Monitorización de las Cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela: 12 años después*

Monitoring the Covers of "Zarzuela Racecourse": 12 years later

Isabel Martínez*, [a], Ángel Castillo[b], Francisco J. Rubiano[c]

[a] Doctora en Ciencias Químicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Vicedirectora. isabelms@ietcc.csic.es

[b] Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Director. acastillo@ietcc.csic.es

[c] Arquitecto Técnico. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Titulado medio de actividades técnicas y profesionales. franrs12@ietcc.csic.es

RESUMEN

El Hipódromo de la Zarzuela fue construido en Madrid en los años 40. Es una obra del Ingeniero Eduardo Torroja y los arquitectos Arniches y Domínguez. En el proyecto de reparación se instaló un sistema de monitorización de medidas continuas, mediante sensores electroquímicos pasivos, capaces de indicar el riesgo de corrosión en la armadura. Se presentan los resultados obtenidos tanto en la evaluación electroquímica previa en las cubiertas, como su posterior monitorización durante 12 años. También la viabilidad del sistema de monitorización y su fiabilidad con el tiempo. El comportamiento de la estructura ha sido muy satisfactorio en comparación a otras estructuras de la misma época o más recientes.

ABSTRACT

The Zarzuela Racecourse was built in Madrid in the 1940's. It is a construction designed by the Engineer Eduardo Torroja and the architects Arniches and Domínguez. In the rehabilitation project, a continuous measurement monitoring system through electrochemical passive sensors was installed. They are able to show the risk of corrosion of the steel frame. The results obtained, both in the previous electrochemical evaluation of the covers and in the subsequent monitoring for 12 years, are presented. Furthermore, the feasibility of the monitoring system and its reliability in time. The behaviour of the structure has been very successful in comparison with other structures from the same time or more recent ones.

PALABRAS CLAVE: hormigón, durabilidad, monitorización, sensores, corrosión.
KEYWORDS: concrete, durability, monitoring, sensors, corrosion.

1. 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 entrelazado y a la instalación de tirantes pasivos de acero situados en su parte trasera.

Descripciones detalladas del proyecto y construcción pueden encontrarse en [1], [2] y [3].

Figura 1. Estado actual de las cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela.

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 sensores [4] y [5], 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 [6], [7] y [8], 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 durante 12 años.

2. Estado de las cubiertas previo a la reparación (2008)

Las cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela, 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.

En la parte superior de las cubiertas se apreciaba 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. Esta lámina de aluminio 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. 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 fue estudiada y cuantificada in-situ mediante la determinación del frente de carbonatación a través de ensayos colorimétricos. Dichos ensayos consisten en aplicar el indicador fenolftaleína en disolución alcohólica [9] 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 cómo 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 proyecto de rehabilitación se decidió su reparación mediante sellado con el fin de asegurar el comportamiento solidario de todo el material.

También es necesario mencionar el estado de los tirantes (Figura 2) que soportan las cubiertas desde su parte posterior. 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. 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.

Figura 2. Estado de los tirantes de la cubierta antes de la reparación.

3. 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.

La velocidad de corrosión (evaluada por el método de confinamiento modulado [6] 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 3, 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 [10]. 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 [8].

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 está activa y es necesario acometer alguna actuación para que el proceso no continúe.

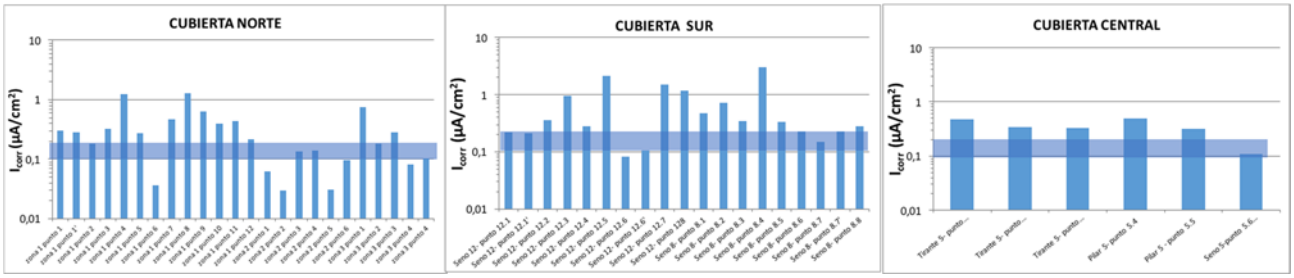

Figura 3. Medidas de velocidad de corrosión tomadas antes de la reparación de las cubiertas.

La corrosión detectada era generalizada (Figura 4), 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 pérdida de sección se consideró elevada (hasta el 40%) si bien estos casos fueron muy 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.

