizada (también denominada picado) sea posible, debe alcanzarse una concentración umbral de cloruro en la interfase entre acero y hormigón. Si los materiales constituyentes del hormigón no tienen contenidos de cloruro suficientes para alcanzar este límite, el picado se iniciará recién cuando se aporte suficiente cantidad desde el medio. En procesos avanzados, un contenido muy alto de cloruro puede conducir a una corrosión generalizada. Pero la corrosión por cloruro resulta de gran riesgo antes de que se desarrolle en forma generalizada, incluso antes de que se produzcan fisuras. El volumen de productos de corrosión de picado no es grande y la fisuración del recubrimiento no se da en un período inmediato, a pesar de una sensible disminución de la sección de armadura [6].

Aunque depende de numerosos factores [7] y el tema todavía no ha sido totalmente dilucidado, en general se adopta un contenido de cloruro en el hormigón del 0,4 % en peso del cemento como límite inferior para el inicio del picado [6]. Además se requiere de oxígeno y humedad para la reacción electroquímica de la corrosión.

El tiempo necesario para alcanzar el contenido límite de cloruro en la proximidad de las armaduras depende de la resistencia al ingreso de cloruro que posea el hormigón de recubrimiento. La velocidad de ingreso de cloruro depende de la relación agua/ligante (porosidad) [8], el contenido y tipo de cemento [8], la calidad de la interfase matriz-agregado [9], la porosidad de los agregados [10], el tiempo de exposición, la exudación, el tipo de curado y la altura del elemento estructural [11], temperatura, materiales cementicios suplementarios, y el grado de hidratación del hormigón [12].

La velocidad de ingreso se determina mediante el análisis de la concentración de cloruro a distintas profundidades desde la superficie para un período de exposición dado, obteniendo el denominado perfil de ingreso de cloruro. En hormigones jóvenes debe tenerse en cuenta que el valor de la velocidad de ingreso disminuirá con el transcurso del tiempo [13], pudiendo originar una subestimación importante del período de iniciación cuando se considera solamente el espesor de recubrimiento y la velocidad de ingreso determinada. Entonces, son necesarias evaluaciones a distintas edades, preferentemente con grandes intervalos de tiempo entre ellas, o como alternativa se recurre a datos previos de materiales y ambientes similares.

Por otro lado, la matriz cementícea posee la capacidad de inmovilizar una proporción del cloruro que ingresa. Sólo el cloruro libre (en solución) es perjudicial respecto a la durabilidad de las armaduras. La capacidad de retención tiene una doble influencia sobre el inicio de la corrosión [14]: 1) la velocidad del transporte iónico en el hormigón se reduce; y 2) la cantidad de cloruro libre que se acumula en la superficie del acero de refuerzo y propicia el picado es menor. Esta capacidad presenta una dependencia no lineal de la concentración total, dependiendo además del grado de hidratación y el tiempo, el pH del medio, la temperatura, la humedad relativa y la presencia de otros aniones [15-16].

Parámetros electroquímicos de corrosión

Al evaluar una estructura, se puede establecer su tasa de deterioro mediante el seguimiento en el tiempo de índices de deterioro, extrapolando su tendencia hacia el futuro. Los parámetros electroquímicos evidencian la eventual condición pasiva o activa del acero empotrado en el hormigón en un momento dado.

Potencial de corrosión

El potencial de corrosión es el estado estacionario en el cual se igualan las velocidades de oxidación (anódica) y de reducción (catódica). El potencial electroquímico medido sobre el metal suele corresponder a un potencial mixto resultante de la verificación simultánea de dos o más procesos en condiciones de no-equilibrio. El potencial de corrosión es siempre relativo a un electrodo de referencia. El acero de la armadura en contacto con la solución de poros constituye una hemicelda, que se completa con la del electrodo de referencia para cerrar el circuito de medición.

El potencial de corrosión de la armadura permite identificar en cierto modo si la barra se encuentra pasiva o activa. Su valor depende de muchos factores, y en la práctica resulta indicativo pero no siempre concluyente. En el hormigón armado, el estado de humedad es el parámetro que genera mayor variabilidad en las lecturas [17]. Por esto, se define una probabilidad de corrosión de acuerdo al valor del potencial medido (Tabla 1), aludido siempre a un electrodo de referencia (por ejemplo, versus electrodo de sulfato de cobre, ESC). En estructuras es útil realizar un mapeo de potenciales que determine las zonas más críticas, a partir de la estimación de la probabilidad de corrosión que este valor conlleva de acuerdo a los potenciales de corrosión medidos. El esquema para medir el potencial de corrosión puede verse en la Figura 3.

Debe tenerse en cuenta que la corrosión por picado también es posible para valores de potenciales de corrosión con los cuales la armadura se encontraría pasiva si el cloruro no estuviera presente. De manera que en estructuras en ambiente marino, la corrosión por cloruro no puede ser identificada solamente con mediciones aisladas de potenciales de corrosión.

Tabla 1. Probabilidad de corrosión de acuerdo al potencial de corrosión.

vs. ESC	Probabilidad de corrosión	
Ecorr (mV)	Stratfull (en puentes) [17]	ASTM [18]
-200	0 %	10 %
-240	5 %	
-275	50 %	90 %
-350		
-450	95 %	
-500	100 %	

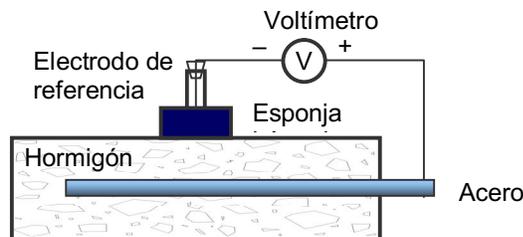


Figura 3. Esquema de medición de potencial de corrosión.

Corriente de corrosión

La medición de la velocidad de corrosión consiste en la comprobación de la densidad de corriente originada en la pila electroquímica de corrosión. Esta corriente resulta proporcional a la velocidad a la cual disminuye el espesor de la armadura, cuando la corrosión se desarrolla uniformemente en la superficie.

Al potencial E_{corr} , corresponde la corriente de intercambio o de corrosión, I_{corr} , o su consecuente corriente por unidad de área, $i_{corr} = I_{corr} / A$. Mientras que E_{corr} es un parámetro termodinámico que determina la estabilidad de las especies (probabilidad de corrosión), I_{corr} es un parámetro que determina la cinética del proceso.

