

STUDIES CONCERNING THE DEGRADATION OF CONCRETE VAULTS FOR INTERMEDIATE-LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

Duffó, G.S.^{1,2}; Arva, E.A.¹; Farina, S.B.²; Giordano, C.M.¹ and Lafont, C.J.¹

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica – GAEN - GAIDAT

Unidad de Actividad Materiales

Av. Gral. Paz 1499 – (1650) San Martín – Buenos Aires – Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) – Argentina

ABSTRACT

The Argentine Atomic Energy Commission (CNEA) is the responsible for developing a management nuclear waste disposal programme. This programme contemplates the design and construction of a facility for the final disposal of intermediate-level radioactive wastes. The proposed model is the near-surface monolithic repository similar to those in operation in El Cabril, Spain. The design of this type of repository is based on the use of multiple, independent and redundant barriers. Since the vault and cover are major components of the engineered barriers, the durability of this concrete structures is an important aspect for the facilities integrity. This work presents a laboratory and field investigation performed for the last 6 years on reinforced concrete specimens, in order to predict the service life of the intermediate level radioactive waste disposal vaults from data obtained from electrochemical techniques. On the other hand, the development of sensors that allow on-line measurements of rebar corrosion potential and corrosion current density; incoming oxygen flow that reaches the metal surface; concrete electrical resistivity and chloride concentration is shown. Those sensors, properly embedded in a new full scale vault (nowadays in construction), will allow the monitoring of the corrosion process of the steel rebars embedded in the structure. All the information obtained from the sensors will be used for the final design of the container in order to achieve a service life more or equal than the foreseen durability for this type of facilities.

ESTUDIO DE LA DEGRADACION DEL HORMIGON ARMADO DE LOS CONTENEDORES DE RESIDUOS RADIOACTIVOS DE MEDIA ACTIVIDAD

Duffó, G.S.^{1,2}; Arva, E.A.¹; Farina, S.B.²; Giordano, C.M.¹ y Lafont, C.J.¹

(1) Comisión Nacional de Energía Atómica – GAEN – GIDAT – U.A. Materiales
Av. Gral Paz 1499 - (B 1650 KNA) - San Martín – Buenos Aires – Argentina
Tel. 54-11-6772-7403 – Fax. 54-11-6772-7388

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET) – Argentina

RESUMEN

La Comisión Nacional de Energía Atómica es la responsable del desarrollo de un programa de manejo de residuos radioactivos de media actividad que incluye la disposición final de estos residuos, y está basado en el uso de barreras múltiples, redundantes e independientes. Los componentes principales de la facilidad estarán fabricados en hormigón armado, y debe asegurarse una durabilidad superior a 300 años. En este trabajo se presentan los estudios llevados a cabo durante 6 años sobre el hormigón armado que fue seleccionado para la construcción de la facilidad, donde se han recolectado datos que permiten estimar la durabilidad de la construcción. Además, se presentan datos relacionados con el desarrollo de sensores que permitirán seguir *on-line* el desarrollo del proceso degradativo de estructuras de hormigón armado y que podrán ser utilizados en cualquier construcción para determinar la evolución de su estado en lo que concierne a la corrosión de las armaduras.

INTRODUCCIÓN

La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) es la responsable del desarrollo de estudios sobre un repositorio monolítico para la disposición final de residuos radiactivos de media actividad, debidamente acondicionados y conteniendo radionucleídos de vida media corta (1).

El objetivo de la gestión de los residuos es asegurar protección a las personas y al medio ambiente por un periodo de 300 años. Para lograr este objetivo, el criterio aplicado se basa en el uso de barreras múltiples, independientes y redundantes. Las barreras ingenieriles pueden agruparse en dos categorías principales: barreras físicas, para prevenir el ingreso de agua y biota y la liberación de radionucleídos; y barreras químicas para evitar la migración de radionucleídos por absorción e intercambio iónico una vez que los radionucleídos solubles han sido liberados de la fuente.

Las barreras que se utilizarán en el repositorio de residuos radiactivos de media actividad incluyen: material de relleno, contenedores de hormigón armado, cubierta y medio geológico. Debido a que el repositorio y su cubierta son los componentes principales de las barreras ingenieriles, la durabilidad del hormigón es un aspecto importante para la integridad de la facilidad.

