

## **EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS EN HORMIGONES DE ULTRA ALTA DURABILIDAD PARA APLICACIÓN EN REPOSITORIOS DE RESIDUOS RADIOACTIVOS DE BAJO NIVEL DE ACTIVIDAD**

Gustavo S. Duffó<sup>1,2,3</sup>, Damián R. Vázquez<sup>1,3</sup>, Yury Villagrán<sup>2,4</sup>,  
Claudio Zega<sup>2,4</sup> y María E. Sosa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) – Gerencia Materiales  
Departamento Corrosión. AV. Gral. Paz 1499, (1650) San Martín, Buenos Aires  
Tel. 011-6772-7403, duffo@cnea.gov.ar

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Gral. San Martín

<sup>4</sup> Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT)  
52 entre 121 y 122 – (1900) La Plata, Buenos Aires – Tel. 0221 483-1141

**Palabras claves** Hormigón armado, corrosión, residuos radioactivos

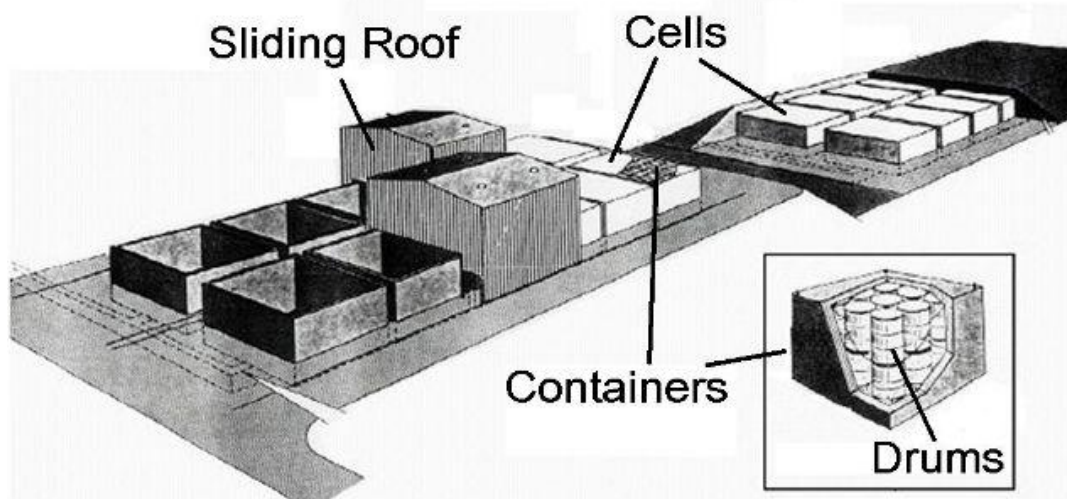
### **RESUMEN**

En el presente trabajo se comparan, desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras, el desempeño de dos hormigones de ultra alta durabilidad candidatos a ser empleados en la construcción del repositorio de residuos radiactivos de baja actividad: uno fabricado con cemento portland normal y el otro con cemento portland puzolánico. El monitoreo de los diferentes parámetros asociados con el proceso corrosivo se llevó a cabo por medio de sensores de desarrollo propio. Los valores obtenidos al momento (correspondientes a un tiempo de exposición de 3,5 años) muestran que en ambos tipos de hormigón, las barras de acero mostraron potenciales de corrosión en el rango de pasividad y velocidades de corrosión cercanas al valor umbral establecido para este tipo de aplicaciones (aproximadamente 0,1  $\mu\text{m}/\text{año}$ ). La velocidad de carbonatación medida, también provee valores adecuados para el tipo de aplicación prevista.

### **INTRODUCCIÓN**

Entre los objetivos del Programa Nacional de Gestión de Residuos Radioactivos (PNGRR) se encuentra el diseño y construcción de una instalación para la disposición final de residuos radioactivos de nivel de actividad bajo y medio, la cual se encuentra en fase de desarrollo. Este tipo de residuos requieren de un tiempo de confinamiento y aislamiento del medio ambiente de 300 años. Por lo tanto, uno de los requerimientos que se exigen respecto a los materiales a emplear en la construcción del repositorio es que su durabilidad sea mayor que dicho tiempo. El modelo y diseño de repositorio seleccionado se basa en un sistema de barreras independientes y redundantes de hormigón armado, emplazado en una formación geológica, que también actúa como barrera (figura 1) (1).