La velocidad de corrosión es también útil en el período de propagación, permitiendo estimar el comienzo de la fisuración del hormigón de recubrimiento al marcar la velocidad de crecimiento del volumen de los productos de corrosión. Entonces, las mediciones resultan estimativas del período a partir del cual puede esperarse daños en la estructura (Tabla 2). La velocidad de corrosión medida no se mantiene constante sino que tiene una tendencia creciente y depende de las condiciones medioambientales. En el caso particular de la corrosión por picado, cuando se toman lecturas experimentales la corriente de corrosión en la zona activa se diluye debido a su relación de áreas con la zona catódica. En corrosión localizada, la profundidad máxima de penetración del picado puede ser entre 3 y 10 veces el valor de la profundidad media de ataque [19].

Una técnica muy utilizada para determinar la velocidad de corrosión es la de la resistencia a la polarización. Esta resistencia es la que ofrece la interfase metal-solución al paso de corriente, y con ella se calcula la corriente de corrosión [6].

Tabla 2. Período esperable de deterioro.

	DURAR [6]	AASHTO [20]
i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Velocidad	Interpretación en Estructuras
0,1	Despreciable	Sin daño esperable
0,2	Bajo	
0,5	Moderado	Daño esperable en 10-15 años
1,0		Daño esperable en 2-10 años
10,0	Alto	Daño esperable en menos de 2 años

Resistividad del hormigón de recubrimiento

La resistividad eléctrica del hormigón influye tanto durante el período de iniciación como en el de propagación. En el período de iniciación se relaciona con las propiedades de transporte del hormigón. En el de propagación las zonas con recubrimiento con menor resistividad son las más susceptibles a corroerse. La resistividad del recubrimiento también es relevante en la reparación estructuras corroídas.

La resistividad del hormigón se encuentra en un rango amplio, de entre 10 y 10.000 $k\Omega \cdot cm$ [21]. Esta condición permite clasificarlo como un semiconductor. La corriente eléctrica a través del hormigón es conducida por los iones disueltos en el líquido

de sus poros [22], pudiéndose asumir a los agregados como eléctricamente inertes. La humedad del hormigón de recubrimiento permite el conductor iónico o electrolito para el transporte de iones entre ánodo y cátodo. La naturaleza electroquímica de la corrosión implica una relación directa entre la velocidad de corrosión y la resistividad del hormigón de recubrimiento cuando este no se encuentra saturado. La corrosión de armaduras en ambientes secos resulta baja debido precisamente a la ausencia o insuficiente presencia de electrolito.

En el caso de corrosión por cloruros, la probabilidad de corrosión (medida mediante el potencial de corrosión) cambia de muy probable a muy improbable cuando la resistividad se incrementa de 6,5 k Ω ·cm a 8,5 k Ω ·cm [23].

ESTUDIOS DE CASO

Se presentan a continuación tres evaluaciones realizadas de estructuras emplazadas en la Provincia de Buenos Aires. La primera es una Iglesia localizada en un ambiente rural, lejos de la costa marina, pero cuyas patologías están vinculadas a la presencia de cloruro. La segunda es una estructura en altura, localizada a unos 500m desde la línea de costa, que ha sufrido corrosión por un mecanismo mixto de carbonatación y cloruro. La tercera es el antiguo Edificio Normandie, que se encontraba en contacto directo con agua de mar, y fue demolido y reconstruido recientemente.

1. Iglesia en zona rural bonaerense

La estructura de hormigón armado (Figura 4) está conformada por una losa curva (cubierta), que descansa en pórticos de hormigón armado en forma de arco. La edificación se constituye en una única nave en planta baja, un nivel elevado constituyendo el coro a los pies de la nave, y una torre de mampostería de ladrillo macizo.

La construcción data aproximadamente del año 1965 (Figura 5), y la obra fue realizada por una empresa local relativamente pequeña. En 1985 fueron necesarias obras de reparación debido al deterioro prematuro. Entonces, se reconstituyó el recubrimiento de las armaduras en los sitios en que existían desprendimientos. Es de interés mencionar que el Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón había sido redactado en el año 1964, y aunque nunca entró en vigencia se constituyó como un elemento de referencia a nivel nacional. Sin embargo en este texto no se consideraban referencias particulares respecto a la corrosión de armaduras y tampoco respecto al ataque por cloruro.

La orientación de la estructura responde a un eje noreste-sudoeste, desde la entrada al altar. De esta forma, la cubierta presenta un sector orientado al noroeste que es ampliamente asoleado vespertinamente, y el sector opuesto orientado al sudeste, que presenta asoleamiento durante la mañana en menor grado que el anterior.



Figura 4. Vista sur de Iglesia



Figura 5. Construcción de Iglesia

Las filtraciones a través de la cubierta fueron comunes. Al respecto, se habían realizado trabajos de sellado de las fisuras existentes y aplicación en el paramento exterior de una pintura impermeabilizante tipo esmalte de caucho acrílico.

Se realizó una inspección visual de la estructura y se extrajeron además muestras de hormigón de recubrimiento de la cubierta y de mortero de asentamiento de la torre campanario, a partir de las cuales se determinaron características físicas y químicas. Las muestras de hormigón fueron extraídas en el paramento interno de la cubierta, utilizando un pico pequeño y sobre sectores parcialmente desprendidos. Para las evaluaciones se quitó previamente de las muestras el revoque existente.

1.1. Inspección visual

El paramento interior presenta un revoque fino de menos de 3 mm de espesor. En el exterior solamente los arcos se encuentran revocados, mientras que la cubierta se encuentra protegida solamente por una capa de pintura blanca.

Las armaduras visibles muestran el uso de acero liso y anclajes de armaduras en forma de gancho. La cubierta presenta un armado típico de losas, con barras principales dispuestas en el sentido de las generatrices, descansando de esta forma sobre los arcos principales. El armado visible muestra una cuantía geométrica importante.

Se evidencian numerosas intervenciones sobre el paramento externo, principalmente sobre fisuras con parches con mortero (Figuras 6 y 7), pero también de algunos desprendimientos. También es posible observar algunas fisuras verticales cerradas pero no selladas, coincidiendo algunas sobre las losas curvas transversales que conforman aventanamientos laterales.