Numerosos proyectos están involucrados en estos estudios, y uno de ellos está relacionado con el hormigón que se utilizará en la construcción del repositorio, como así también, en la construcción de los contenedores (para contener los tambores con los residuos acondicionados) los cuales serán depositados en el repositorio de hormigón. Por estas razones, desde hace 6 años se viene llevando a cabo un programa de investigación de la durabilidad del hormigón armado seleccionado para su empleo en la construcción de la facilidad. La investigación y desarrollo están dirigidos a establecer una metodología para determinar la vida útil del hormigón, a través del conocimiento de su rendimiento en el largo plazo en condiciones de operación.

La corrosión de las barras de acero de refuerzo es el principal proceso de degradación que puede causar la reducción prematura de la vida útil de cualquier construcción de hormigón armado. Si bien se han publicado numerosas investigaciones en este campo, muy pocas de ellas se refieren a las demandas específicas para el tipo de aplicación a que se refiere este trabajo. La actual experiencia con hormigones armados modernos es mucho más corta que la vida en servicio esperada para el repositorio y el contenedor de residuos radiactivos de media actividad; y este hecho requiere extrapolar resultados de experiencias de corto plazo a una vida prevista de 300 años (2).

Este trabajo presenta estudios de laboratorio y de campo realizados sobre probetas de hormigón armado conteniendo segmentos de barras de refuerzo, expuestas a diferentes medios agresivos, con el objeto de poder predecir la vida útil de repositorios de residuos radiactivos de media actividad a través de datos obtenidos mediante técnicas electroquímicas. Además, se determinaron los coeficientes de difusión de especies agresivas, tales como cloruro y dióxido de carbono. Por otro lado se construyó e instrumentó un prototipo de contenedor de residuos radiactivos de media actividad a escala real (1:1) con el objeto de monitorear la evolución en el tiempo de la velocidad de corrosión de las barras de refuerzo. Finalmente, se mostrarán los resultados obtenidos en el desarrollo de sensores de corrosión a ser embebidos en estructuras de hormigón armado y que permitan seguir la evolución del proceso degradativo en lo concerniente a la corrosión de las armaduras de acero.

PARTE EXPERIMENTAL

El estudio se llevó a cabo utilizando probetas de hormigón de 20 cm de alto y una sección cuadrada de 10 cm de lado, conteniendo segmentos de barras de refuerzo de 8 mm de diámetro. Estos segmentos de barra fueron posicionados de manera tal de

lograr un espesor de recubrimiento de hormigón de 2 cm. Cada probeta de hormigón contiene en su centro un electrodo de referencia interno (ERI) de titanio activado.

El diseño de mezcla utilizado en el presente trabajo fue seleccionado sobre la base de las propiedades mecánicas, pruebas de permeabilidad y trabajabilidad del hormigón (1,3). La composición de la mezcla fue la siguiente: $w/c=0,34$; contenido de cemento sulfato resistente (ARS) 410 kg/m^3 ; agregado fino, 810 kg/m^3 ; agregado grueso 1040 kg/m^3 ; súper plastificante del tipo bencenosulfonado, 1-2,5 %; aire incorporado, 2-3%. Previo al moldeo de las probetas, el hormigón fue pasado a través de un tamiz de malla 1/4". Las probetas fueron curadas por 7 días cubriendo la superficie del hormigón con un film plástico para evitar la deshidratación. La resistencia a la compresión evaluada a los 28 días varió entre 50 y 54 MPa.

Después de un período de acondicionamiento de 100 días, las probetas fueron expuestas a tres medios diferentes: parcialmente inmersas en solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl) al 3,5% m/m, parcialmente inmersas en solución acuosa de sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 5% m/m y expuestas a carbonatación natural en atmósfera de laboratorio (temperatura ambiente y 60-70% de humedad relativa).

Los parámetros electroquímicos empleados habitualmente para caracterizar el comportamiento de la corrosión para barras de refuerzo en hormigón armado fueron monitoreados periódicamente durante aproximadamente 2100 días. Estos parámetros fueron: el potencial de corrosión (E_{corr}) (4), la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) obtenida de mediciones de resistencia de polarización (R_p) (5) y la resistividad eléctrica del hormigón (ρ) determinada mediante mediciones de resistencia eléctrica entre dos segmentos de barra.

Los perfiles de concentración de cloruro para probetas de hormigón cilíndricas (10 cm de diámetro y 10 cm de altura) parcialmente inmersas en solución acuosa de NaCl al 3,5% m/m fueron calculados después de 1750 días de exposición y la profundidad de carbonatación, utilizando el método de la fenolftaleína, a los 2350 días de exposición.

