



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



**DIAGNÓSTICO “IN SITU” DE PROBLEMAS DE CORROSIÓN
EXISTENTES EN ESTRUCTURAS REALES**

N. Rebolledo¹, C. Andrade¹

¹Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”, Serrano Galvache, 4 – 28002 Madrid, España

ABSTRACT

Reinforced concrete is the most usual material used in tunnels, bridges and builds. The record of modern concrete is no longer than about 100 years. During this time, the concrete can present several chemical and mechanical problems, reducing their target service life. In order to study the performance evolution in a real tunnel, passive sensors have been placed in some points of a tunnel in Madrid. With different aggressive environments, corrosion potential, liquid water content, internal and external temperature and relative humidity of the structure are being measured. One year later, the points located under the phreatic level, present corrosion potential around -300mV (Mn/MnO₂). The potential is more cathodic in the zones without presence of liquid water. In all the cases, the temperature and relativity humidity has remained constant. In the present study describes the sensors used and the indicators that are obtained from them.

Keywords: corrosion reinforced concrete, sensors and service life.

RESUMEN

El hormigón armado es el material más utilizado en la actualidad para la construcción de túneles, puentes y edificios. Actualmente, se calcula que la media de vida para este tipo de hormigones no es superior a 100 años. Durante este tiempo, el hormigón puede sufrir problemas de tipo químico o mecánico, lo cual reduce aun más su tiempo de vida en servicio. El estudio del comportamiento de la estructura puede suponer la detección previa de patologías dando lugar a la prolongación de su vida útil. Con este fin, se han instalado sensores electroquímicos de tipo pasivo en un túnel en servicio en Madrid, observando variables como el potencial de corrosión, la presencia de agua líquida, la temperatura interna y externa y la humedad relativa a la que es sometida la estructura. Los sensores han sido instalados en distintos puntos estructurales, sometidos a diferentes agresiones ambientales, observándose como un año después de su instalación, los puntos situados bajo el nivel freático, con problemas de filtraciones, presentan un potencial de corrosión en torno a -200 mV (Mn/MnO₂), mientras que en aquellos puntos donde no existe presencia de agua líquida el potencial de corrosión se sitúa en valores positivo. La temperatura y humedad relativa exteriores han sido constantes en todos los puntos seleccionados independientemente de las condiciones meteorológicas. En el presente estudio se describen los sensores utilizados y los indicadores que se obtiene de ellos.

Palabras clave: corrosión, hormigón armado, sensores electroquímicos y vida de servicio.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



1. Introducción

El hormigón armado es uno de los materiales más versátiles y económicos en el mundo de la construcción, con un alto rendimiento a lo largo de toda su vida útil. Sin embargo, los problemas de corrosión del armado embebido disminuyen seriamente su capacidad [1] [2]. El acero se recubre de una capa pasiva estable frente a la corrosión debido a la alta alcalinidad del hormigón que lo cubre, sin embargo ésta puede romperse por la acción de los iones cloruro (a partir de sales de deshielo o de agua de mar) o a la reducción del pH debido a los procesos de carbonatación, dando lugar al inicio de la corrosión, que sin control, da lugar a importantes pérdidas de sección en el armado con importantes repercusiones para la seguridad estructural [3][4]

Actualmente, el control de estructuras se limita a la inspección mecánica y química, la cual no suministra información sobre el inicio y proceso de corrosión, sin embargo la instalación de sensores en estas estructuras, permitiría controlar el riesgo de corrosión y tomar medidas de protección antes de que se produzcan importantes pérdidas de sección en el armado, reduciendo los costes económicos producidos por la limpieza o reemplazo de ésta [5][6][7].

Existe abundante bibliografía a cerca de sensores electroquímicos embebidos en estructuras de hormigón armado, lo cual no permite monitorizar estructuras ya existentes, sin generar grandes cavidades para introducirlos, que en ocasiones pueden dar a problemas estructurales, lo que unido a los grandes equipos de recogida de datos, hacen complicadas este tipo de instalaciones.

El propósito de esta investigación es desarrollar un sistema de sensores capaz de detectar el inicio de la corrosión en estructuras de hormigón armado instalado sobre la superficie de estas. Acoplado un pequeño *datalogger* de pequeñas dimensiones, de modo que el conjunto no tenga unas dimensiones de 10x10x20cm.