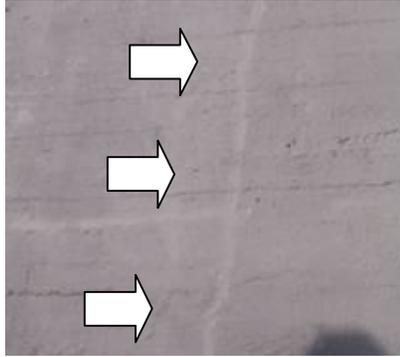


Figura 6. Sellado exterior de fisuras

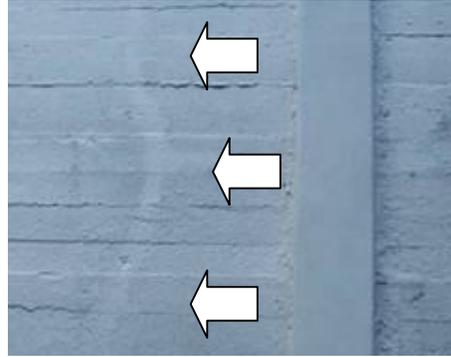


Figura 7. Sellado exterior de fisuras

En el interior de la cubierta se constató la corrosión avanzada de armaduras manifestándose francamente. El patrón de desprendimientos debido a la corrosión de armaduras es más notorio en primera instancia en el lado noroeste de la cubierta. Sin embargo, la mitad sudeste también presenta signos claros de corrosión de armaduras pero con menores desprendimientos del recubrimiento. Los patrones de fisuración en el interior del recinto se ven disimulados por un revoque fino aplicado mediante salpicado.

1.2. Deficiencias constructivas

En la cubierta se observó un muy escaso recubrimiento de armaduras, indicando una baja calidad en los aspectos constructivos (Figuras 8 y 9). Esto se agrava además con otras características observadas como defectos de llenado (Figura 10).

La resistencia no fue analizada, pero cualitativamente el material no aparenta alcanzar niveles adecuados debido a su baja dureza y pálido color.

El hormigón ha sido elaborado con agregado grueso granítico y arena sílicea. Durante la extracción de las muestras se pudo observar que los hormigones de recubrimiento presentan un muy bajo contenido de agregado grueso. Un tamaño del mismo superando al espesor de recubrimiento originó segregación. El tamaño del agregado grueso en el hormigón de recubrimiento es de 12 mm, que no se condice con el del hormigón en su conjunto. Esto es consecuencia de la segregación producida en los elementos al ser llenado sin considerar la relación entre el tamaño máximo de agregados y la mínima separación entre armaduras y encofrados. El contenido de agregado fino en las muestras también aparenta ser bajo, lo que puede ser consecuencia de segregación de la muestra en estado fresco o a un mal diseño de las proporciones del hormigón. Una causa lógica sería el exceso de agua de mezclado, conduciendo a los síntomas detectados de baja dureza y segregación.



Figura 8. Armaduras expuestas



Figura 9. Recubrimiento insuficiente



Figura 10. Defectos de llenado

1.3. Aspectos sobre el diseño

La forma de la cubierta permite un desagüe rápido del agua de lluvia y evita la acumulación de agua sobre la misma. Esta evacuación rápida del agua permite aseverar que las filtraciones ocurridas se deben a fisuras de la cubierta y no a la permeabilidad del hormigón (que aún así se estima en un rango alto). Sin embargo, esta agua desde la cubierta es recogida por una canaleta perimetral y conducida en forma adyacente al pie de la estructura. Este diseño requiere un mantenimiento cuidadoso respecto a la limpieza de esta canaleta a fin de evitar la acumulación de agua en ella.

1.4. Corrosión de armaduras

La corrosión de las armaduras se presenta de manera generalizada. En el paramento interno de la cubierta se presentan importantes desprendimientos del hormigón de recubrimiento, ocasionados por la corrosión de las armaduras. Estos desprendimientos se localizan mayormente en la mitad noroeste (Figura 11). Las razones pueden ser diversas, aunque de la verificación del estado de las armaduras en el sector con menos desprendimiento surge que los motivos son meramente constructivos y no tienen mayor relación con el entorno.

Precisamente, se considera que los patrones de fisuración y desprendimiento del hormigón de recubrimiento son relativamente escasos para los productos de corrosión detectados, posibilidad que surge de la alta porosidad del hormigón de recubrimiento. De esta forma, puede encontrarse disimulado el verdadero grado de deterioro de las armaduras en los sectores en los que no se encuentran expuestas.

Se ha observado una disminución sensible de la sección de las armaduras debido al proceso de corrosión. Se estimó una pérdida promedio de sección de armaduras por corrosión en un rango superior al 30%. Esto significaría una tensión de trabajo del acero de por lo menos un 40% mayor a la de diseño. En algunos casos se verificó la casi completa desaparición de barras de menor diámetro como estribos. Además, debe tenerse en cuenta que los productos de corrosión afectan significativamente a la adherencia entre armaduras y hormigón para el grado de deterioro presentado. Es visible en algunos casos la disociación completa entre armaduras y hormigón.



Figura 11. Patrones de desprendimientos del hormigón de recubrimiento
1.5. Análisis de materiales cementíceos

Sobre muestras extraídas y conservadas herméticamente se determinaron contenidos de humedad (agua evaporable a 100°C). Estas muestras fueron extraídas a 1,50 m desde el solado, del hormigón de recubrimiento de armaduras semidesprendido en el paramento interno de la cubierta. Se nota una mínima diferencia entre el hormigón de recubrimiento del sector noroeste (4,8% de humedad) respecto al sudeste (5,3% de humedad). En ambos casos el valor de humedad resulta muy alto, considerando que se trata de muestras del paramento interno. Como posibles causales se debe considerar la condensación superficial debido a la absorción capilar desde el basamento y a una ventilación insuficiente del recinto. La absorción capilar no puede desarrollarse por encima de 1,50 m de altura, pero la impermeabilización exterior y la falta de ventilación interior favorecerían la condensación de la humedad producida por el agua ascendente al evaporarse, afectando la totalidad del recinto.

