



Received: 24-05-2018
Accepted: 28-07-2018

Anales de Edificación
Vol. 4, Nº 2, 61-68 (2018)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2018.3780

Más allá de la rehabilitación en una obra emblemática: monitorización de las cubiertas del hipódromo de la Zarzuela. Beyond the rehabilitation in an emblematic work: monitoring the decks of the Zarzuela racecourse.

Isabel Martínez, Ángel Castillo

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (isabel.martinez@csic.es; acastillo@ietcc.csic.es)

Resumen— El hipódromo de la Zarzuela, declarado patrimonio histórico nacional, fue construido en Madrid en los años 40, y es una obra del Ingeniero Eduardo Torroja y los arquitectos Arniches y Domínguez. Las cubiertas de su estructura son consideradas un arte desde el punto de vista ingenieril. A pesar del perfecto y genial equilibrio físico y mecánico, se iniciaron procesos físicos y físico-químicos de deterioro en su composición debido al largo periodo de exposición de la estructura a la acción climática y al ataque de los agentes agresivos atmosféricos, entre los cuales se destaca como principal patología la corrosión por carbonatación de su armadura embebida. Dada la importancia de la obra desde el punto de vista artístico, histórico y de seguridad, las autoridades correspondientes decidieron su rehabilitación. En este proyecto de reparación se contempló la instalación de un sistema de monitorización de medidas continuas, mediante sensores electroquímicos pasivos, capaces de indicar el riesgo de corrosión en la armadura embebida de la estructura. De este modo, es posible controlar el comportamiento del material frente a la interacción con la acción atmosférica y prever la posible necesidad de intervenciones de mantenimiento, evitando el avance del deterioro con rapidez y garantías. La implementación de la monitorización requirió de una evaluación mediante técnicas electroquímicas no-destructivas del grado de deterioro previo a la intervención, para poder estudiar la evolución del comportamiento de la estructura después de la reparación. En el presente trabajo, se presentan los resultados obtenidos tanto en la evaluación electroquímica previa en las cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela, como su posterior monitorización durante casi 10 años. Se presenta también la viabilidad del sistema de monitorización y su fiabilidad con el tiempo.

Palabras clave— Hormigón, reparación, corrosión, monitorización, técnicas electroquímicas.

Abstract- La Zarzuela racecourse, declared a national historical heritage, was built in Madrid in the 1940s, and is a work by Engineer Eduardo Torroja and the architects Arniches and Domínguez. The covers of its structure are considered an art from the engineering point of view. Despite the perfect and ingenious physical and mechanical balance, physical and physical-chemical processes of deterioration in its composition were initiated due to the long period of exposure of the structure to climatic action and the attack of aggressive atmospheric agents, among which the main pathology is the corrosion by carbonation of its embedded armor. Given the importance of the work from the artistic, historical and security point of view, the corresponding authorities decided on its rehabilitation. In this repair project, the installation of a continuous measurement monitoring system was contemplated, using passive electrochemical sensors, capable of indicating the risk of corrosion in the structure's embedded reinforcement. In this way, it is possible to control the behavior of the material against the interaction with atmospheric action and to foresee the possible need for maintenance interventions, avoiding the advance of deterioration with speed and guarantees. The implementation of the monitoring required an evaluation by non-destructive electrochemical techniques of the degree of deterioration prior to the intervention, in order to study the evolution of the behavior of the structure after the repair. In the present work, the results obtained in the previous electrochemical evaluation on the decks of the Hipódromo de la Zarzuela are presented, as well as their subsequent monitoring for almost 10 years. The viability of the monitoring system and its reliability over time are also presented.

Index Terms— Concrete, repair, corrosion, monitoring, electrochemical techniques.

I. INTRODUCCIÓN

El hipódromo de la Zarzuela (Madrid), declarado patrimonio histórico nacional, se construyó en el año 1935, y es una obra del Ingeniero Eduardo Torroja y los arquitectos Arniches y Domínguez. Las tres cubiertas de su estructura son consideradas un arte desde el punto de vista ingenieril debido a su perfecto y genial equilibrio físico y mecánico. Se plantearon en su concepción finas láminas de hormigón armado con forma de un hiperboloide con espesor variable entre 65 cm en la zona de pilares y 6 cm en los bordes. Su sección ligeramente curva en forma de V, apoyado en voladizo de hasta 13 m de altura sobre un único pilar (figura 1), es posible gracias al inteligente diseño de armado entrelazados y a la instalación de tirantes pasivos de acero situados en su parte trasera. Descripciones detalladas del proyecto y construcción pueden encontrarse en (Torroja, 1941; Torroja, 1958; Hipódromo de la Zarzuela, 1962).