2. Medidas realizadas

El grupo de sensores instalados debe proporcionar unas *cualidades integradas* a cerca de la calidad del hormigón y el estado del armado. Así, el presente estudio incluye valores de potencial de corrosión que si bien, no cuantifican el estado del acero, permiten evaluar el cambio del estado pasivo al estado activo. La presencia de agua líquida se relaciona de forma directa con la resistividad del hormigón y la evaluación del cambio en su temperatura puede influir de forma directa en la cinética del proceso de corrosión.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Potencial electroquímico

El potencial de corrosión (E_{corr}) no cuantifica la velocidad de corrosión de la armadura, pero sus valores proporcionan un indicativo de la presencia o ausencia de corrosión, siendo un buen indicador del estado de la armadura.

La medida de potencial de corrosión consiste en determinar la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y un electrodo de referencia que se coloca en contacto con la superficie del hormigón. Por ello, es completamente necesario tener contacto eléctrico con la armadura medida.

La interpretación de las medidas de potencial de corrosión se suele hacer calificando el riesgo según el criterio de la norma ASTM C-878 [8][9].

Tabla 1. Clasificación en niveles del potencial de corrosión

E_{corr} (cu/CuSO₄) / V	Nivel de corrosión
> -0,2	10%
-0,2 a -0,35	50%
< -0,35	90%

Contenido de agua líquida

El contenido de agua líquida se detecta a través de la diferencia de potencial entre un par galvánico generado por la unión de dos hilos paralelos de diferentes metales. El control de la diferencia de potencial entre ambos metales embebidos en el hormigón constituye un avisador de la llegada de humedad al mismo, siendo de gran utilidad para establecer zonas con mayor riesgo de corrosión [10][11].

En el caso de la presencia de agua líquida, una diferencia mayor de potencial indica mayor presencia de agua. La saturación total de agua en el sensor ofrece una diferencia de potencial de -650mV, mientras que la ausencia de la misma, daría un valor de 0mV. Con el estudio de la diferencia de potencial ofrecido por este tipo de sensores, se pretende estudiar de manera cuantitativa la variación de la presencia de agua líquida en el interior de los poros de la estructura, relacionada de manera directa con la resistencia de éste.

Temperatura

La temperatura, influye en el proceso de corrosión, y produce dos efectos contrapuestos: acelera o retarda la corrosión. Así, cuando la temperatura aumenta, se produce la evaporación del agua de los poros y se elimina el oxígeno. Por tanto, aunque la corrosión se ve favorecida por el

aumento de temperatura, el incremento en resistividad y la eliminación de oxígeno (menos solubilidad a altas temperaturas) puede contrarrestar la mayor corrosión. Por el contrario, el descenso de la temperatura puede provocar condensaciones que darán lugar a un aumento de la corrosión.

3. Tipos de sensores utilizados

Los sensores para la evaluación de la durabilidad del hormigón y corrosión de la armadura se han colocado embebidos en el recubrimiento de hormigón. Los sensores están diseñados específicamente para su uso en hormigón armado, por lo que son suficientemente robustos para resistir la alcalinidad del hormigón a largo plazo.

Los sensores para la realización de las medidas han sido los siguientes.

Sensor de potencial de corrosión

A través de este tipo de sensores es posible conocer el potencial de corrosión del acero monitorizado. La *Figura 1* muestra un esquema de la colocación de un sensor de potencial de corrosión sobre la superficie de una estructura. Uno de los cables (polo negativa) se conecta a un electrodo de referencia de Mn/MnO₂ que se dispone sobre la superficie de la estructura, mientras que otro (polo positivo) se fija directamente al acero estudiado. Con ayuda de un *datalogger* es posible extraer medidas de diferencia de potencial, evaluando el estado de corrosión del acero (ver *Tabla 1*).



Figura 1. Esquema de colocación de un sensor de potencial de corrosión

Sensor de agua líquida

Los sensores de detección de agua líquida proporcionan de manera cualitativa la cantidad de agua en el interior de los poros del hormigón. Para ello, llevan insertados un par galvánico generado por dos chapas paralelas de dos metales diferentes en el interior de una funda recubierta de material conductor, de manera que si existe presencia de agua líquida, el material se humedece generando una diferencia de potencial que aumenta a medida que lo hace la presencia de agua. La Figura 2 muestra una fotografía del sensor de detección de agua líquida.