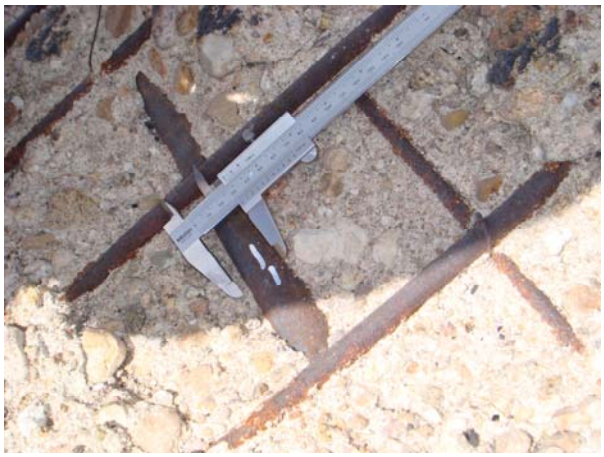

Figura 4. Corrosión generalizada de la armadura de las cubiertas.

4. Intervención

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

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.

Figura 5. Corrosión generalizada de la armadura de las cubiertas.

5. Monitorización 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.

Cada grupo está compuesto por tres tipos de sensores (Figura 6):

- Sensor de detección de presencia de agua líquida (Doble barrita).
- Sensor de medida del potencial de corrosión (Ecorr) de la armadura embebida, con electrodo de referencia tipo Mn/MnO_2.
- Sensor de medida de la temperatura (Termopar tipo TMC6-HD).

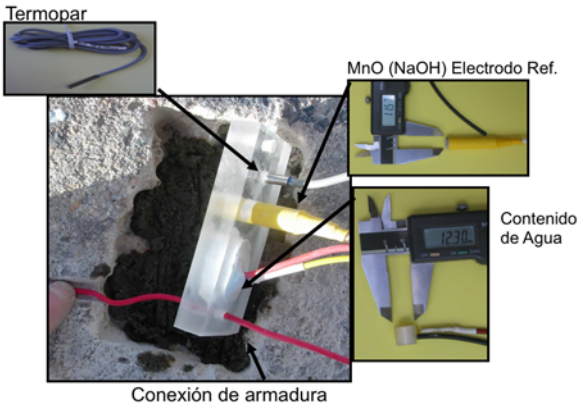

Figura 6. Grupo de sensores instalado en las cubiertas.

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/MnO_2, 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 ºC) y con resolución de 0,25ºC a 20 ºC.

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 6 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 4G para poder tener conexión remota del estado de la cubierta en cualquier momento y desde cualquier dispositivo móvil.

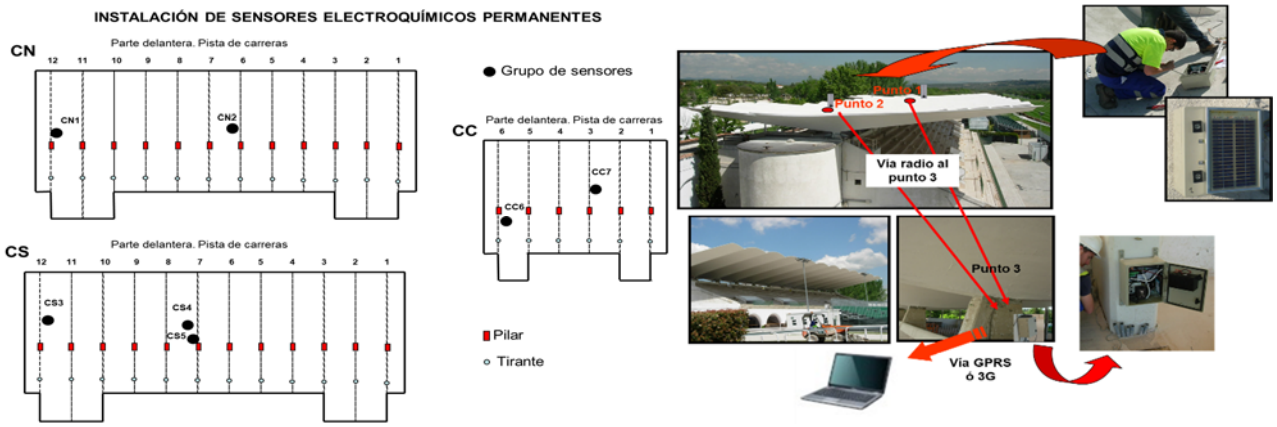

Figura 7. Ubicación de los grupos de sensores instalados en las cubiertas.

En la Figura 8 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 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. Los sensores de agua indican también un aumento de la humedad en el interior de los poros del hormigón con el tiempo.