GSD: Dr. en Química, DRV: Ing. en Materiales, YV: Dr. en Ingeniería, CZ: Dr. en Ingeniería, MES:  
Ingeniera Civil



**Figura 1:** Esquema del repositorio de residuos radioactivos de bajo nivel de actividad (1)

Es conocido que uno de los causantes más frecuentes de fallas en estructuras de hormigón armado es la corrosión de las armaduras de acero, lo cual pone en relevancia su estudio en hormigones candidatos. Actualmente el estudio de la corrosión de armaduras en hormigón se realiza mediante el análisis conjunto de diferentes parámetros posibles de caracterizar mediante técnicas no destructivas, entre ellos, el potencial y la velocidad de corrosión, la resistividad eléctrica, el flujo de oxígeno que alcanza las armaduras y la temperatura del hormigón. También, mediante técnicas destructivas, puede medirse la resistencia a la penetración de especies agresivas, como lo son el cloruro y el dióxido de carbono.

En este trabajo se analizan y comparan dos hormigones elaborados con diferentes formulaciones, con cemento p $\acute{o}$ rtland normal y puzol $\acute{a}$ nico, respecto a su durabilidad y aptitud para ser empleados en la construcci $\acute{o}$ n de un repositorio de residuos radioactivos de nivel de actividad bajo y medio. Se realiz $\acute{o}$  el monitoreo de los diferentes par $\acute{a}$ metros mencionados asociados a la corrosi $\acute{o}$ n de refuerzos. El an $\acute{a}$ lisis de la evoluci $\acute{o}$ n de los diferentes par $\acute{a}$ metros medidos en un plazo de tiempo mayor permitir $\acute{i}$ a evaluar la factibilidad de aplicaci $\acute{o}$ n de estos tipos de hormig $\acute{o}$ n en repositorios de residuos radioactivos de bajo y medio nivel de actividad.

## **TECNICA EXPERIMENTAL**

Se fabricaron cuatro prototipos de hormig $\acute{o}$ n armado, cuyas dimensiones son 50x60x15 cm $^3$ : dos con cemento p $\acute{o}$ rtland normal (CPN 40) y dos con cemento p $\acute{o}$ rtland puzol $\acute{a}$ nico (CPP 40). Ambos cementos cumplen con los requisitos de IRAM 50000 (2). Para ambos se utilizaron como agregados arena sil $\acute{i}$ cea de r $\acute{i}$ o (m $\acute{o}$ dulo de finura = 2,3) y piedra partida gran $\acute{i}$ tica (tama $\acute{n}$ o m $\acute{a}$ ximo = 19 mm). Las dosificaciones (Tabla 1) fueron ajustadas para asegurar un contenido m $\acute{i}$ nimo de pasta compatible con la consistencia requerida. Esta posibilidad fue dada por la utilizaci $\acute{o}$ n de aditivos reductores de agua de rango medio y alto.

Cada prototipo fue reforzado con cuatro barras y una malla electrosoldada Sima $^{\text{®}}$  de 150 mm de cuadr $\acute{i}$ cula. En ambos casos el di $\acute{a}$ metro de las armaduras es de 10 mm y fueron provistas por la empresa Acindar. La composici $\acute{o}$ n qu $\acute{i}$ mica del acero de las armaduras es: C, 0,41%; Mn, 0,73%; Cu, 0,27%; Ni, 0,13%; Si, 0,28%; P, <0,01%; S, 0,02%; N, 0,008%, Fe, balance. Las barras fueron dispuestas con un espesor de

recubrimiento de 50 mm respecto a una de las caras de los prototipos, y cada malla fue dispuesta de igual manera pero respecto a la cara opuesta. La longitud expuesta de las barras es de 200 mm, la cual fue delimitada con pintura epoxi. Tanto las barras como las mallas poseen contactos de cobre aislados, que se prolongan hacia el exterior de los prototipos, permitiendo las conexiones para las mediciones electroquímicas. Los mismos fueron soldados con estaño a las armaduras y, para evitar su deterioro, fueron sellados con masilla epoxi, y luego se aplicó un recubrimiento de pintura epoxi. Los prototipos fueron expuestos al ambiente exterior, en una terraza del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA y se ubicaron de modo que los 2 prototipos fabricados con cada cemento quedaron perpendiculares entre sí, simulando una esquina de entre dos paredes de un repositorio de residuos radioactivos.