Las densidades saturadas y superficie seca en muestras del hormigón de recubrimiento y el mortero de asiento de la torre resultaron ser 2,20 y 2,05 g/cm³, respectivamente. La absorción de agua en 24 horas para las respectivas muestras fue de 10,2 y 15,4%. Los valores de peso específico obtenidos son bajos, y se corresponden con una alta porosidad originada por un alto contenido de agua de mezclado.

El proceso de carbonatación se origina por el ingreso de anhídrido carbónico en la estructura porosa del hormigón y reaccionando con los hidróxidos alcalinos forma carbonatos y disminuye el pH del hormigón. Esta situación permite la despasivación y consecuente corrosión de las armaduras que están rodeadas de un material de baja alcalinidad (pH menor a 10). Este causal es diferente al de un alto contenido de cloruro soluble en agua en el hormigón. El pH determinado en el hormigón de recubrimiento alcanzó el valor de 8,8, que no resulta suficiente para pasivar al acero.

En la Tabla 3 se muestran los análisis químicos realizados a partir de las muestras de hormigón de recubrimiento de la cubierta y de mortero de asentamiento de la mampostería de la torre.

Los resultados mostrados indican que el contenido de cemento Pórtland del hormigón de recubrimiento es inferior a 300 kg/m^3 (a partir del trióxido de azufre). De acuerdo a ello, los contenidos de óxido de calcio y de material soluble en medio ácido resultan excesivos. De esta manera, se interpreta la utilización de materiales cementantes y/o solubles en ácido distintos al cemento Pórtland. Estos materiales pueden haber sido cemento de albañilería, cal hidráulica o arcillas no hidráulicas solubles en ácido. Ninguna de estas tres categorías de materiales resulta adecuada para la elaboración de hormigón estructural.

Tabla 3. Análisis químico de materiales cementíceos.

Componentes (%)	Hormigón	Mortero
Dióxido de silicio	4,55	6,60
Trióxido de azufre	0,27	<0,05
Óxido de calcio	10,00	8,15
Cloruro	0,17	0,10
Residuo insoluble	72,80	68,60
Pérdida por calcinación	8,08	9,27

Por otro lado, el contenido de cloruro en el hormigón de recubrimiento es sumamente elevado. Teniendo en cuenta la ubicación geográfica y el entorno de la estructura, solamente se explica este contenido de cloruro por la utilización de cloruro de calcio como acelerante de fraguado del hormigón en estado fresco. Esto se sustenta en el hecho de que el contenido de cloruro del mortero analizado resulta despreciable a pesar de haber sido expuesto al mismo entorno. De esta forma, las armaduras habrían permanecido corroyéndose desde el momento mismo de la construcción de la estructura.

1.6. Diagnóstico y recomendaciones

De acuerdo a la inspección realizada y a los resultados de los ensayos ejecutados en laboratorio sobre las muestras extraídas, se plantean las siguientes consideraciones respecto a la estructura de hormigón armado evaluada:

- La cubierta de hormigón se encontraba afectada por un proceso generalizado de corrosión de armaduras, originándose fisuración del hormigón, desprendimientos del recubrimiento, pérdida de adherencia acero-hormigón y una significativa disminución de la sección resistente de las armaduras. Las armaduras estaban activas y el proceso de deterioro en avance, favorecido por la alta humedad del interior de la construcción. En algunas zonas de la cubierta no se observan signos externos de

corrosión, pero se constató al descubrir sectores aparentemente indemnes, que las barras subyacentes se encuentran activas. Se infiere que el grado de deterioro es similar en el lado noroeste como en el lado sudeste de la cubierta, a pesar de los diferentes síntomas externos. La presencia de alta humedad relativa en el recinto y la disponibilidad de oxígeno permitida por el hormigón poroso de escaso espesor favorecen el proceso de degradación. Este avanzado proceso de deterioro se viene desarrollando por un período prolongado, incluso desde la construcción misma.

- El proceso de corrosión se ha desencadenado fundamentalmente por la despasivación de las barras debido al efecto simultáneo del bajo pH del hormigón de recubrimiento junto con el contenido de cloruro del mismo.
- El hormigón de la cubierta ha sido construido con materiales inadecuados para el hormigón estructural, con la consecuente disminución de la resistencia y de la capacidad de protección de las armaduras de acero. El mismo no se ajusta en cuanto al tamaño máximo de agregado grueso, tipo de materiales cementíceos utilizados y contenidos unitario de cemento y de agua de mezclado.
- Los deterioros por corrosión no se tradujeron en síntomas estructurales significativos debido a la forma propia de la cubierta que ha cambiado su funcionamiento resistente debido precisamente a su forma. Esto se ve sostenido por la aparición de fisuras de trabajo verticales en la cubierta, en el centro entre apoyos y sobre los aventanamientos laterales constituidos por losas curvas rígidas. El comportamiento resistente del conjunto no era satisfactorio en cuanto que no es el previsto en el diseño y el nivel de seguridad resulta incierto.
- Los arcos de hormigón armado no presentan mayores signos externos de corrosión. Por cuestiones constructivas, los arcos parecen haber sido ejecutados en forma separada a la losa de cubierta. Por lo que existe la posibilidad de que sus características sean diferentes a las de la cubierta.
- Resultan recomendables las siguientes actuaciones:
Determinar el grado de seguridad certero de la estructura, considerando el deterioro y la transferencia de solicitaciones debido al mismo. Para ello debe determinarse la resistencia efectiva del hormigón. No resulta positiva la evolución del nivel de seguridad en el tiempo, de manera que debe procurarse disminuir lo más posible la velocidad de deterioro. El estado de deterioro avanzado de la cubierta, su contenido de cloruro y su pH hacen poco viable su recuperación como elemento estructural de hormigón armado. El caso de los arcos de hormigón podría resultar similar al de la cubierta, aunque debe ser verificado el estado de las armaduras (su pasividad, contenido de cloruro y pH). Eventualmente, podrían surgir datos que posibiliten su recuperación. Es conveniente implementar sistemas para la ventilación del recinto. Debe mantenerse un registro permanente de las actuaciones sobre la estructura.