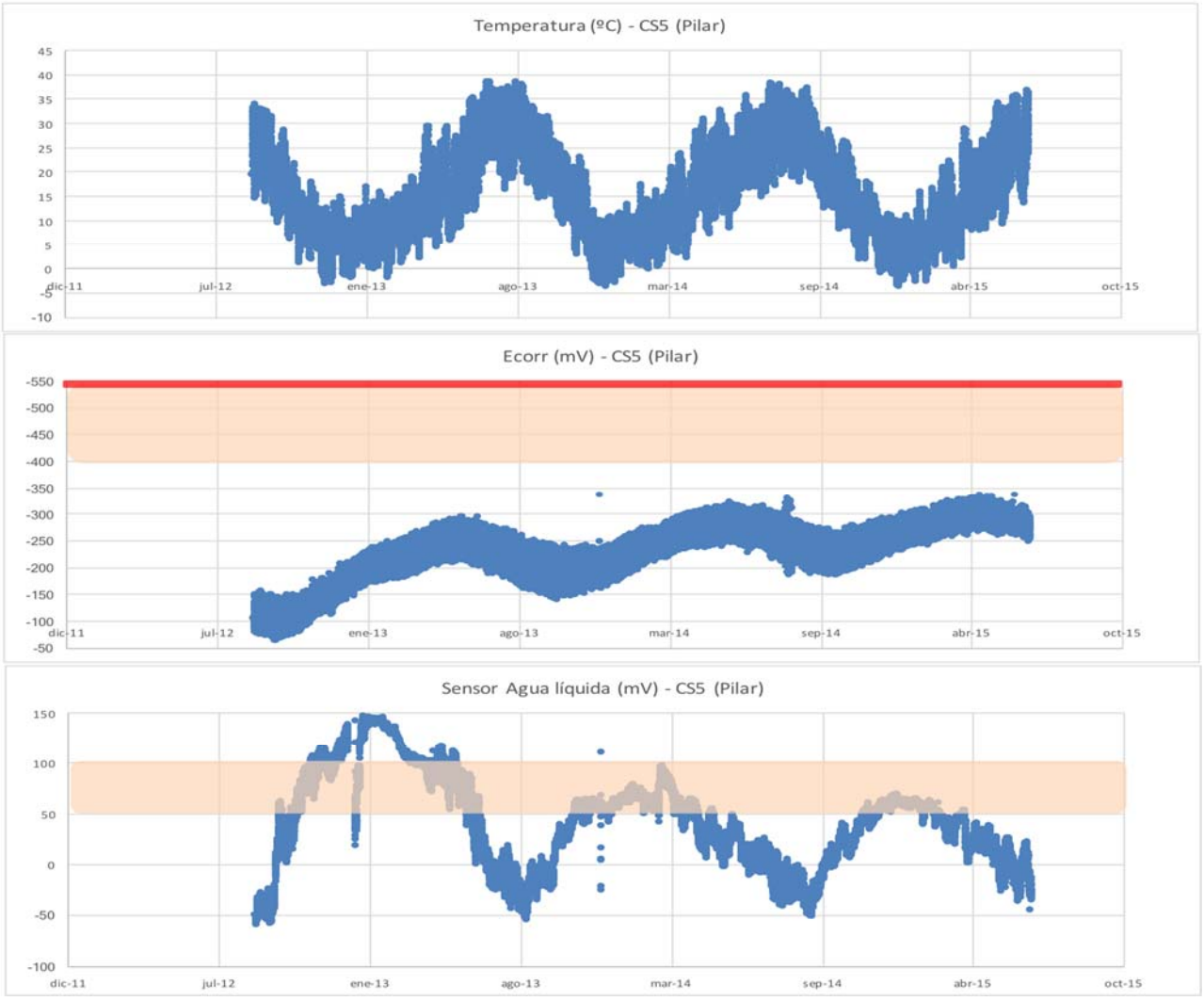

Figura 8. Ejemplo de algunos de los registros de los sensores durante los últimos años.