**Tabla 1.** Proporciones de los materiales constituyentes ( $\text{kg/m}^3$ ).

<b>Materiales</b>		
<b>Tipo de cemento</b>	<b>CPN</b>	<b>CPP</b>
Agua	140	140
Cemento	400	400
Agregado fino	927	895
Agregado grueso	979	979
Aditivo Plastificante	3,2	3,2
Aditivo Superplastificante	4,0	5,62
<b>Propiedades</b>		
Asentamiento (mm)	110	150
Aire incorporado (%)	4,2	3,2
Exudación (%)	< 0,01	< 0,01
Resistencia a compresión 28d (MPa)	58,2±3,4	57,4±3,0
Velocidad de succión capilar ( $\text{g}/(\text{m}^2/\text{s}^{0,5})$ )	0,95	1,15

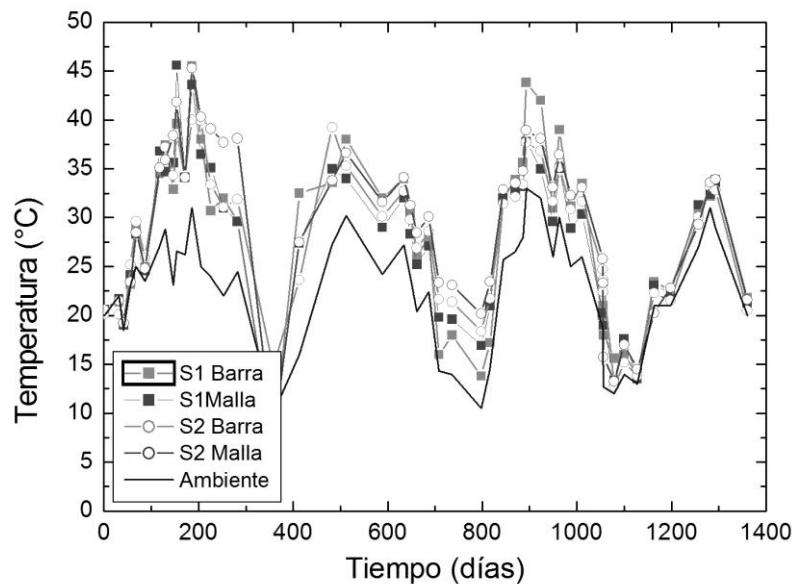
Los valores muy bajos de exudación y velocidad de succión capilar indican que ambos hormigones poseen una estructura de poro cerrada y por lo tanto propiedades de transporte significativamente disminuidas en función de una ultra alta durabilidad compatible con el tipo de aplicación que trata este estudio. Asimismo, la estructura de poro cerrada resulta también en una mejora de la calidad de interfaces y baja porosidad que conduce a un incremento de la resistencia mecánica.

Los parámetros asociados con la corrosión de las armaduras: potencial y velocidad de corrosión, resistividad eléctrica del hormigón, flujo de oxígeno que alcanza las armaduras y la temperatura interna de la estructura fueron medidos con sensores de corrosión desarrollados en el Depto. Corrosión de la CNEA (3). Cada prototipo fue instrumentado con dos de estos sensores, uno de ellos adosado a las barras y el otro a la malla de acero. Las mediciones al momento, llevan más de 3,5 años de duración. Para determinar la velocidad de carbonatación, se utilizó el test de la fenolftaleína. Para este ensayo se fabricaron tres probetas de cada tipo de hormigón, de geometría prismática, de  $7,5 \times 7,5 \times 30 \text{ cm}^3$ . Las mismas fueron expuestas al medio ambiente y periódicamente se extraen muestras para determinar la velocidad de carbonatación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a la similitud entre los resultados obtenidos con ambos tipos de cemento, en esta sección se mostrarán únicamente los resultados obtenidos con el cemento portland normal, a excepción de la velocidad de corrosión, donde se mostrarán los resultados obtenidos con ambos materiales.