Figura 2. Sensores para la medida del contenido de agua líquida.

Sensor de temperatura

El sensor de temperatura es un termopar comercial marca Onset Computer Corporation, con un rango de medida comprendido entre 40 y -30°C. La unión los metales que se encuentran en su interior produce una diferencia de voltaje función de la diferencia de temperatura entre ambos. Los valores se obtienen directamente en °C a través de un dispositivo de adquisición de datos.

4. Emplazamiento de los sensores

Los sensores fueron instalados en uno de los túneles en servicio de Madrid, España. Seleccionando dos de las dovelas de uno de las zonas auxiliares del túnel, y un muro de carga en la zona inferior de uno de los pozos de emergencia. La elección de los puntos se llevo a cabo según los siguientes criterios:

- Tipología estructural. Se diferenciaron dos tipos de elementos estructurales, según la tipología: Dovelas (D) y Pilares (P).
- Agresividad ambiental. Se diferencian dos tipos de ambientes. La EH-91, establece diferentes tipos de ambientes en función del grado de agresividad para las armaduras. En este caso se ha seleccionado el ambiente IIa (Dovela (DA) y pilar (P) con filtraciones

visuales), que corresponde a estructuras en contacto con aguas normales o en ambientes que se sobrepasa el 60% de HR más de 90 días al año y el ambiente IIb, que corresponde a estructuras secas (dovela sin filtraciones visuales, DB).

En la figura 4 se muestran dos de los puntos donde se instalaron los grupos de sensores.



Figura 4. Puntos de instalación de los sensores.

Los sensores se encuentran sobre la superficie de ambas estructuras, protegidos junto con los cables de conexión y el dispositivo de toma de datos, en una caja de poliuretano de apenas 10x15x10 cm de dimensión.

5. Resultados

Potencial de corrosión

La Figura 3 muestra la evolución del potencial de corrosión registrados en cada uno de los puntos de medida (vs Mn/MnO₂), durante los meses que estos sensores llevan instalados.

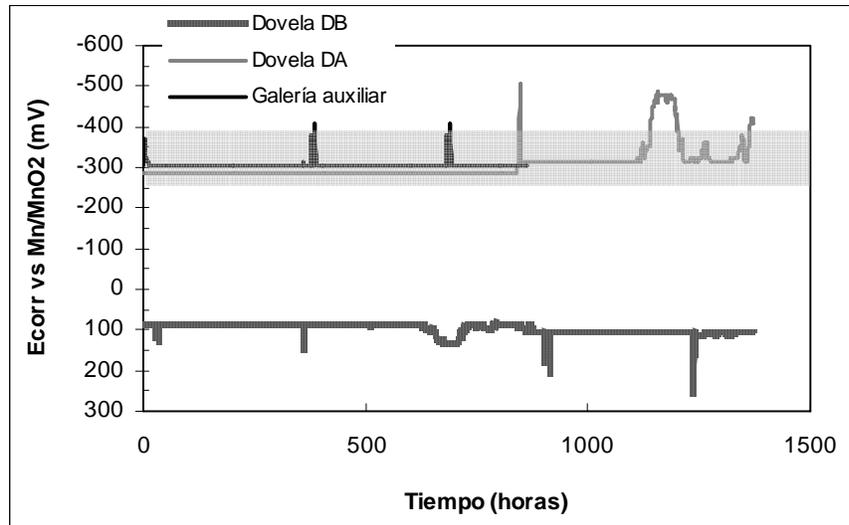


Figura 3. Medidas de potencial de corrosión registradas por los tres grupos de sensores instalados.

Se observa una diferencia en el potencial de corrosión entre la dovela expuesta a filtraciones (DA) y la que no esta expuesta (DB). En el caso de DA, los valores se mantiene en torno a -300mV, situándose en -600 mV en algún momento puntual. Mientras que para el caso de DB, los valores son mucho más positivos, y por lo tanto alejados de umbral de corrosión, es por tanto, que la presencia de agua en estas estructuras esta influyendo de manera directa sobre la corrosión de la armadura.

Los valores de potencial obtenidos para el sensor situado en la galería auxiliar, por debajo del nivel freático y también con filtraciones visuales, se sitúan en torno a -310 mV, con subidas de hasta -500 mV en momentos muy puntuales. Estas variaciones sitúan el valor de Ecorr muy cerca del valor umbral establecido para la presencia de corrosión, situado en -350 mV.