El hipódromo tiene tres tribunas sobre las cuales están dispuestas las cubiertas que se denominan de la siguiente forma: Tribuna Norte (C.N.); Tribuna Central (C.C.) y Tribuna Sur (C.S.)

Desde el punto de vista de la durabilidad, el comportamiento

se puede considerar como muy bueno dado que los deterioros encontrados han sido muy locales y se deben a la pérdida de la impermeabilización superior de la cubierta que permitió al agua de la lluvia permear a través de la sección de la cubierta. La consideración del grado de buen comportamiento durable se emite al compararla con otras estructuras de hormigón armado, menos arriesgadas en su diseño y aparentemente más robustas, que han tenido que ser sometidas a procesos de reparación minuciosos o incluso demolidas, pese a ser más recientes. El hormigón utilizado, típico de la época y por ello bastante poroso al tener bajo contenido en cemento, estaba parcialmente carbonatado y por ello era necesario plantearse una reparación integral.

La explotación de la estructura como hipódromo ha sufrido diversos avatares, por lo que estuvo cerrado al final del siglo XX durante alrededor de una década. Más recientemente se decidió por fin su reapertura y dada la importancia de la obra desde el punto de vista artístico, histórico y de seguridad, las autoridades correspondientes decidieron realizar una obra de restauración de las cubiertas y otras zonas. Aprovechando las inspecciones efectuadas con los proyectistas de la restauración para el dictamen del grado de corrosión de las cubiertas, se les planteó la instalación de un sistema de monitorización mediante



Fig. 1. Fotografía panorámica y esquema de construcción.



Fig. 2. Estado de las cubiertas en la parte superior e inferior.

sensores (Andrade et al., 2006; Martínez et al., 2008), capaces de indicar cualitativamente el riesgo de corrosión en la armadura embebida de la estructura. De este modo, es posible controlar el comportamiento del material frente a la interacción con la acción atmosférica y prever la posible necesidad de intervenciones de mantenimiento futuras, evitando el avance del deterioro con rapidez y garantías.

En el presente trabajo se describe someramente la evaluación del grado de corrosión efectuada mediante técnicas electroquímicas no-destructivas (Feliú et al., 1990; Andrade et al., 1990; ASTM C-876-91, 1995), que consisten en medidas cuantitativas puntuales de velocidad de corrosión del acero para poder evaluar el elemento en su conjunto y estudiar su evolución después de la reparación. Igualmente se describen los sensores instalados y algunos de los datos registrados.

II. ESTUDIO DEL GRADO DE DETERIORO

Las cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela son estructuras que, durante toda su vida en servicio, no se ha encontrado documentación que indique que hayan tenido actuaciones importantes de mantenimiento. En su parte inferior presentaban zonas reparadas por parcheo y diversas capas de pintura aplicadas, desaparecidas en ciertas zonas bien visibles en fotos de principios del siglo XXI. Estos parcheos que presentaban en algunos casos desprendimientos y pérdidas de material, procedían probablemente de reparaciones puntuales anteriores (figura 2).

En la parte superior de las cubiertas se había colocado un sistema de impermeabilización formado por una imprimación asfáltica sobre la que se dispuso una lámina de aluminio gofrado. Esta impermeabilización se encontraba muy deteriorada, como lo muestra la figura 2. Esta lámina de aluminio (figura 2) se presupone que fue instalada en los años sesenta, posteriormente a la construcción de las cubiertas. El paso del tiempo y la posible falta de mantenimiento han provocado que zonas de esta impermeabilización estuvieran

deterioradas y que la imprimación estuviera meteorizada por el efecto de la radiación solar (figura 2). Además, la mayoría de los sumideros de las cubiertas estaban obstruidos, provocando la acumulación de agua estancada, que con el deterioro de la impermeabilización inducía a la penetración del agua a través del hormigón. Todo ello originó que se iniciaran procesos de deterioro, entre los cuales se destaca, como principal patología, la corrosión de su armadura embebida dada la carbonatación del recubrimiento de hormigón.