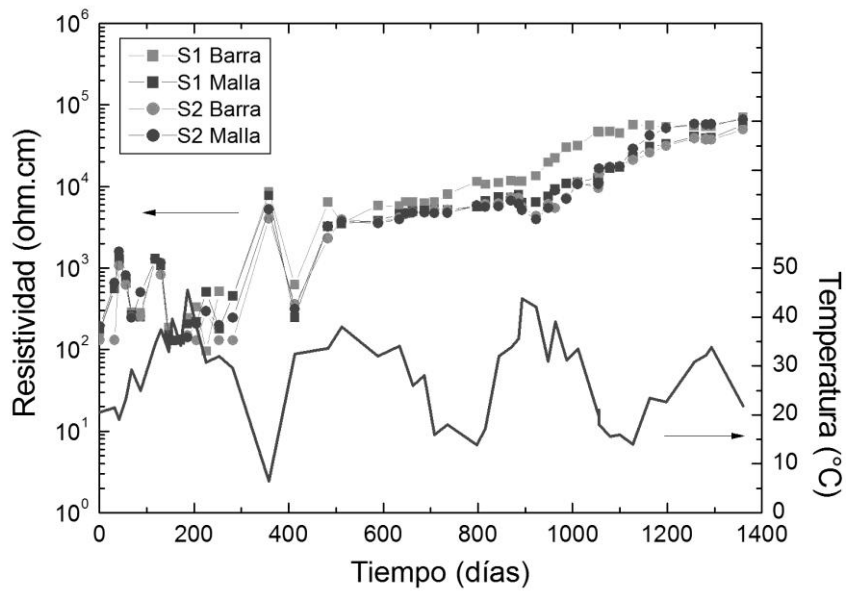
La figura 2 muestra la evolución de la temperatura interna de las estructuras y su comparación con la temperatura ambiente. Se puede apreciar que los valores de la temperatura de los prototipos van desde 5°C hasta 45°C y que, en la mayoría de las mediciones, la temperatura interior es superior a la temperatura exterior en hasta 15 grados (en temporada estival).



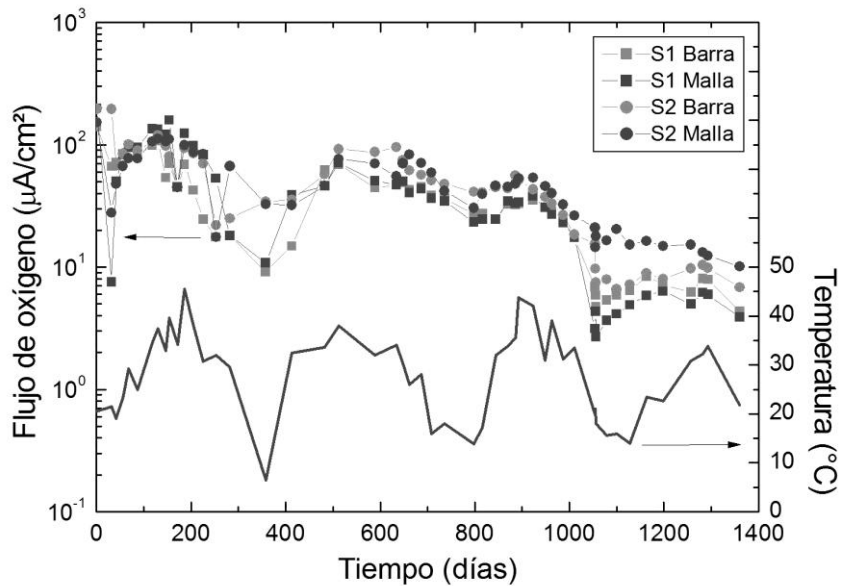
**Figura 2:** Evolución temporal de la temperatura interna de la estructura del hormigón fabricado con CPN, y la temperatura externa.

La figura 3 muestra las mediciones de resistividad del CPN conjuntamente con la temperatura externa. Se puede apreciar que la resistividad evoluciona de manera creciente, debido a los constantes procesos de hidratación del material, mediante los cuales disminuye la conectividad capilar. En ambos hormigones los valores se encuentran actualmente en el orden de 50000 ohm.cm. Además de su tendencia creciente, se observa un efecto de la temperatura, aumentando la resistividad cuando la temperatura disminuye, y viceversa.