Por otra parte, se estudió la evolución a lo largo de 1900 días de los mismos parámetros electroquímicos medidos en las probetas de hormigón, sobre un prototipo de contenedor de residuos radiactivos (1:1) instrumentado al efecto.

En cuanto al desarrollo de sensores, uno de sus componentes principales es el electrodo de referencia. El material estudiado en el presente trabajo es producido comercialmente para actuar como ánodo durante la protección catódica de estructuras de hormigón armado por corriente impresa. Estos electrodos son denominados metal-óxido de metal (MOM), y consisten en un sustrato de titanio recubierto con óxidos mixtos de metal por medio de una técnica propiedad de la empresa proveedora (WWI Procat, S.L., Madrid, España). Los electrodos así fabricados resultaron alambres de 3 mm de diámetro cuyo análisis por Energía de Dispersión de Rayos X (EDAX), reveló la

presencia de titanio, iridio y tantalio, supuestamente bajo la forma de óxidos de dichos metales.

Los electrodos ensayados fueron de 4 cm de longitud con un contacto de cobre. La interfase entre el electrodo y el contacto de cobre (que estaba revestido por material aislante en toda su longitud libre) fue cubierto con un material termocontraíble, mientras que el otro extremo del electrodo fue pintado con una resina epoxídica hidrófoba.

A efectos de determinar el comportamiento de estos electrodos en función del pH del medio circundante, los electrodos fueron sumergidos en soluciones reguladoras, cuyos valores de pH estuvieron comprendidos dentro del ámbito habitual de pHs de hormigones sanos y fuertemente carbonatados (entre 13,5 y 7, respectivamente) (6). Se determinó el potencial de estos electrodos frente a un electrodo de calomel saturado, en las soluciones mencionadas anteriormente, durante 40 días como mínimo. Estos ensayos se hicieron por triplicado sobre diferentes electrodos sumergidos en la misma solución.

Para estudiar el efecto del grado de oxigenación sobre los potenciales medidos, se sumergieron electrodos en una solución de pH 13,5 y se burbujeó a través de ella, en forma alternada, nitrógeno de alta pureza y aire durante periodos de 24 horas hasta totalizar 100 horas de exposición, durante las cuales se midió la evolución del potencial de los electrodos frente a un electrodo de calomel saturado.

En otra serie de ensayos, se estudió el efecto del contenido de cloruro sobre el potencial de los electrodos de MOM. Para ello, se introdujeron electrodos de MOM en soluciones de cloruro conteniendo entre 0,35 ppm y 35000 ppm a pH 7, y se determinó el valor del potencial a intervalos regulares durante 15 días, frente a un electrodo de calomel saturado. También se estudió el comportamiento de estos electrodos embebidos en un mortero, con y sin contaminación de cloruros.

Los sensores se complementan con electrodos auxiliares de acero inoxidable AISI 316 L (para determinar la resistividad eléctrica del hormigón, el flujo de oxígeno que alcanza a las armaduras y su velocidad de corrosión) y con un electrodo de plata/cloruro de plata (para determinar el contenido de cloruro en el hormigón).

RESULTADOS EXPERIMENTALES

La evolución del potencial de corrosión en función del tiempo (hasta 2100 días) muestra que en las probetas expuestas al ambiente de laboratorio, el potencial de corrosión es mayor que $-0,200 \text{ V}_{\text{Cu/SCS}}$ revelando un estado pasivo de las armaduras (Figura 1). Los potenciales de corrosión de las barras medidos en probetas parcialmente inmersas en solución acuosa de NaCl 3,5% m/m, inmediatamente después de ser expuestas muestran valores cercanos a $-0,200 \text{ V}_{\text{Cu/SCS}}$, con una tendencia creciente hasta los primeros 750 días de exposición y luego comienza a descender. Finalmente, el potencial de corrosión de las barras para las probetas parcialmente inmersas en solución

acuosa de Na_2SO_4 al 5% m/m muestra una tendencia similar al de las barras de las probetas parcialmente inmersas en NaCl: el potencial de corrosión inicial está comprendido entre $-0,150 V_{\text{Cu}/\text{SCS}}$ y $-0,300 V_{\text{Cu}/\text{SCS}}$ y a partir de los 800 días comienza a descender.