La carbonatación del hormigón ha sido estudiada y cuantificada in-situ mediante la determinación del frente de carbonatación a través de ensayos colorimétricos. Dichos ensayos consisten en aplicar el indicador fenoftaleína en disolución alcohólica (UNE 112-0111-94, 1994) sobre catas abiertas y sobre fractura fresca de muestras en zonas de estudio de las diferentes cubiertas.

Las profundidades del frente de carbonatación de las diferentes muestras extraídas de la superficie inferior de las cubiertas reflejan como este había llegado a la armadura. Conviene resaltar además que los recubrimientos de las armaduras eran en general escasos. Por ello, en zonas con penetraciones superiores a 60 mm, el frente llegaba a alcanzar la segunda capa de armado generando la corrosión generalizada de las armaduras, y llegando a generar pérdidas de sección importantes locales en algunas armaduras.

Por el contrario, en la superficie superior de las cubiertas no se aprecia frente de carbonatación ya que, aunque la imprimación de impermeabilización estaba deteriorada, en estas zonas hubo encharcamientos de agua durante mucho tiempo, y por ello gran parte de la superficie del hormigón ha permanecido casi saturada, lo que ralentiza el avance del agresivo por esa superficie. El problema surge cuando el frente alcanza las armaduras por la parte de la superficie inferior de la cubierta, y se acelera la corrosión existente debido al alto grado de contenido de agua en el interior del hormigón.

Otra observación realizada que no provocó corrosión pero que resultó relevante, es la fisuración generalizada, que era visible y cuya causa es probablemente la retracción. En el



Fig. 3. Tirantes.

proyecto de rehabilitación se decidió su reparación mediante sellado con el fin de asegurar el comportamiento solidario de todo el material.

También es necesario nombrar los tirantes que soportan las cubiertas desde su parte posterior, en los que se tomaron muestras de la Cubierta Norte. Estos tirantes estaban compuestos por tres cordones de acero lisos recubiertos por mortero y todo ello a su vez estaba recubierto por una envoltura de fibrocemento que realizaba la función de impermeabilización (figura 3).

Se tomaron muestras de la zona de mortero para comprobar el posible frente de carbonatación, que resultó inexistente, posiblemente por la protección que ha supuesto el recubrimiento de fibrocemento. La ausencia de carbonatación justifica el casi perfecto estado en el que se encontraron los cordones de acero.

III. EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN

Después de limpiar la pintura de la superficie inferior de las cubiertas y la capa de impermeabilización de la superficie superior con agua a presión, se realizó una evaluación del grado de corrosión existente mediante inspección visual y aplicando métodos electroquímicos no destructivos basados en la técnica de la Resistencia a la Polarización para verificar la velocidad de corrosión (figura 4).

La velocidad de corrosión (evaluada por el método de

confinamiento modulado (Feliú et al., 1990) de la corriente con el corrosímetro portátil Gecor 08) se cuantificó en diferentes áreas de las tres cubiertas. Como se puede ver en la figura 4, la mayoría de los valores de I_{corr} registrados se encuentran en el rango entre 0,5 y 1 $\mu A/cm^2$, lo que supone velocidades de corrosión moderadas en las tres cubiertas (Andrade et al., 2004). Otros indicadores de corrosión, como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la resistividad eléctrica también fueron evaluados. La mayoría de los valores medidos de potencial de corrosión estuvieron en el rango entre -250 y -350 mV, lo que significa un riesgo de corrosión intermedio (ASTM C-876-91, 1995).

De los gráficos se puede deducir que al menos un 50% de los puntos medidos presentan corrosión activa en el momento de la inspección. Los puntos de medida se han elegido al dividir las diferentes cubiertas en distintos lotes diferenciando la superficie exterior e interior de las cubiertas (y a su vez las zonas de los valles y senos de cada una de ellas), y los tirantes. Aunque se eligieron puntos que mostraban un cierto deterioro la corrosión detectada indica que la corrosión esta activa y es necesario acometer alguna actuación para que el proceso no continúe.