En la figura 4 se muestra la evolución temporal del flujo de oxígeno. Se observa un continuo decrecimiento con el tiempo con influencia de la temperatura exterior: a mayor temperatura, mayor flujo. Luego de 3,5 años de mediciones, el valor obtenido es del orden de 4  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Es importante destacar que el oxígeno es el agente oxidante para las armaduras en contacto con el medio alcalino del hormigón, por tanto, el hecho de que decrezca el flujo con el tiempo, debe conducir a una menor velocidad de corrosión.

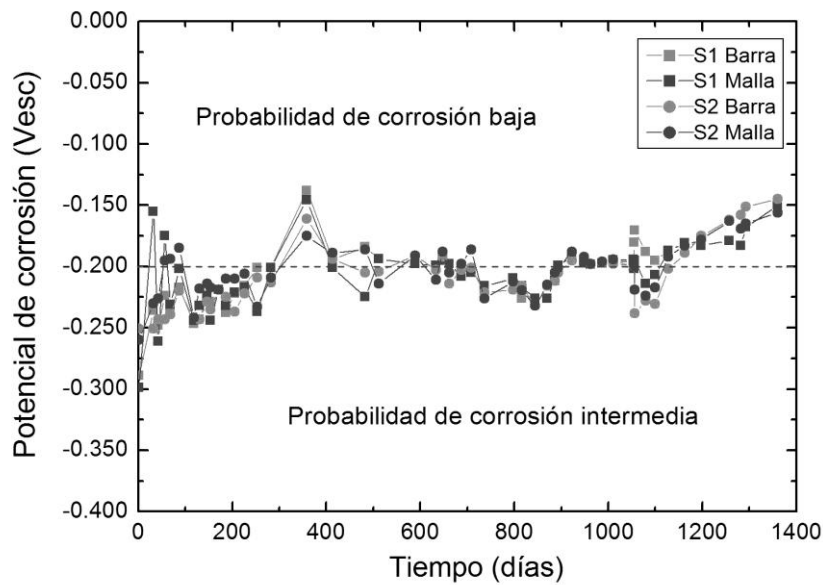


**Figura 3:** Evolución temporal de la resistividad del hormigón fabricado con CPN y la temperatura ambiente



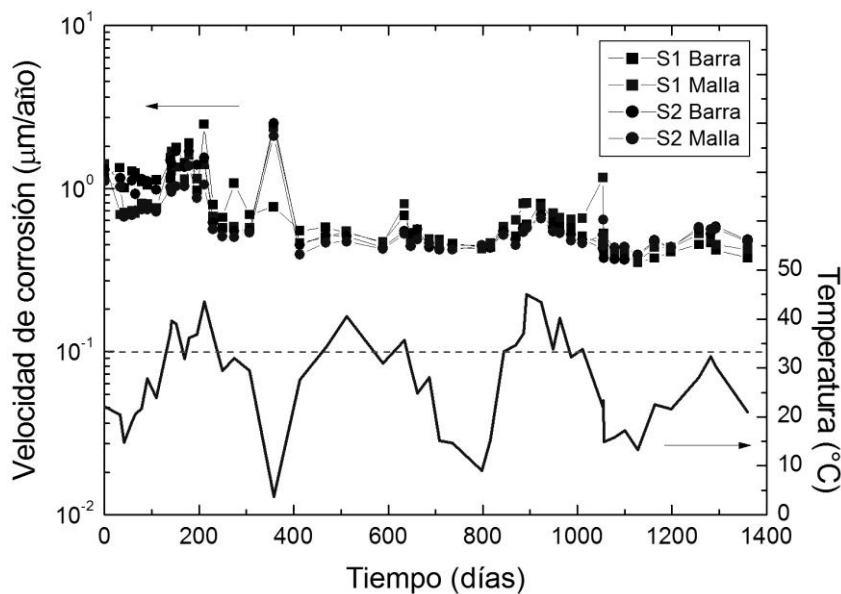
**Figura 4:** Evolución temporal del flujo de oxígeno en el hormigón fabricado con CPN y la temperatura ambiente

La figura 5 muestra la evolución de los potenciales de corrosión medidos con los sensores sobre las barras y mallas. El potencial de corrosión muestra una tendencia creciente con el tiempo y, a partir de aproximadamente 1100 días, se ubican dentro de la zona donde la norma ASTM 876 (4) indica una baja probabilidad de corrosión.