La evolución de la densidad de corriente de corrosión en las barras (i_{corr}) permaneció casi constante y cercana a $10^{-8} \text{ A cm}^{-2}$ durante los 2100 días de exposición en cada condición de exposición (Figura 2). Estos resultados son una clara señal de que el acero presenta un estado pasivo.

La evolución de la resistividad eléctrica del hormigón (ρ) expuesto a las diferentes condiciones de ensayo muestra que en todos los casos los valores medidos aumentan con el tiempo de exposición, siendo este hecho una indicación del continuo proceso de curado del hormigón. Como era de esperar, las probetas expuestas al ambiente de laboratorio mostraron los valores más altos de ρ , alcanzando $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ después de 2100 días de exposición. Por otro lado, las resistividades eléctricas medidas en las probetas parcialmente inmersas en soluciones acuosas de NaCl y Na_2SO_4 fueron muy similares entre sí, mostrando valores de aproximadamente $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ después del mismo tiempo de exposición. Después de determinado el perfil de concentraciones de cloruro para probetas parcialmente inmersas en solución acuosa de NaCl 3,5% m/m a los 1750 días de exposición, se obtuvieron los siguientes valores del coeficiente efectivo de difusión (D_{eff}) y la concentración superficial (C_s): $2,8 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y 2,6 % (base cemento) respectivamente. Estos valores presentan una buena correlación con aquellos reportados por Bamforth (7) para estructuras sometidas a atmósfera marina (condición extrema). No se observó evidencia de carbonatación en el hormigón después de un período de exposición de 2350 días. La constante k de la ecuación $x = k \cdot t^{0.5}$, siendo x la profundidad de carbonatación y t el tiempo de exposición, es menor que $0,395 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-0.5}$, teniendo en cuenta un límite de detección para x de 1 mm.

La evolución del potencial de corrosión en función del tiempo para los sensores de corrosión embebidos en el prototipo a escala real del contenedor de residuos radiactivos, muestra que luego de 1900 días de exposición, las barras permanecen pasivas con potenciales de corrosión más altos que el límite potencial de ruptura del estado de pasividad.

En este punto, es importante destacar que hasta el momento, no ha sido determinado cuál será el sitio de localización del repositorio de residuos radioactivos de media actividad. Por supuesto que la ubicación deberá ser compatible con una durabilidad mayor que 300 años, es decir, en un sitio a considerable distancia de fuentes de cloruros y con una concentración normal de CO_2 . Teniendo en cuenta estos principios, la única causa de corrosión de las armaduras sería la carbonatación del contenedor durante el periodo en el cual estará en contacto con el aire. Teniendo en cuenta la velocidad de difusión del CO_2 en la estructura, luego de 300 años, la profundidad de carbonatación será menor que 7 mm, valor mucho menor que el espesor de recubrimiento previsto. Luego, se concluye que el hormigón en estudio cumple con los requerimientos de 300 años de duración. Cabe aclarar que en el presente trabajo, la

influencia de iones cloruro y sulfato fue estudiada al solo efecto de evaluar el comportamiento de hormigón bajo la posibilidad de contaminación accidental de la facilidad.

En cuanto al desarrollo de electrodos de referencia para su uso en sensores, la evolución de los potenciales de los electrodos de MOM durante 40 días de exposición en función del pH de la solución empleada muestra que los potenciales son mayores a medida que disminuye el pH de la solución. Cuando se determina el efecto de la presión parcial de oxígeno, se observó que los electrodos MOM producen valores *quasi* constantes e independientes del contenido de oxígeno en la solución. Esto pone de manifiesto la independencia de la reacción que controla el potencial en los electrodos de MOM con el contenido de oxígeno en la solución. Los electrodos presentaron valores de potencial estables y reproducibles al ser embebidos en morteros con y sin contaminación de cloruros.

Cuando se superponen los valores promedios de los potenciales de los electrodos MOM en todas las soluciones luego de 40 días de ensayo, con el diagrama de Pourbaix del sistema Ir/H₂O, se encuentra una dependencia del potencial de estos electrodos con el pH de las soluciones empleadas. El potencial varía linealmente con el pH siendo la pendiente de 51 mV por unidad de pH. Esta circunstancia, y en el hecho de que los potenciales medidos sean independientes del contenido de oxígeno en la solución, sugieren que la reacción que controla el valor del potencial de estos electrodos de MOM es:



cuya pendiente es de 52 mV por unidad de pH, valor muy próximo al determinado experimentalmente. Las reacciones que involucran directamente al oxígeno disuelto parecen jugar sólo un rol secundario en los electrodos MOM (al menos a tiempos cortos). Este fenómeno es de suma importancia cuando se trata de utilizar a estos electrodos embebidos en hormigón, donde la concentración de oxígeno puede variar significativamente a lo largo de la vida útil de la estructura.