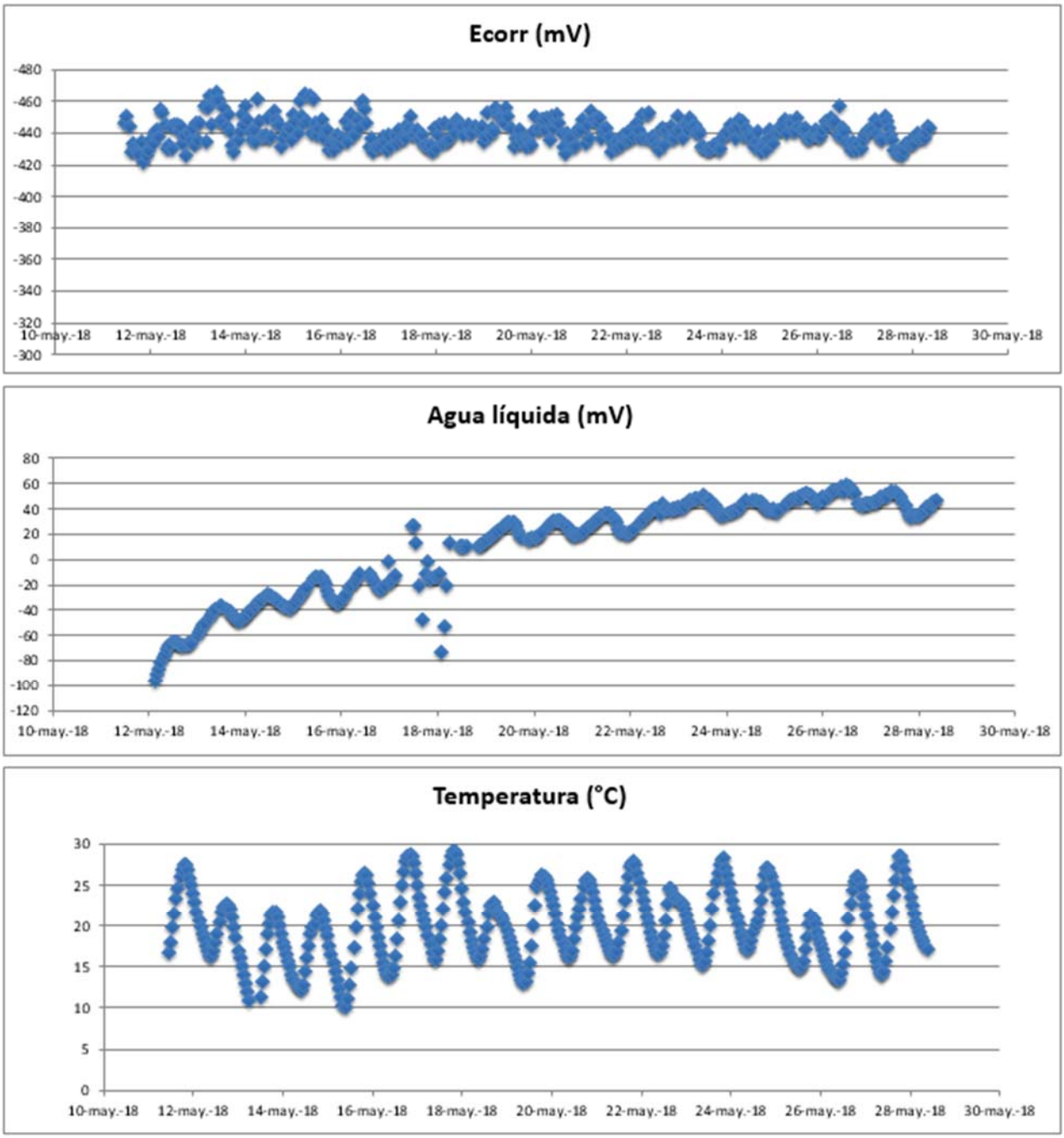

Figura 9. Algunos de los registros tomados durante dos semanas.

6. 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 tras 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:

• La estructura presentaba un **grado de carbonatación alto** y como resultado de la

misma, corrosión generalizada, que fue cuantificada mediante técnicas electroquímicas no destructivas.

• Después de la intervención, los sensores permanentes embebidos muestran que **la reparación de las cubiertas se ejecutó de forma satisfactoria**. Los potenciales de la armadura indicaban en los primeros años ausencia de riesgo de corrosión al igual que los sensores de agua indican la ausencia de condensación.

• **Durante los últimos años, los valores de potencial de corrosión muestran una tendencia hacia valores de mayor riesgo de corrosión**. Los valores máximos en valor absoluto de este parámetro indicarían las mayores probabilidades de corrosión, que son alcanzados en **épocas invernales**, mientras que los riesgos descienden a valores de bajo riesgo durante la época estival.

• Dicha tendencia es concordante con los resultados obtenidos de los sensores de presencia de agua líquida, que muestran sus valores máximos (presencia de agua) en los momentos en los que el riesgo de corrosión es elevado. Ambos parámetros tienen un alto grado de dependencia con la temperatura.

• 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 y el gran avance en la herramienta de control remoto de la monitorización de manera inalámbrica.

• El comportamiento de la estructura ha sido muy satisfactorio en comparación a otras estructuras de la misma época o más recientes.

Referencias

[1] Torroja, E. "Estructura de la Tribuna del nuevo Hipódromo de Madrid" Revista de Obras Públicas, junio 1941.

[2] Torroja, E. "Madrid Racehouse" Architectural Record, VI, 1958.

[3] Hipódromo de la Zarzuela. Informes de la Construcción, 154-6, 1962.

[4] C. Andrade, I. Martínez, M. Castellote a, 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 358 (2006) 82–95.

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

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

[7] 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.

[8] ASTM C-876-91, ASTM, vol 04.02, 1995.

[9] UNE 112-0111-94 "Corrosión de armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio".

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