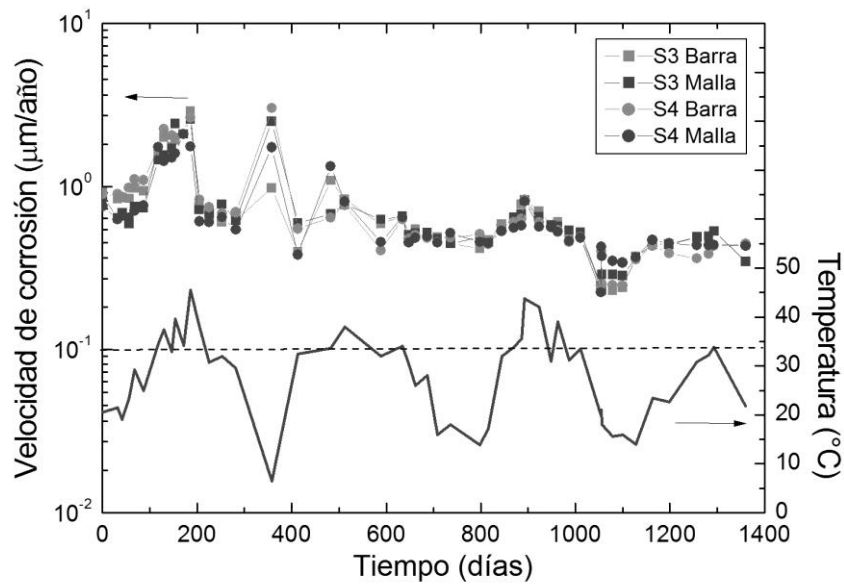


**Figura 5:** Evolución temporal del potencial de corrosión de las armaduras en el hormigón fabricado con CPN y la temperatura ambiente

Las figuras 6 y 7 muestran la evolución de las velocidades de corrosión obtenidas con los sensores en los prototipos fabricados con CPN y CPP, respectivamente. Se observa que el comportamiento es similar en ambos materiales, y que tiene una tendencia decreciente con el tiempo, alcanzando luego de 3,5 años de medición un valor de aproximadamente  $0,4 \mu\text{m/año}$ . Este valor es superior al recomendado para este tipo de instalaciones ( $< 0,1 \mu\text{m/año}$ ) (5), pero a juzgar por la tendencia, se espera alcanzar dicho valor a la brevedad.

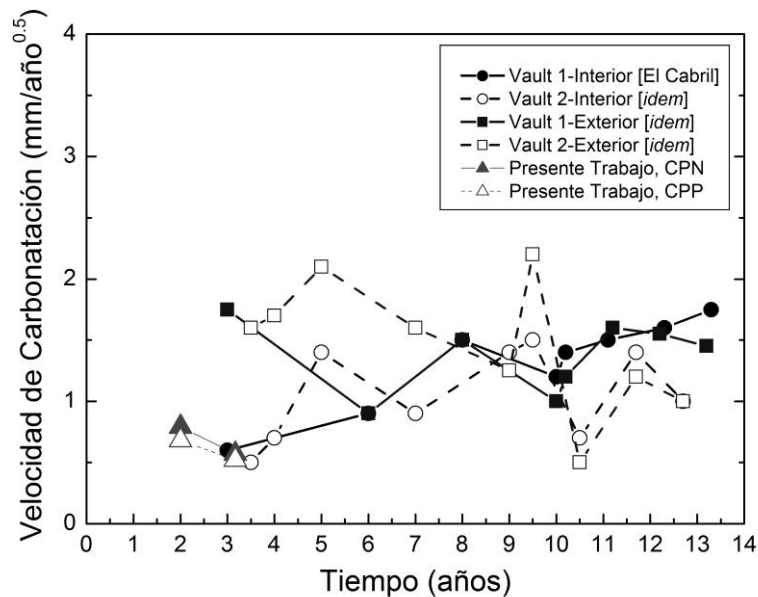


**Figura 6:** Evolución temporal de la velocidad de corrosión de las armaduras en el hormigón fabricado con CPN. Se incluye también la evolución de la temperatura ambiente. La línea horizontal muestra el valor umbral sugerido para este tipo de aplicación (5)



**Figura 7:** Evolución temporal de la velocidad de corrosión de las armaduras en el hormigón fabricado con CPP. Se incluye también la evolución de la temperatura ambiente. La línea horizontal muestra el valor umbral sugerido para este tipo de aplicación (5).