Al determinar los potenciales del electrodo de MOM en presencia de distintas concentraciones de cloruro a pH 7 se observó que la variación del potencial es de aproximadamente 26 mV por cambio de década de concentración de cloruro, valor lo suficientemente bajo como para concluir que estos electrodos pueden ser empleados en presencia de distintas concentraciones de cloruro.

Por todo lo expuesto se observa que los electrodos de MOM analizados en el presente trabajo pueden ser empleados adecuadamente como electrodos de referencia embebidos en el hormigón ya que presentan buena estabilidad y reproducibilidad embebidos en morteros y muestran baja sensibilidad a cambios que ocurren en servicio (variaciones del pH, de la presión parcial de oxígeno y del contenido de cloruro).

El electrodo específico de cloruro fue fabricado mediante el anodizado de alambres de plata 99,99% en soluciones que contienen KCl y HCl, luego de un

tratamiento de activación de la superficie. El potencial de estos electrodos fue medido frente a un electrodo de calomel saturado en soluciones de KCl en un ámbito de concentraciones comprendido entre 10^{-5} y 1 M, a efectos de determinar la recta de calibración. Los resultados obtenidos muestran una muy buena correlación ($r^2= 0,92$) entre el potencial del electrodo específico y el logaritmo de la concentración de iones cloruro, con una pendiente cercana a la predicha por la ecuación de Nerst para este sistema ($-0,063\pm 0,003$).

La disponibilidad de oxígeno es obtenida a partir de la corriente circulante entre dos electrodos inertes, cuando uno de ellos es polarizado catódicamente en la zona correspondiente a la corriente límite de oxígeno. La densidad de corriente I que circula luego de determinado tiempo es convertida en flujo de oxígeno con la ley de Faraday:

$$\frac{\text{moles } O_2}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} = \frac{I}{4 \cdot F}$$

donde F es la constante de Faraday (96500 coul/equiv).

La resistividad eléctrica del hormigón (ρ) es medida aplicando una señal sinusoidal de baja amplitud entre dos electrodos inertes similares y calculando el valor de la resistencia entre ellos (R_s). La constante de la celda (k) es determinada midiendo las resistencias de soluciones de resistividad conocida (soluciones de para concentraciones comprendidas entre 10^{-5} y 1M) de manera que $\rho=k \cdot R_s$.

El potencial de corrosión (E_{corr}) es medido entre un electrodo de trabajo construido con una barra de acero de construcción y el electrodo de referencia, mientras que la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) se determina polarizando catódicamente al electrodo de trabajo, empleando como contraelectrodo a un material inerte, y midiendo el potencial del acero luego de cierto periodo de tiempo (E). La resistencia de polarización (R_p) es obtenida como:

$$R_p = -\frac{E - E_{\text{corr}}}{I} - R_s$$

donde R_s es la resistencia medida se acuerdo a lo detallado en el párrafo anterior. Finalmente, la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) se obtiene con la expresión:

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

siendo B una constante que en el presente caso vale 26 mV.

Finalmente, la temperatura es medida con un termómetro de resistencia de platino (Pt 100) protegido del medio que la rodea por medio de una vaina de un material protector. Todos los electrodos mencionados, conjuntamente con el termómetro de

platino son embebidos en una resina especial, resistente al medio alcalino del hormigón, y el resultado final se muestra en la figura 3.

La parte expuesta de los electrodos (y el termómetro envainado) son luego recubiertos con un mortero de reparación y el conjunto es montado sobre las armaduras para el caso de una construcción nueva o embebido en una estructura ya existente por medio de la realización de una perforación y su posterior cobertura con mortero de reparación.