Presencia de agua líquida

La Figura 4 indica las variaciones de potencial de corrosión del sensor de detección de agua líquida. En el caso de la dovela expuesta a filtraciones (DA), se observa un mayor diferencia de potencial, lo cual corresponde a mayor cantidad de agua líquida en el interior de los poros del hormigón. Esta disminuye con el tiempo, aunque se observa un pico en torno a los 1200 días, coincidiendo con el aumento en el potencial de corrosión. Para el caso de la dovela DB (sin filtraciones visuales), la diferencia de potencial obtenida, se mantiene constante en torno a 0,1 V, lo cual indica baja concentración de agua líquida.

Para el sensor situado en la galería auxiliar, la diferencia de potencial obtenida también es muy baja, con un ligero aumento entre los 700 y 800 días.

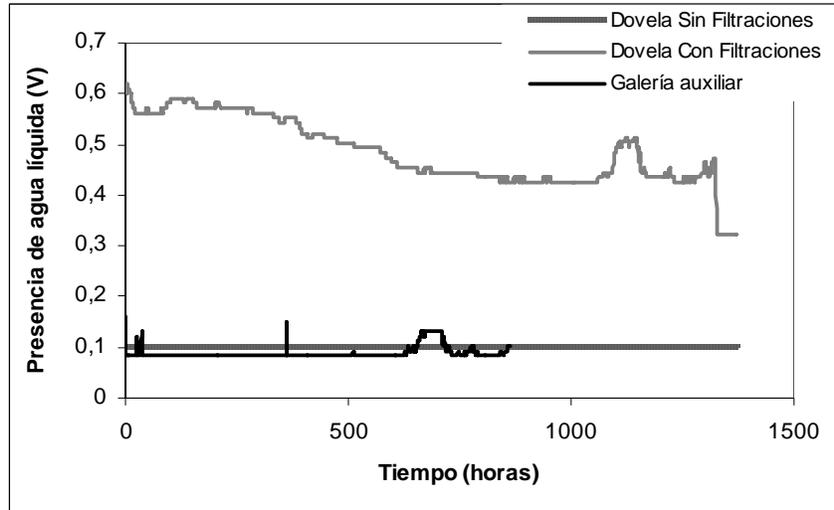


Figura 4. Medidas de presencia de agua líquida registradas por los tres grupos de sensores instalados.

Temperatura interior

En la Figura 5 se muestra la evolución de la temperatura con el tiempo para los tres sensores instalados. A pesar de las diferentes condiciones ambientales a las que se encuentran sometidas las dovelas seleccionadas, éstas presentan una evolución de la temperatura similar, que sitúa en torno a 14°C los primeros 400 días, disminuyendo hasta 12,3°C. En el caso del sensor situado en la parte inferior de la galería auxiliar, la temperatura aumenta con el tiempo, hasta situarse en 16°C para las últimas medidas obtenidas.

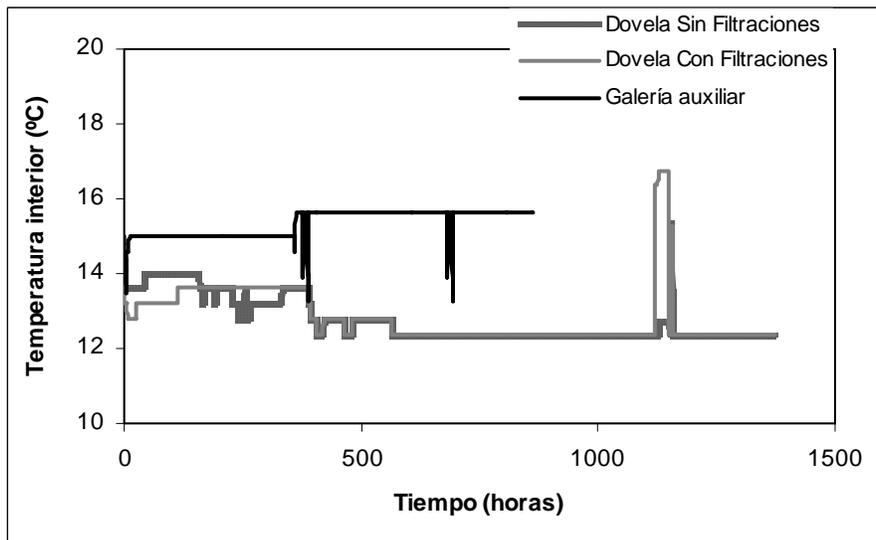


Figura 5. Evolución de la temperatura con el tiempo



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Se puede observar como el salto de temperatura, coincide con el obtenido en las medidas de potencial, y presencia de agua líquida en la dovela que no esta expuesta a filtraciones.