Las velocidades de carbonatación medidas en ambos materiales, luego de 2 y 3,4 años de exposición a la atmósfera, se muestran en la figura 8. En dicha figura se incluyen también valores informados en la literatura para hormigones destinados a aplicaciones similares a las estudiadas en el presente trabajo (6,7), concluyéndose que los hormigones ensayados presentan un comportamiento similar o superior respecto de aquellos.



**Figura 8:** Velocidades de carbonatación determinadas en el presente trabajo y datos obtenidos de la literatura para condiciones similares (6,7).

La localización del repositorio no ha sido definida aún, pero obviamente debe ser consistente con la durabilidad prevista para la instalación: a considerable distancia de una

fuentes de cloruros y en zonas con concentraciones normales de CO<sub>2</sub> u otros gases ácidos. Si se cumplen estas condiciones, la causa más importante de corrosión de las armaduras es estar dada por la penetración de dióxido de carbono que genere carbonatación de la estructura. En el presente trabajo, la velocidad de carbonatación medida luego de 3,5 años de exposición al medio exterior es de aproximadamente 0,57 mm/año<sup>0,5</sup> para ambos hormigones. Con dicho valor, es posible determinar que la penetración del frente carbonatado al cabo de 300 años será del orden de 10 mm, cuando el espesor de recubrimiento propuesto es de 50 mm. Con eso se concluye que los materiales ensayados cumplen (hasta el presente) con las especificaciones exigidas por el uso al que están destinados.

## CONCLUSIONES

Del presente trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Los refuerzos embebidos en hormigones fabricados con CPN y CPP presentan potenciales de corrosión dentro de la zona correspondiente a baja probabilidad de corrosión, con velocidades de corrosión levemente por sobre el valor umbral aconsejado para instalaciones del tipo estudiado, y con tendencia decreciente con el tiempo.

Los valores de las velocidades de carbonatación determinados en ambos tipos de hormigón, son lo suficientemente bajos como para que al cabo de 300 años de exposición al aire, la penetración de dióxido de carbono sea mucho menor al espesor de recubrimiento propuesto.

Aún no se dispone del sitio de instalación del repositorio y los resultados aquí presentados no son aun concluyentes. Se requiere de un tiempo de monitoreo mayor para asegurar la durabilidad de las estructuras, particularmente en las condiciones reales de instalación.

## REFERENCIAS

- (1) Convención sobre Gestión y Seguridad de Combustibles Gastados y Residuos Radioactivos. Reporte Nacional (2003), <http://www.cab.cnea.gov.ar/residuos/CC2003/001-Index.pdf> (disponible online al 25/3/2011).
- (2) Cemento. Cemento para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción. IRAM 50000 (2000), Buenos Aires, p.31
- (3) G. S. Duffó and S. B. Farina, "Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures", Construction and Building Materials, Vol. 23 (2003), 274-275.
- (4) ASTM C 876, "Standard test method for half-cell potential for uncoated reinforcing steel in concrete", American Society of Testing and Materials, Philadelphia (1987).
- (5) M.C. Andrade, M.C. Alonso, "Values of corrosion rate of steel in concrete to predict service life of concrete structures. Application of accelerated corrosion tests to service life prediction of materials", ASTM-STP 1194, G. Cragnolino, N. Sridhar, Eds., ASTM, Philadelphia (1994).
- (6) G.S. Duffó, E.A. Arva, F.M. Schulz and D.R. Vazquez, "Durability of a reinforced concrete designed for the construction of an intermediate-level radioactive waste disposal facility", Journal of Nuclear Materials, 420 (2011), 382-387.
- (7) C. Andrade, I. Martínez, M. Castellote, P. Zuloaga, "Some principles of service life calculation of reinforcements and in situ corrosion monitoring by sensors in the radioactive waste containers of El Cabril disposal (Spain)", Journal of Nuclear Materials, Vol. 358 (2006), 82-95.