2. Edificación en altura en zona costera marina

Esta estructura consta de planta baja y siete niveles, observándose que hasta el nivel 4 existen algunos cerramientos mientras que los niveles 5, 6 y 7 no presentan ningún tipo de cerramiento. Se encuentra a aproximadamente 500m de distancia del mar, en una zona urbana. La construcción data aproximadamente de 1980. No fue sino hasta

1982 que entró en vigencia el Reglamento CIRSOC 201-1982, por lo que para su construcción aún el PRAEH 1964 resultaba la única referencia.

2.1. Inspección visual

Pudieron observarse patologías debidas a deficiencias constructivas y corrosión generalizada de armaduras. En distintos elementos estructurales se detectó un número significativo de oquedades o vacíos de compactación (Figura 12). El hormigón no ha logrado conformar una masa homogénea de material. Asimismo, se observó que no se han respetado espesores de recubrimiento mínimos necesarios para la protección de las armaduras (Figura 13). El hormigón se elaboró con agregado grueso cuarcítico y arena de playa como agregado fino, con aproximadamente un 15% de valvas marinas. En los niveles 2 y 6 se han detectado contenidos minoritarios de piedra granítica.



Figura 12. Defectos de llenado



Figura 13. Recubrimiento insuficiente

La patología de corrosión de las armaduras se presenta de manera generalizada, observándose las distintas etapas de desarrollo (manchas de óxido, fisuración paralela a la armadura principal, desprendimiento del hormigón de recubrimiento, disminución y pérdida total del área resistente de las barras) (Figura 14 y 15).

Se determinó la resistencia efectiva sobre testigos de hormigón de 7.5 cm. de diámetro, calados en distintas columnas de la estructura. Los testigos fueron ensayados en la condición de humedad que poseían luego de la extracción. Los valores informados se encuentran corregidos por esbeltez.



Fig. 14. Armaduras expuestas en columna.



Fig. 15. Armaduras expuestas en losa.

2.2. Evaluación del hormigón

La resistencia media efectiva obtenida fue de 16,6 MPa, con una dispersión de 5 MPa. Esta dispersión debe ser considerada como muy elevada y los valores se ven en cierta forma diferenciados de acuerdo al nivel al que corresponden (Figura 16).

Se determinaron también las profundidades de carbonatación mediante la técnica colorimétrica en los testigos extraídos empleando una solución alcohólica de fenolftaleína al 1%.

Los valores obtenidos en la mayoría de los testigos extraídos resultaron muy elevados (mayores a 3 cm) y superiores al espesor de recubrimiento, por lo cual las armaduras se encontraban activas. Pudo establecerse una relación bastante consistente entre la resistencia a compresión y los espesores de carbonatación (Figura 17).

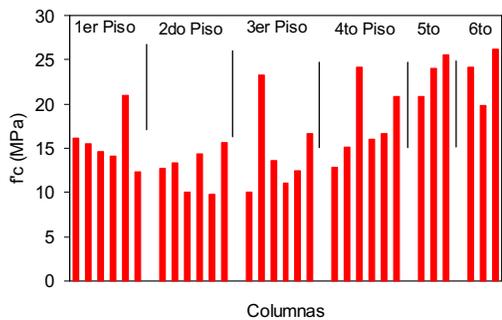


Figura 16. Resistencias a compresión individuales.

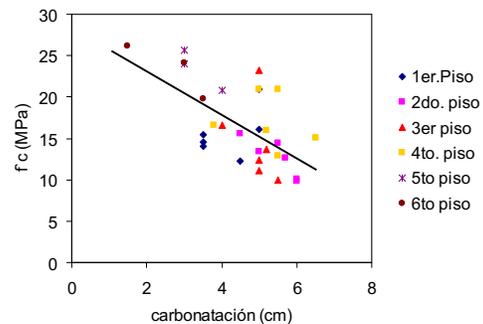


Figura 17. Relación entre resistencia a compresión y carbonatación.

Asimismo, se determinaron densidad saturada y superficie seca (D_{ss}) y absorción de agua en 24 horas (A_b) en trozos de testigos correspondientes a los diferentes niveles de la estructura. Los valores de densidad obtenidos (entre 2,30 y 2,34 g/cm^3) son coherentes con el tipo de agregado grueso empleado y los de absorción de agua (entre 6,1 y 7,3%) resultan algo elevados. La alta porosidad se originó por el empleo de un alto contenido de agua de mezclado y una compactación deficiente.

2.3. Corrosión de armaduras

La evaluación del nivel de corrosión de las armaduras se realizó mediante determinaciones "in situ" de potenciales y corrientes de corrosión. Las mediciones se realizaron en cuatro columnas de cada uno de los niveles primero al sexto, relevándose las cuatro barras angulares de cada columna en alturas +0,5, +1,0, +1,5, y +2,0 metros desde el solado. Los mapeos de potenciales pueden verse en la Figura 18. En la Tabla 4 se presenta, de acuerdo a los potenciales medidos y cotejados con las corrientes correspondientes, el grado de avance de la corrosión al momento de la evaluación.

Los contenidos de cloruro soluble en agua se determinaron en cuatro elementos estructurales por nivel. En los pisos 1, 2, 3 y 4 el porcentaje de cloruro a nivel de las armaduras fue inferior a 0.05 % en peso del hormigón (equivalente a 0,4% en peso del

cemento). Este valor es menor al límite umbral de cloruro, pero en el futuro el contenido podría incrementarse por aporte del medio externo. En los niveles 5 y 6 se determinaron porcentajes superiores, hecho que indica que la armadura se encuentra con riesgos de corrosión localizada. Las envolventes de contenidos máximos determinados en cada nivel se muestran en la Figura 19. Surge de las determinaciones que se han empleado materiales contaminados con cloruro debido a la tendencia uniforme de los perfiles, situación corroborada por el análisis visual que indica la presencia de una arena de playa.