De manera adicional y con el objeto de comprobar el correcto funcionamiento de los sensores, se realizaron medidas de velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad con el aparato de medida Gecor 08. La medida de la temperatura se realizó mediante un aparato de medida de temperatura y humedad relativa de la marca VAISALA provisto de un dispositivo que se introduce en el interior de la cavidad de cada una de las estructuras.

Tanto para las medidas de corrosión, como para las medidas de temperatura interna de la estructura, se realizó una pequeña cavidad en cada una de las estructuras seleccionadas, que permanece sellada con el fin de repetir la comparación de las medidas de forma sistemática.

Durante los dos meses de monitorización se realizaron tres medidas de este tipo, las cuales se muestran en la Tabla 2, verificando que los sensores están funcionando y transmitiendo correctamente, y que aunque la información obtenida no puede cuantificarse, muestra los cambios de agua en el interior de los poros del hormigón, las variaciones internas de temperatura y las modificaciones del estado pasivo al activo de los aceros embebidos.

Tabla 2. Datos experimentales obtenidos mediante el Gecor09 y el medidor de temperatura VAISALA.

Días	Dovela con filtraciones				Dovela sin filtraciones				Muro en galería auxiliar			
	Icorr (uA/cm ²)	Ecorr (mV)	ρ (kΩ.cm)	Tint (°C)	Icorr (uA/cm ²)	Ecorr (mV)	ρ (kΩ.cm)	Tint (°C)	Icorr (uA/cm ²)	Ecorr (mV)	ρ (kΩ.cm)	Tint (°C)
0	0,213	-350	87,75	14,5	0,013	43,2	1235,3	14,8	0,114	-313	1008,13	15,1
750	0,132	-375	89,32	12,8	0,025	37,9	1332,8	12,3	0,098	-304	1015,93	15,9
1200	0,115	-361	105,14	13,1	0,019	53,2	1513,5	14,9	-	-	-	-

6. Discusión

La variación del potencial de corrosión puede correlacionarse con la presencia de agua líquida y temperatura interior del hormigón. Así, en la Figura 6 se muestra la monitorización obtenida en la dovela con filtraciones, observando que mientras que la diferencia de potencial del sensor correspondiente a agua líquida disminuye, es decir, el hormigón se está secando, el potencial de corrosión permanece constante en -300 mV (vs. Mn/MnO). Sin embargo cuando aumenta la respuesta del sensor de agua líquida de manera brusca, al cabo de unas 6 horas, lo hace el potencial de corrosión, poniendo de manifiesto la relación entre la resistividad del hormigón y el aumento de corrosión.

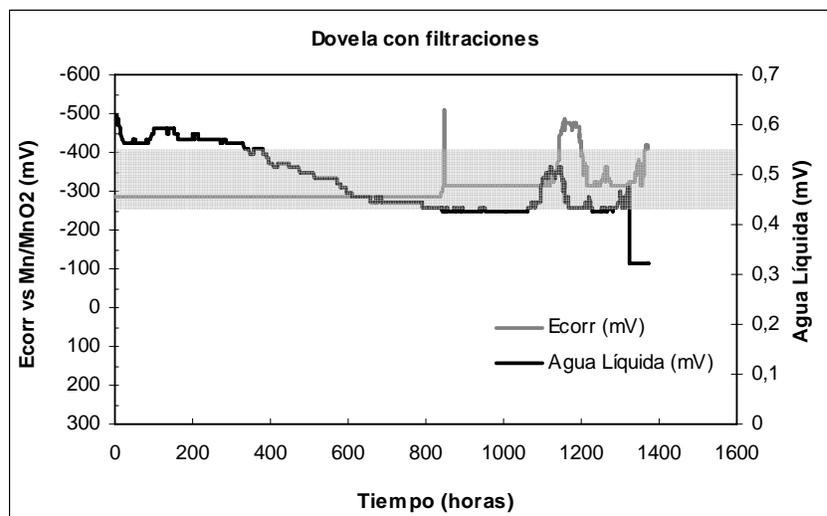


Figura 6. Monitorización del potencial de corrosión y agua líquida para la dovela con filtraciones

En el caso de grupo de sensores instalados en el muro de carga de una de las galerías auxiliares, la relación es más sutil, con variaciones en el potencial de agua líquida entre las 650 y 750 horas, que producen pequeñas variaciones en el potencial como se observa en la Figura 7.