La corrosión detectada era generalizada (figura 5), con pérdida de sección de hasta un 10%, siendo el grado de corrosión o corrosión acumulada variable. Esta corrosión era mucho mayor en las zonas que habían perdido la impermeabilización superior donde la perdida de sección se consideró elevada (hasta el 40%) si bien estos casos fueron muy

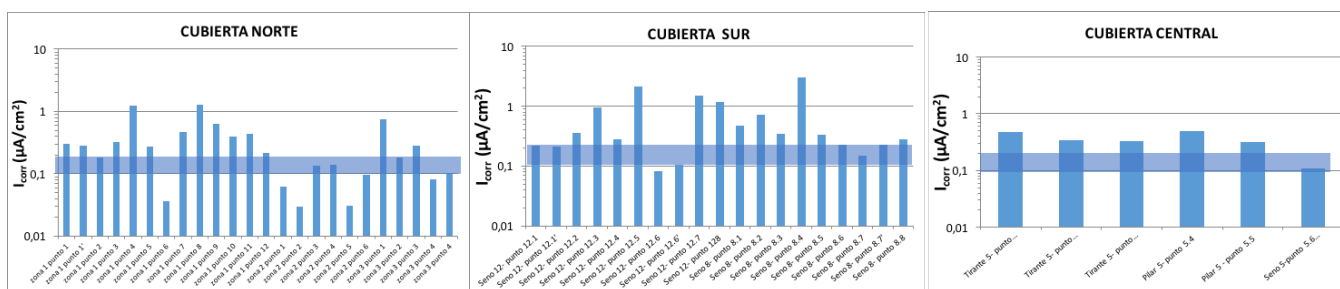


Fig. 4. Medidas de velocidad de corrosión.



Fig. 5. Corrosión generalizada.



Fig. 6. Reparación cubiertas.

pocos y no afectaron al comportamiento global de las cubiertas. A pesar de la corrosión detectada no se apreciaban fisuras longitudinales con la armadura, el saltado del recubrimiento muy local indicaba que el proceso es también solo puntual.

IV. INTERVENCIÓN

Las actuaciones diseñadas por el proyectista para la rehabilitación que fue ejecutada por la empresa DRAGADOS fueron las siguientes (figura 6):

1. Eliminación de toda la pintura inferior y la impermeabilización superior mediante chorro de agua.
2. Saneado de las zonas de desprendimiento de material y huecas, limpiando las armaduras vistas, cepillándolas y pasivándolas; para después reparar la zona con un mortero específico.
3. Tratamiento de fisuras mediante su saneo abriéndolas, introduciendo cánulas por las cuales se inyecta resina después de sellarlas con masilla y tapándolas finalmente con mortero de reparación. Este tratamiento se realizó tanto en la superficie superior como en la inferior de las cubiertas.
4. Acabado en la parte inferior con mortero imitando la terminación original con las tablillas de encofrado de madera y posterior pintura anti-carbonatación.
5. Impermeabilización de la parte superior con lámina de poliuretano de 3-4 mm de espesor, sobre mortero de puente de unión de baja retracción.

6. Rehabilitación de los tirantes de las cubiertas. Se retiró el recubrimiento exterior de fibrocemento y el mortero que rodeaba los tirantes metálicos y se saneó hasta llegar a limpiar completamente los mismos. Después se pintaron con una imprimación impermeable y posteriormente se inyectó una lechada de terminación, estableciendo dos capas para garantizar la impermeabilización.

Las labores de reparación se realizaron de manera satisfactoria y no es objeto de este trabajo su descripción en más detalle.

V. MONITORIZACION DE LA ESTRUCTURA

Como se ha mencionado, se aprovechó la rehabilitación para colocar sensores que informen sobre la posible aparición de deterioros sin necesidad de extracción de muestras.

Después de la evaluación del estado de corrosión de la estructura se instalaron sensores de corrosión permanentes capaces de indicar el riesgo en las cubiertas y en los tirantes. Se instalaron siete grupos de sensores en las tres cubiertas.

Cada grupo está compuesto por tres tipos de sensores (figura 7):

- Sensor de detección de presencia de agua líquida (Doble barra).
- Sensor de medida del potencial de corrosión (E_{corr}) de la armadura embebida, con electrodo de referencia tipo Mn/MnO_2 .



Fig. 7. Grupo de sensores.

- Sensor de medida de la temperatura (Termopar tipo TMC6-HD).