El sensor es luego conectado por medio de un cable a una caja de control que a su vez está conectada por medio de un puerto USB a una computadora portátil, la cual tiene cargado el software desarrollado desarrollado, que permite secuenciar las mediciones, guardar los datos en una base y generar un sistema de alarmas cuando alguno de los valores cruza umbrales preestablecidos. En cuanto a los métodos de medición, la temperatura, el potencial de corrosión y el potencial del electrodo específico de cloruros se determinan en forma pasiva a partir de datos generados por el sensor; mientras que para las mediciones de la resistividad eléctrica del hormigón, el flujo de oxígeno y la densidad de corriente de corrosión es necesario generar una señal que perturbe al sensor y lo que se mide es la respuesta a esta perturbación.

Hasta el momento, estos sensores han sido embebidos en un prototipo de contenedor de residuos radioactivos fabricado en la CNEA y en varios sectores de una represa hidroeléctrica ubicada en el sur del país. Los resultados son promisorios y permiten el seguimiento del estado de una estructura de hormigón armado desde el punto de vista del proceso de corrosión.

CONCLUSIONES

Del presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El hormigón fabricado con cemento sulfato resistente provee a las armaduras de un estado pasivo con velocidades de corrosión menores que $1 \mu\text{m}/\text{año}$.
- Los valores del coeficiente efectivo de difusión de cloruro y su concentración superficial cuando el hormigón es expuesto a condiciones extremas (agua de mar) son adecuadamente bajos, del mismo modo que lo es la velocidad de difusión de CO_2 .
- La resistencia eléctrica del hormigón tiene una tendencia creciente en el tiempo, lo que refleja el continuo curado del hormigón a lo largo del tiempo.
- La profundidad de carbonatación luego de 300 años se prevé será menor que el espesor de recubrimiento, lo que implica que el hormigón en estudio es adecuado para cumplir con las especificaciones de durabilidad.
- Se ha desarrollado un sensor embebible en estructuras de hormigón armado, de bajo costo y que permite el seguimiento de los procesos de corrosión en estructuras nuevas o preexistentes. Este sensor provee información *on-line* del potencial y densidad de corriente de corrosión de las armaduras, la resistividad eléctrica del hormigón, la

disponibilidad de oxígeno, el contenido de cloruro y la temperatura en el interior de la estructura.

REFERENCIAS

- (1) Ramallo, T.R.; Pahissa, M.H.; Mansilla, G., Checmarew, L.; “Durable concrete for medium radioactive waste in a surface disposal facility”, Proceedings Post Conference Seminar on Waste Repository Technology and Management - ENRESA, Iguazú, Argentina, (1995), Pag. 41
- (2) Andrade, C.; Alonso, M.C.; “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. Cragolino, N. Sridhar, Eds., Philadelphia (1994).
- (3) Arva, E.A.; Morris, W.; Alvarez, M.G.; Duffo, G.S., “Life prediction of intermediate-level radioactive waste disposal vaults”, Corrosion 2004, paper 04684.
- (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) Stern, M.; Geary, A. L.; “Electrochemical Polarization: I. A theoretical analysis of the shape of the polarization curve” J. Electrochem. Soc., 104, (1957) 56-63.
- (6) Castro, P.; Sagüés, A.A.; Moreno, E.I.; Maldonado, L.; Genescá, J.; “Characterization of Activated Titanium Solid Reference Electrodes for Corrosion Testing of Steel in Concrete Corrosion”, 52 (8), (1996) 609-617.
- (7) Bamforth, P.; “Predicting the risk of reinforcement corrosion in marine structures”, Corrosion Prevention & Control, 8, (1996) 91-100.