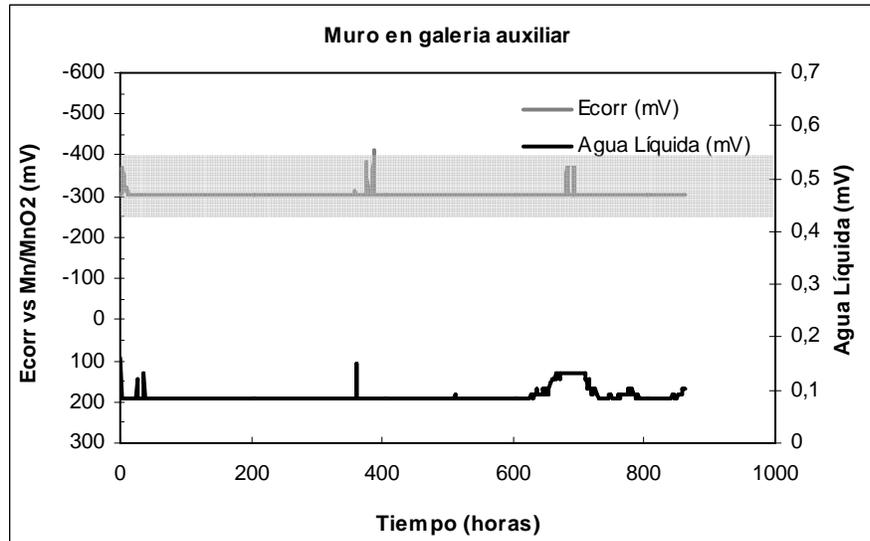


Figura 7. Monitorización del potencial de corrosión y agua líquida para la dovela con filtraciones



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



La Figura 8 muestra la monitorización del agua líquida y la temperatura interior para las zonas estructurales con filtraciones observándose que no existe relación alguna entre ellas, ya que los cambios en la temperatura interna de la estructura no son nunca mayores de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Si la temperatura exterior fuera más alta, debería apreciarse una mayor variación como consecuencia de la evaporación de agua en el interior de los poros. También se ha realizado una comparación de la temperatura exterior con la monitorización de temperatura en el interior de cada una de las estructuras (Figura 9), observando que aunque en el exterior la temperatura oscila entre 15 y 25 $^{\circ}\text{C}$, no afecta al interior de la estructura.

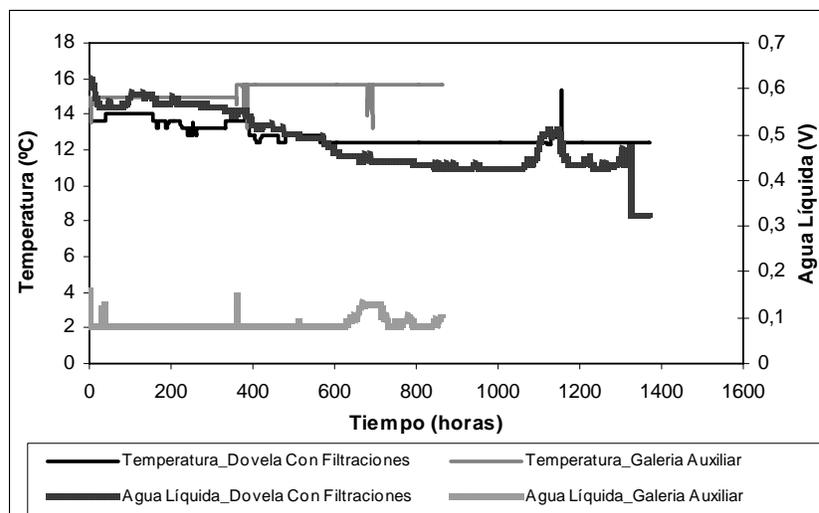


Figura 8. Monitorización de la temperatura interior y el agua líquida para las estructuras expuestas a filtraciones