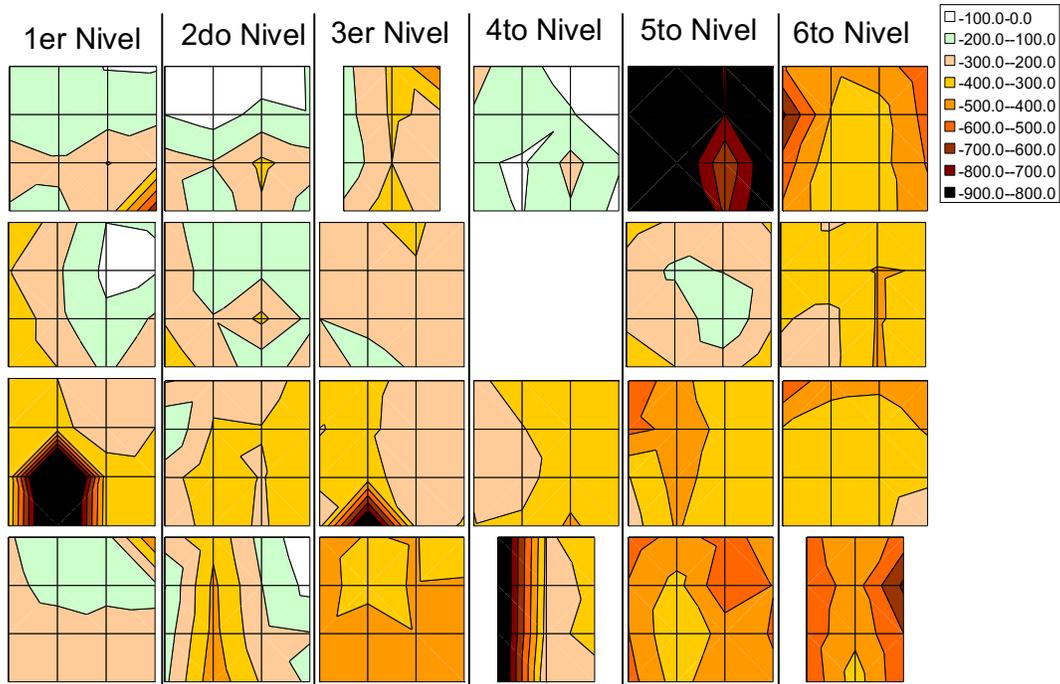


Figura 18. Isopotenciales de corrosión (mV).
Tabla 4. Niveles de corrosión determinados "in situ"

Nivel	Columna	Nivel de corrosión	Nivel	Columna	Nivel de corrosión
1	104	Bajo	4	404	Bajo
	107	Medio		415	Alto
	109	Medio		421	Alto
	119	Alto			
2	205	Bajo	5	505	Muy Alto
	209	Medio		507	Alto
	211	Medio		516	Alto
	218	Bajo		518	Muy Alto
3	306	Alto	6	610	Alto
	307	Medio		613	Alto
	314	Alto		616	Alto
	319	Muy Alto		622	Muy Alto

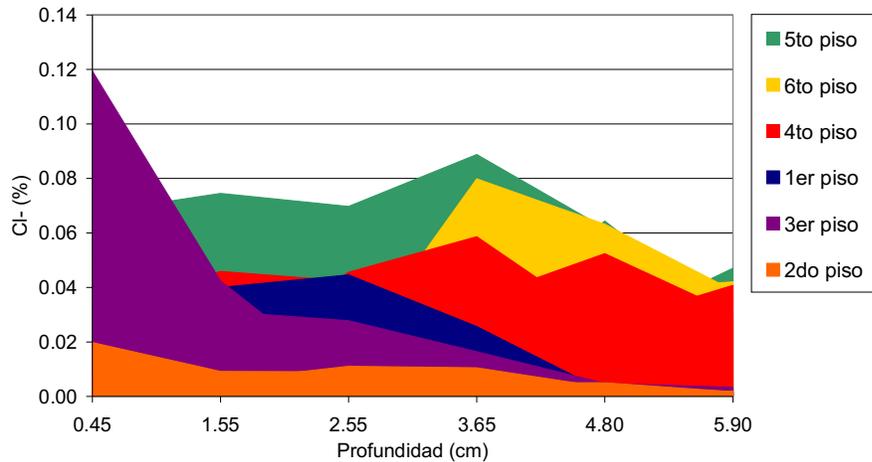


Figura 19. Envolturas de contenidos de cloruro soluble en agua en cada nivel.

2.4. Diagnóstico y recomendaciones

De acuerdo a la inspección realizada y a los resultados de los ensayos ejecutados "in situ" y en laboratorio sobre los testigos extraídos de las columnas de los distintos niveles, pueden plantearse las siguientes consideraciones respecto a la estructura:

- El proceso de corrosión de armaduras era generalizado, originando la fisuración del hormigón, desprendimiento del recubrimiento y la disminución de la sección resistente de las armaduras principales y en algunos casos la afectación total de las mismas. La mayoría de las armaduras se encontraban activas, con el proceso de corrosión en pleno desarrollo. También se determinó electroquímicamente la existencia de barras activas en elementos estructurales sin signos externos de corrosión.
- El proceso de corrosión se desencadenó fundamentalmente por la despasivación de las barras debido a la importante carbonatación del hormigón y a la presencia de humedad y oxígeno en las proximidades de las mismas, debido a la calidad deficiente del hormigón de recubrimiento y a su escaso espesor. Particularmente en los niveles 5 y 6 la despasivación es incrementada debido a la presencia de cloruro.
- Los problemas vinculados a procesos constructivos (llenado y compactación) obligan a considerar la posibilidad de que las secciones resistentes del hormigón hayan sido afectadas, independientemente del deterioro por corrosión. La resistencia efectiva del hormigón alcanzaba valores medios relativamente bajos.
- Resultan recomendables las siguientes actuaciones:
Eliminar el material suelto y/o fisurado mediante picado manual y descubrir armaduras principales incluso en su sector interno. Limpiar por cepillado la superficie de barras con menos de 10% de reducción de sección y reemplazar aquellas con más de 10%. Revisar y corregir defectos de empalme que no respetan longitudes mínimas de anclaje. Restituir el recubrimiento con hormigón proyectado, tendiendo a optimizar la unión entre el hormigón viejo y el nuevo. Podría considerarse el uso de aditivos inhibidores del ataque de cloruro. Efectuar un revestimiento impermeable de las superficies expuestas de la estructura como así también el sellado de fisuras.

3. EDIFICIO NORMANDIE

La obra del Edificio Normandie se inició en 1937, en la ciudad de Mar del Plata, Argentina, y comenzó a usarse en la temporada 1938-39. Esta es una estructura de interesante por su diseño arquitectónico modernista e integrando un plan de urbanización de la zona costera.