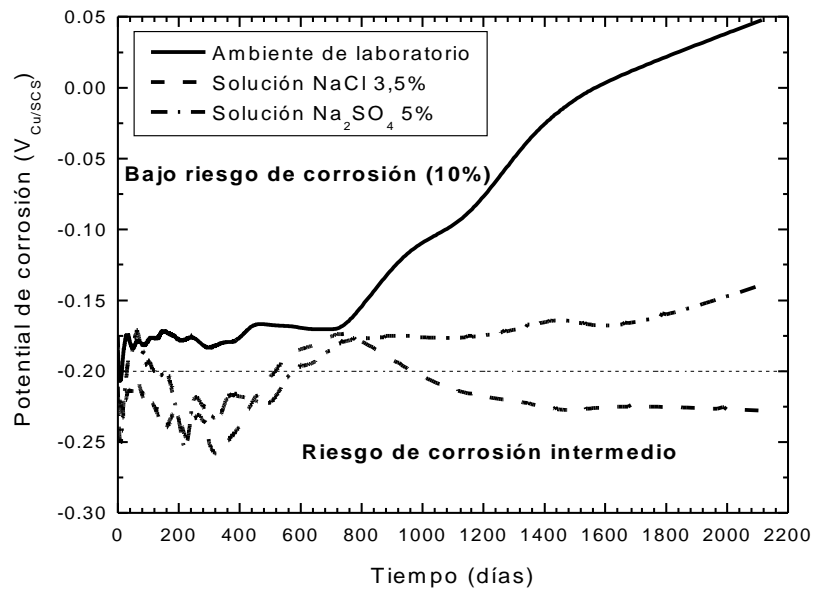


Figura 1.- Evolución del potencial de corrosión de barras de acero embebidas en hormigón y sometidas a diferentes condiciones experimentales.

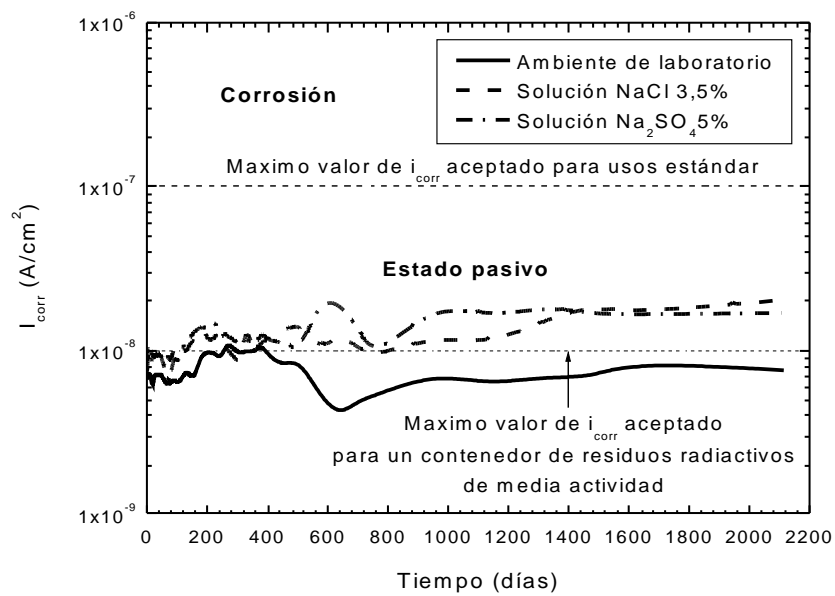


Figura 2.- Evolución de la densidad de corriente de corrosión de barras de acero embebidas en hormigón y sometidas a diferentes condiciones experimentales.

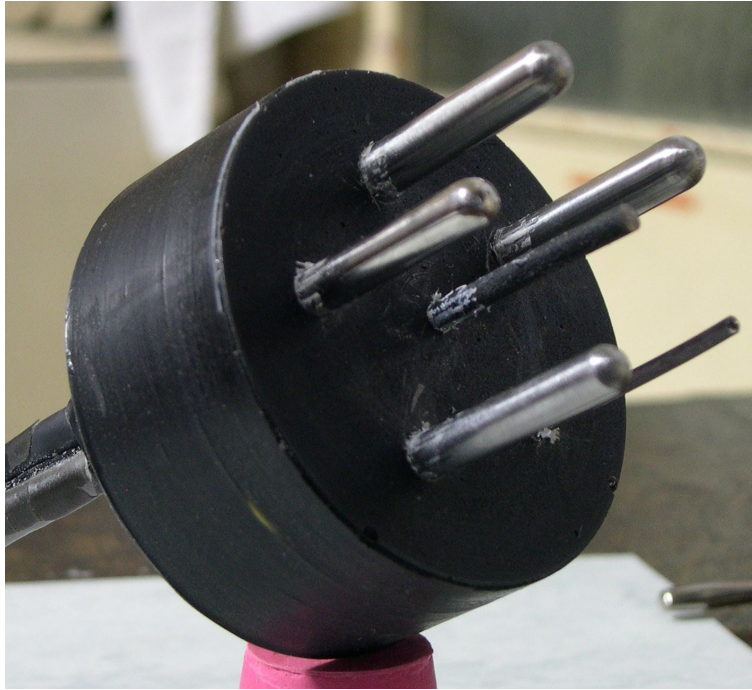


Figura 3.- Aspecto final del sensor desarrollado previo a su cobertura con mortero de reparación