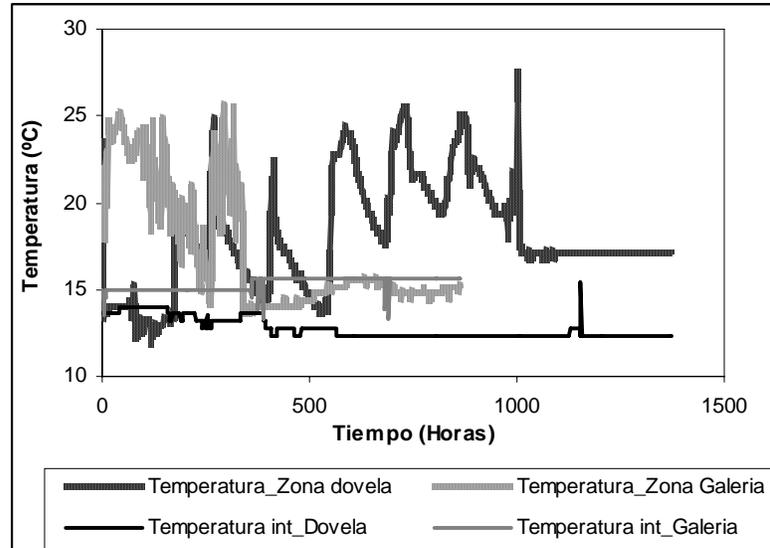


Figura 9. Monitorización de la temperatura externa e interna de las estructuras con filtraciones.

7. Conclusiones

Con los resultados obtenidos, puede verificarse no solo que los sensores transmiten de forma correcta al equipo de adquisición de datos, sino que los valores obtenidos muestran información referente a los cambios de agua en el interior de los poros del hormigón, las variaciones internas de temperatura y las modificaciones del estado pasivo al activo de los aceros embebidos. Información que permite evaluar de manera general el deterioro de la estructura en términos de durabilidad de manera sencilla, ya que en todos los casos los sensores son de tipo pasivo y por tanto no necesitan un aporte de corriente para su funcionamiento.

El potencial de corrosión es mayor en las zonas donde existe presencia visual de filtraciones y por tanto mayor agua en el interior de los poros, observándose variaciones a potenciales más negativos a medida que aumenta el contenido de agua líquida.

La temperatura interior no sufre variaciones importantes en ninguno de los casos, aunque las variaciones en la temperatura exterior son llegan a ser de 10°C.

8. Bibliografía

- [1] J. P. Broomfield, K. Davies, K. Hladkl, "The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures", *Cement and Concrete Composites*, 24, 1 (2002), 27-34.
- [2] 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



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



- waste containers of El Cabril disposal (Spain), *Journal of Nuclear Materials*, 358, 2-3 (2006), 82-95.
- [3] S. Muralidharan, V. Saraswathy, K. Thangavel, N. Palaniswamy, “Electrochemical studies on the performance characteristics of alkaline solid embeddable sensor for concrete environments”, *Sensors and Actuators B: Chemical* 130, 2(2008), 864-870.
- [4] M. Pourbaix, *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*, NACE, Cebelcor, 1976.
- [5] W. McCarter, Ø. Vennesland, “Sensor systems for use in reinforced concrete structures”, *Construction and Building Materials*, 18, 6 (2004), 351-358.
- [6] I. Martínez, A. Castillo, C. Andrade, “Non-destructive electrochemical techniques applied to the corrosion evaluation of the liner structures in nuclear power plants”, *Journal of Nuclear Materials*, 373 (2008), 226-236.
- [7] C. Andrade, P. Garcés, I. Martínez, “Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide”, *Corrosion Science*, In Press, Corrected Proof (July 2008).
- [8] ASTM C-876-91, ASTM, vol. 04.02, 1995.
- [9] C. Andrade, C. Alonso, J.A. Gonzalez, in: N.S. Berke, V. Chaker, D. Whiting (Eds.), *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP, vol. 1065, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, p. 29.
- [10] C. Andrade, J. Sarría, C. Alonso, “Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering”, *Cement and Concrete Research*, 29, 8 (1999), 1249-1259.
- [11] C. Alonso, C. Andrade, J. A. González., “Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types”, *Cement and Concrete Research*, 18, 5 (1988), 687-698.