En 1960 el edificio cambió de destino y la nueva función requirió adaptaciones tales como la construcción de un tercer piso, otras sobrecargas no previstas y la subdivisión de diversos locales. En el año 1986 se realizaron intervenciones en la infraestructura, reforzando algunas columnas y vigas (Figura 20).

El edificio se mantuvo ocupado hasta 1991. A partir del año 1999 el abandono es total y el vandalismo dio cuenta de instalaciones, carpinterías y revestimientos a niveles de devastación. Pero la cuestión más grave era el deterioro de la estructura.

3.1. Emplazamiento

En un mismo emplazamiento la estructura presenta distintas zonas de exposición. Una zona atmósfera marina, donde recibe cloruro procedentes únicamente del aerosol marino. Una zona de salpicaduras y entre mareas, ubicada sobre el nivel de mareas, que está sujeta a ciclos de mojado y secado con agua de mar. Y una tercera zona sumergida en agua de mar. Las mayores afectaciones por corrosión ocurren en las estructuras ubicadas en la zona de salpicadura y en la de atmósfera marina más próxima al mar.

Originalmente la infraestructura del edificio Normandie estaba en contacto directo con el agua de mar. Entre los años 1958 y 1970, el sector de playa de emplazamiento sufrió un retroceso de 35 metros, y entonces la estructura de sostén quedó expuesta a la acción de la rompiente marina y a la agresión de la atmósfera marina.

Hacia 1991 el edificio se encontraba rodeado de una escollera construida a principios de la década de 1970, la cual resultaba eficiente en la reducción de la energía originada por el impacto de las olas contra la estructura del edificio. En sus últimos años la escollera había sido notablemente erosionada, y el acceso del agua de mar a la parte baja del edificio era frecuente.

3.2. Inspección visual

Hacia 2002, la estructura presentaba alteraciones por corrosión de gran magnitud. En algunas columnas y vigas de arriostramiento existían fisuras, descascamientos y armaduras corroídas (pérdida de sección del orden del 25%) (Figura 21). En otras vigas y losas se detectaron estribos cortados y armaduras separadas del hormigón con signos de pandeo, tratándose de elementos colapsados. Las vigas en voladizo presentaban un deterioro significativo, y precisamente constituían los elementos más próximos al frente marítimo. La terraza presentaba deformaciones que ponían de manifiesto la disminución resistente.

En algunas de las columnas de sostén se observaban efectos de pandeo que podrían adjudicarse al efecto conjunto de la corrosión y sobrecargas no previstas.

En algunos locales del edificio se observaron fisuras en mármoles de revestimiento y juntas abiertas de los mosaicos de los pisos. Estas anomalías podrían atribuirse a movimientos diferenciales de la estructura por sobrecargas no previstas y/o cargas dinámicas originadas en vientos, olas, etc.

Sólo algunas de las columnas y vigas de arriostramiento reforzadas no presentaban signos de alteración mientras. La mayoría presentaba el revestimiento descascarado y con evidentes disminuciones de sección de las armaduras.



Figura 20. Vista general. Año 1991.



Figura 21. Vista general. Año 2002

3.3. Ensayos de laboratorio

Sobre muestras de hormigón extraídas de la estructura, en especial de las columnas de sostén, se realizaron distintos ensayos. En el hormigón de refuerzo ejecutado en 1986 se detecta que los cloruros han penetrado por procesos de difusión hasta las barras de refuerzo en porcentajes elevados que originaron la iniciación y desarrollo de los procesos de corrosión.

En la Figura 22 se informa el perfil de ingreso de cloruros en el hormigón viejo (ejecutado en 1939) y en el correspondiente a las reparaciones. En la Tabla 5, se califican los materiales utilizados en ambas oportunidades mediante la determinación de la densidad saturada y superficie seca (D_{ss}), la porosidad interconectada con el medio exterior (P) y la resistencia de rotura a compresión ($f'c$). Complementariamente se indica el pH del hormigón como índice de su alcalinidad.

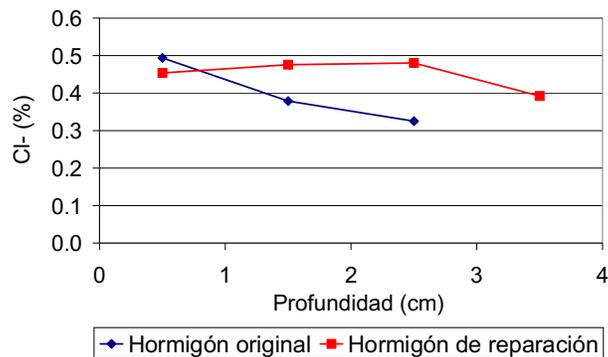


Figura 22. Perfil de cloruro en columnas de hormigón

Tabla 5. Características de los hormigones.

Hormigón	Año	pH	Dsss	P (%)	f'c (MPa)
Original	1939	11.3	2.43	14.4	23.9
Reparación	1986	11.1	2.27	14.3	26.5

En el hormigón viejo se observa la presencia de trozos de valvas marinas (conchillas) en porcentajes no muy elevados, indicando que se ha empleado como agregado fino arena de mar (en forma total o parcial). Estas arenas incorporan porcentajes variables de cloruros al hormigón que pueden ser retenidos en la estructura hidratada del cemento pórtland y no participan en los procesos de corrosión.

En ambos hormigones, de características similares en lo que respecta a porosidad y resistencia, se detectan porcentajes elevados de cloruros difundidos desde el exterior, los que fueron causantes de la despasivación de las armaduras. Además, puede plantearse que el hormigón de refuerzo no ha cumplido adecuadamente la función de barrera de protección, ya que en muy pocos años la concentración de cloruro en la proximidad de las barras es elevada.

3.4. Intervención

La estructura de hormigón armado del edificio Normandie presentaba como principal y más importante patología a la corrosión de las armaduras. El alto grado de deterioro dificultaba su puesta en valor sin una intervención mayúscula. La restitución de las características resistentes y de seguridad iniciales era poco viable sin el reemplazo de numerosos elementos de la estructura. Es así que se resolvió la demolición y construcción de un nuevo edificio siguiendo las premisas originales del Arq. Pereda.