Los tres tipos de sensores instalados son sensores pasivos, lo que significa que no es necesario aplicar ningún estímulo o aporte energético para obtener las correspondientes respuestas.

El sensor de agua líquida es cualitativo, ya que informa sobre la presencia/ausencia de agua en estado líquido (condensación), pues desarrolla una diferencia de potencial entre los dos terminales del sensor. Cuando no hay agua en estado líquido, la diferencia de potencial medida entre los dos terminales del sensor es próxima a 0 mV, pero cuando existe agua, aumentan los valores de diferencias de potencial hasta unos 700 mV.

Por otro lado, el sensor de medida de potencial de corrosión lo constituye un electrodo de referencia de Mn/MnO₂, que se conecta a la armadura para evaluar su potencial electroquímico. Este parámetro nos indica la probabilidad de que la armadura sufra corrosión.

En cuanto a la temperatura, los termopares utilizados son TMC6-HD, de rango -40 a 50 °C) y con resolución de 0,25°C a 20 °C.

El procedimiento de instalación de cada uno de los grupos se lleva a cabo en 3 fases: preparación previa de la zona de instalación, la fijación del grupo de sensores y posterior instalación de la caja-estanca de polietileno para el emplazamiento del datalogger:

- Preparación previa de la zona de instalación: Para la colocación del grupo de sensores es necesario realizar una pequeña cata en la superficie del hormigón que permita embeber la placa de fijación y distribución de los sensores. La capa de impermeabilización debe quedar lo más lisa y continua posible. Aparte de la cata en la que se aloja el grupo de sensores, es necesario realizar una roza para poder embeber y llevar el cable para la conexión con la armadura. La conexión con la armadura se asegura con una fijación de soldadura fría para garantizar la continuidad eléctrica.
- Fijación del grupo de sensores: Una vez realizada la cata donde alojar el grupo de sensores, se prepara un mortero de baja resistividad. Primero se aplica una fina capa de base donde se introducen los diferentes sensores y después se

termina rellenando con este mortero toda la cata hasta dejar totalmente embebido el dispositivo.

- Instalación de caja de polietileno e impermeabilización: Una vez instalados los diferentes grupos de sensores en cada una de las cubiertas, se protegieron las terminaciones eléctricas y se aplicó la capa de impermeabilización con lámina de poliuretano de 3-4 mm de espesor a toda la cubierta, poniendo especial cuidado en la aplicación en estos lugares. Después de la aplicación de la capa de impermeabilización se acopló encima de la zona de las terminaciones eléctricas una caja-estanca de polietileno donde queda instalado el datalogger (figura 7).

Se instalaron en las tres cubiertas un total de 7 grupos de sensores permanentes, de los cuales 6 se instalaron en la superficie superior de las cubiertas Norte, Sur y Central y uno en la parte inferior de la Cubierta Sur. En esta Cubierta Sur se pudieron colocar en la misma zona un grupo por la superficie superior y otro por la parte inferior. En la Figura 8 se representa la localización de los diferentes grupos en las tres cubiertas. En la Cubierta Sur se realizó una mejora en la monitorización, ya que se instaló en el 2012 un sistema de monitorización remota. Este desarrollo consistía en una comunicación de los sensores de la parte de cubierta exterior por radio al datalogger del sensor de la cubierta interior y desde ahí tener conexión vía GPRS ó 3G para poder tener conexión remota del estado de la cubierta en cualquier momento y desde cualquier dispositivo móvil. (figura 8).

En la figura 9 se presentan los valores de potencial de corrosión, presencia de agua líquida y temperatura de uno de los grupos de sensores instalados. Se visualiza la influencia clara de la temperatura en los parámetros electroquímicos. Además, se observa cómo la evolución del potencial de corrosión (E_{corr}) es hacia valores de potencial más positivos en un principio, cambiando la tendencia hacia valores de mayor riesgo de corrosión en los últimos años, lo que indica que, la tendencia a pasivarse de las armaduras tras la reparación inicial en algunos casos varía tras varios años de exposición. En todos los sensores de agua líquida los valores de diferencia de