En 2007 se concluyó la construcción del nuevo edificio. Sólo se procuró conservar parte de la fachada original. En la planta baja (antes un espacio desaprovechado) se dispusieron locales útiles con cerramientos (Figura 24). Una escollera más retirada separa el nuevo edificio de contacto directo con el mar, y se han considerado parámetros modernos para una vida útil prolongada de la reciente construcción (Figura 25). Sin embargo, dado el grado de agresividad del entorno, resulta indispensable un plan de mantenimiento permanente que asegure una durabilidad prolongada del nuevo edificio.

Se sustituyó totalmente a la estructura, ejecutándose fundaciones de hormigón armado sobre el lecho rocoso en cotas inferiores a los cinco metros de profundidad. Como particularidad a tener en cuenta se presenta el uso de vigas postesadas para alcanzar mayores luces y reducir el número de columnas. Esto significa, sin embargo una mayor susceptibilidad de la estructura al ambiente debido a que el ataque por cloruro en el hormigón pretensado resulta más crítico respecto al hormigón armado.



Figura 24. Vista nueva planta baja.



Figura 25. Vista norte del nuevo edificio.

CONSIDERACIONES FINALES

Se presentaron metodologías que permiten el diagnóstico de estructuras de hormigón armado que constituyen el patrimonio moderno, afectadas por corrosión y particularmente para el caso de ataque de cloruro. Las herramientas de análisis demuestran su utilidad práctica para la valoración de síntomas y pronóstico del comportamiento futuro cercano.

La corrosión por cloruro no es exclusiva del ambiente marino, y se produce también en estructuras ejecutadas con materiales contaminados con cloruro, o bien debido al uso de cloruro de calcio como acelerante de fraguado (que se encuentra actualmente impedido por la mayoría de reglamentos y/o normas constructivas).

La mayor parte de las patologías están relacionadas con defectos constructivos, y falta de mantenimiento. Por lo que intervenciones preventivas o correctivas tempranas son un requisito para la preservación de estructuras de hormigón armado, especialmente en ambientes agresivos con cloruro.

REFERENCIAS

- [1] ROSTAM S. "Vida útil de las estructuras de hormigón. Cómo satisfacer los requerimientos del nuevo milenio". *Hormigón*, 36, 2000, pp. 11-44.
- [2] CONTECVET. "Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura". EC Innovation Programme IN 309021. Instituto Eduardo Torroja - GEOCISA. DG Enterprise, CEC. 2001.
- [3] REHABCON. "Strategy for Maintenance and Rehabilitation in Concrete Structures". IPS-2000-00063. DG Enterprise, CEC. 2004.
- [4] TUUTTI K. "Corrosion of steel in concrete". Swedish Cement and Concrete Institute, CIB, Research Report No. 4, 1982, 468 p.
- [5] TRAVERSA L.P. "Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales", en "Durabilidad del Hormigón Estructural". Ed. E.F. Irassar, AATH, 2001, 306 p.
- [6] DURAR. "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado", CYTED, Maracaibo, Venezuela, 1998, 208 p.
- [7] TAYLOR P.C., NAGI M.A., WHITING D.A. "Threshold chloride content for corrosion of steel in concrete: a literature review". Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2169. 2000. 32 p.

- [8] COLLEPARDI L., MARCIALIS A., TURRIZIANI R. "La cinetica di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo", *Il Cemento*, 67, 1970, pp. 157-164.
- [9] DELAGRAVE A., BIGAS J.P., OLLIVIER J.P., MARCHAND J., PIGEON M. "Influence of the interfacial zone chloride diffusivity of mortars", *Advanced Cement Based Materials*, 5, 1997, pp. 86-92.
- [10] FERNÁNDEZ LUCO L. "La durabilidad del hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos", en "Durabilidad del Hormigón Estructural". AATH, Ed. E.F. Irassar, 2001, 306 p.
- [11] TRAVERSA L.P., ZICARELLI S., DI MAIO A.A. "Análisis de algunos factores que influyen la difusión de cloruros en el hormigón", Memorias 15ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 21 al 24 de octubre de 2003, Santa Fé, editado en CD-Rom, 8 p.
- [12] SAETTA A.V., R.V. SCOTTA R.V., VITALIANI R.V. "Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete". *ACI Materials Journal*, 90, 5, 1993, pp. 441-451.
- [13] MANGAT P.S., MOLLOY B.T. "Prediction of long term chloride concentration in concrete". *Materials and Structures*, 27, 1994, pp. 338-346.
- [14] NILSSON L.O., POULSEN F., SANDBERG P., SORENSEN H.F., KLINGHOFFER O. "HETEK, Chloride penetration into concrete, State-of-the-art, Transport Process, Corrosion initiation, test methods and prediction models". The Road Directorate, Copenhagen, Dinamarca, 1996, 151 p.
- [15] DELAGRAVE A., MARCHAND J., OLLIVIER J.O., JULIEN S., HAZRATI K. "Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems". *Advanced Cement Based Materials*, 6, 1997, pp. 28-35.
- [16] GLASS G.K., REDDY B., BUENFELD N.R. "The participation of bound chloride in passive film breakdown on steel in concrete". *Corrosion Science*, 42, 2000, pp. 2013-2021.
- [17] STRATFULL R.F. "Corrosion autopsy of a structurally unsound bridge deck". *American Highway Research*, Record No. 433, 1973, 12 p.
- [18] ASTM C876, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM, Filadelfia, 1991.
- [19] GONZÁLEZ J.A., ANDRADE C., ALONSO C., FELIÚ S. "Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement". *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, N°2, 1995, pp. 257-264.
- [20] CLEAR, K.C. "Measuring rate of corrosion of steel in field concrete structures". *Transportation Research Record* No. 1211, Transportation Research Board, 1989, pp. 28-37.
- [21] WHITTINGTON H.W., McCARTER J., FORDE M.C. "The conduction of electricity through concrete". *Magazine of Concrete Research*, Vol. 114, N°33, 1981, pp. 48-60.
- [22] HANSON C.M., FRØLUND TH., MARKUSSEN J.B. "The effect of chloride cation type on the corrosion of steel in concrete by chloride salts". *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985, pp. 65-73.
- [23] HOPE B.B., IP A.K., MANNING D.G. "Corrosion and electrical impedance in concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985, pp. 525-534.