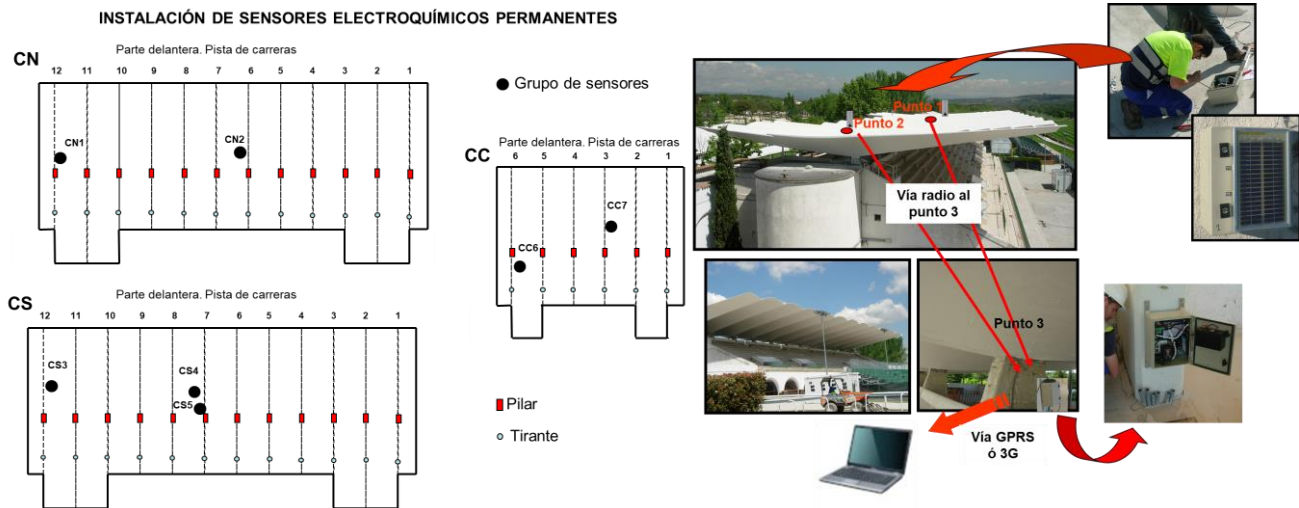


Fig. 8. Monitorización.

potencial registrados se sitúan en torno a 20 mV, lo que indica la presencia de agua líquida en el interior del hormigón.

VI. CONCLUSIONES

Las cubiertas del Hipódromo, que siguen asombrando por su ligereza y esbeltez, han resistido el paso del tiempo y la acción de los agentes atmosféricos de una forma sobresaliente, al presentar solo deterioros por corrosión de las armaduras muy locales por fallos en el sistema de impermeabilización que se debió aplicar en los años 60. Del trabajo actual desarrollado para su rehabilitación integral se pueden expresar de manera resumida y esquemática las siguientes conclusiones más relevantes relativas a los trabajos para el estudio de su

durabilidad y control permanente de los parámetros de corrosión:

- Antes de la intervención la estructura presentaba un grado de carbonatación alto en la parte inferior de todas las cubiertas. Aun no habiendo grandes pérdidas de sección de manera general, toda la armadura inferior presentaba corrosión generalizada, cuantificada mediante técnicas electroquímicas no destructivas.
- La corrosión es mayor en la superficie superior de la cubierta por el acceso del agua de lluvia en las zonas donde la lámina asfáltica estaba deteriorada. Esta impermeabilización ha resultado esencial, ya que sólo se induce la corrosión activa por la acción directa del agua de la lluvia en zonas carbonatadas en las que se alcanza un cierto grado de humectación (por el mencionado deterioro de la lámina de impermeabilización). Las

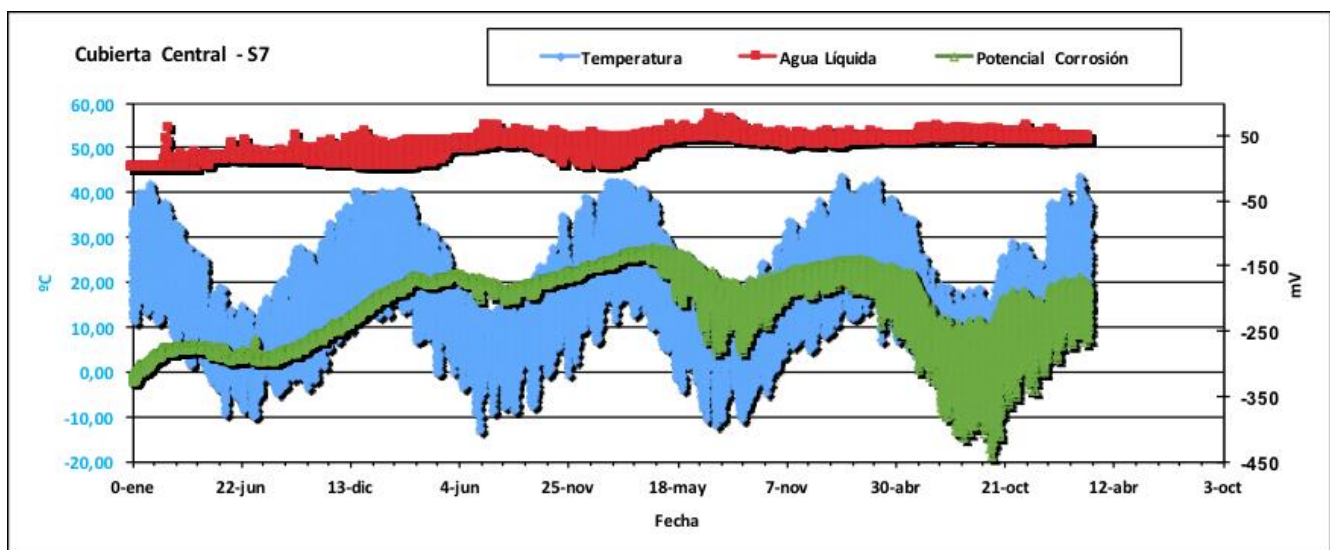


Fig. 9. Medidas de los sensores instalados.

zonas inferiores de las cubiertas, aunque carbonatadas, no han llegado a un grado de corrosión significativo.

- En cuanto a las tres barras asimétricas que componen cada uno de los tirantes, esenciales en el comportamiento estructural, pese al peculiar mecanismo de impermeabilización que se encontró compuesto por una camisa tubular de fibrocemento, su estado tras 75 años de exposición al ambiente era muy aceptable, presentando escasa carbonatación en su recubrimiento de mortero.

- Después de la intervención los resultados después de un año procedentes de los sensores permanentes embebidos muestran que la impermeabilización de las cubiertas se ha ejecutado de forma satisfactoria, ya que los potenciales de la armadura presentan valores de ausencia de riesgo de corrosión al igual que los sensores de agua indican la ausencia de condensación.

- Es importante resaltar la importancia de cuantificar las velocidades de corrosión para la predicción de la evolución futura del deterioro, así como la ayuda que suponen los sensores instalados de forma permanente para el control no destructivo de la eficacia de la reparación, llegando a disponer de la tecnología de evaluación remota e instantánea desde cualquier dispositivo móvil.

REFERENCIAS

Andrade, C., Alonso, C., González, J.A. (1990) 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, p. 29.

Andrade, C., Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland, O. and Salta, M. (2004). Test methods for on-site reinforcement corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the Polarization Resistance method. RILEM Recommendation of TC-154 "Electrochemical Techniques for measuring metallic corrosion". *Materials and Structures* vol 37, pp 623.643.

Andrade, C., Martínez, I., Castellote, M., Zuloaga, P. (2006). 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* 358, 82–95.

ASTM C-876-91 (1995). ASTM, vol 04.02.

Feliú, S., González, J.A., Feliú, S.Jr., and Andrade, C. (1990). "Confinement of the electrical signal or in-situ measurement of Polarization Resistance in Reinforced concrete," *ACI Mater. J.*, 87, pp 457.

Hipódromo de la Zarzuela. (1962). *Informes de la Construcción*, 154-6.

Martínez, I., Castillo, A., Andrade, C. (2008). "Non destructive electrochemical techniques applied to the corrosion evaluation of the liner structures in nuclear power plants". *Journal of Nuclear Materials*. ELSEVIER. Volumen 373, 226-236.

Torroja, E. (1941). "Estructura de la Tribuna del nuevo Hipódromo de Madrid" *Revista de Obras Públicas*.

Torroja, E. (1958). "Madrid Racehouse" *Architectural Record*, VI.

UNE 112-0111-94 (1994). "Corrosión de armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio".



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.