

monitorización de la humedad y la corrosión de armaduras en los muros con jardín vertical de calle 30

Monitoring of humidity and corrosion of reinforcements in the walls of the vertical garden of Calle 30

Luis Benito Olmeda^a, Jose Manuel Cendon Alberte^b, Jose Antonio Morena Villanueva^c, Juan Jesus Muñoz Nicolas^d, Carmen Andrade Perdrix^e

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Madrid Calle 30. Departamento de Estructuras. benitool@mc30.es

^b Dr. Ingeniero de Caminos C.P. Ayuntamiento Madrid. Subdirector Gral. Infraestructuras de Movilidad. condonaj@madrid.es

^c Ingeniero de Caminos C. P. Madrid Calle 30. Departamento de Estructuras. morenavia@mc30.es

^d Ingeniero Industrial. SAFECOR INGENIERIA. Director Técnico. jmunoz@safecoringenieria.com

^e Dr. Química Industrial. CIMNE. Investigador Distinguido. candrade@cimne.upc.edu

RESUMEN

Por compromiso con el cuidado el medio ambiente se ha colocado el jardín vertical más extenso de nuestro país en unos muros laterales de la zona Norte de la Calle 30. Estos jardines por su riego suponen la existencia de una humedad elevada constante, lo que podría incidir en una posible corrosión de la armadura de los muros, ya que la carbonatación ha sobrepasado su nivel. Para el control de la corrosión, se aplicó un inhibidor de corrosión en superficie y se midió la velocidad con el corrosímetro Gecor10 para comprobar la repasivación de la armadura. Después se instalaron sensores permanentes de velocidad de corrosión y humedad relativa y temperatura. Los resultados que se presentan permiten confirmar que la eficacia del inhibidor

ABSTRACT

Due to the preservation of the environment, the largest vertical garden in our country has been placed on the side walls of the northern area of Calle 30. Due to their irrigation, these gardens suppose a constant high humidity, which could lead to possible corrosion of the reinforcement, since carbonation has exceeded its level. To control that corrosion, a corrosion inhibitor was applied to the concrete surface and the corrosion current was measured with the corrosimeter Gecor10 to check the repassivation of the reinforcement. Permanent corrosion current, relative humidity and temperature sensors were then installed. The results presented confirm the effectiveness of the inhibitor.

PALABRAS CLAVE: corrosion, carbonatación, velocidad-corrosion, inhibidor.

KEYWORDS: corrosion, carbonation corrosion-current, inhibitor.

1. Introducción

Debido al compromiso con el mantenimiento de la calidad del aire en la ciudad de Madrid, la empresa municipal Calle 30 aborda diferentes actividades con el fin de contribuir al mantenimiento de bajas tasas de contaminación.

Para ello en la zona Norte de la vía se diseñaron unos jardines verticales que son los más extensos construidos en nuestro país. Se trata de una iniciativa que forma parte de la Estrategia de Sostenibilidad Ambiental Madrid 360 y ha

consistido en cubrir los muros de hormigón de la M-30 con grandes jardines verticales lineales (figuras 1 y 2). La iniciativa supone una nueva dimensión para las zonas verdes, tal y como se concebían hasta ahora.



Figura 1.Un aspecto de los jardines verticales en la Zona Norte de Calle 30.

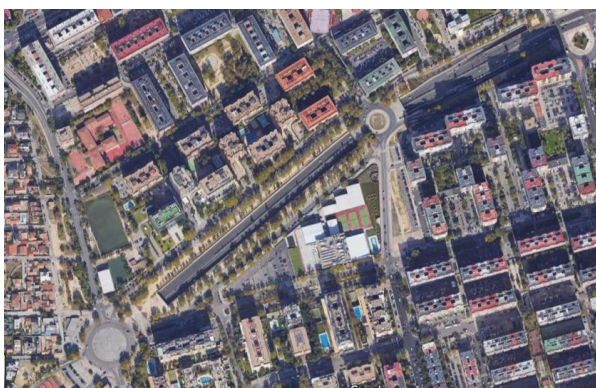


Figura 2. Vista aérea del tramo.

Estos jardines verticales ocupan unos 3.250 metros cuadrados en los muros de la ronda de circunvalación madrileña a su paso por la Avenida de la Ilustración. Con su instalación, el Área de Gobierno de Urbanismo, Medio Ambiente y Movilidad del Ayuntamiento confía en sacar el máximo partido de la capacidad vista en estas coberturas vegetales para lograr tres objetivos: mitigar el calor, paliar la contaminación y aislar del ruido. Tres premisas deseables en el conjunto de la ciudad y más en la zona elegida para la puesta en marcha de este

proyecto, una isla de calor caracterizada por una vía asfaltada que soporta un gran tráfico de vehículos y está rodeada de áreas residenciales.

El riego permanente en estos jardines supone la existencia de una elevada humedad muy cerca de los muros de hormigón recubiertos y supone un reto para su durabilidad ya que la carbonatación la ha alcanzado en algunas zonas. La corrosión de la armadura es el principal proceso que puede disminuir la vida útil del hormigón estructural (1) ya que supone la disminución del diámetro de la armadura y puede producir la fisuración del recubrimiento, afectando la integridad estructural.

Por ello, en el marco del “Proyecto de ejecución de jardines verticales para la naturalización de M-30” en el tramo de referencia, el departamento de Estructuras de Calle 30 se decidió poner en marcha tres actuaciones:

- 1º Aplicar inhibidores de corrosión a los citados muros.
- 2º Aplicar pintura anticarbonatación.
- 3º Poner en marcha un sistema de monitorización de la corrosión instalando sensores de corrosión para poder conocer con precisión tanto la humedad que se retiene en el hormigón como el grado de corrosión de la armadura. En el presente trabajo se describe el tipo de sensores y algunos resultados ya registrados antes y después de aplicar los inhibidores y la pintura anticarbonatación.

2. Parte experimental

Primero se realizó la selección de los puntos donde se iban a hacer calas para observar la profundidad de carbonatación y luego medir la velocidad de corrosión. Se identificaron 6 puntos principales: tres en el muro norte y otros tres en el muro sur. El muro norte está más soleado que el sur por la orientación del sol.

En la figura 3 se muestra la posición de los puntos de observación y medida.

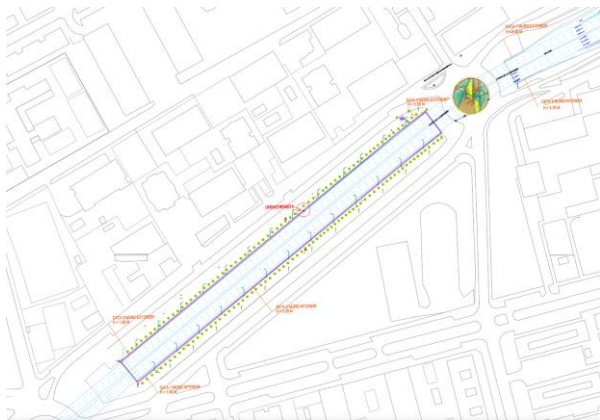


Figura 3. Esquema de localización de las calas realizadas y de la posición de los sensores.

La carbonatación se midió aplicando fenolftaleína a las calas abiertas como se muestra en la figura 4. También se extrajeron algunos testigos como muestra la figura 5

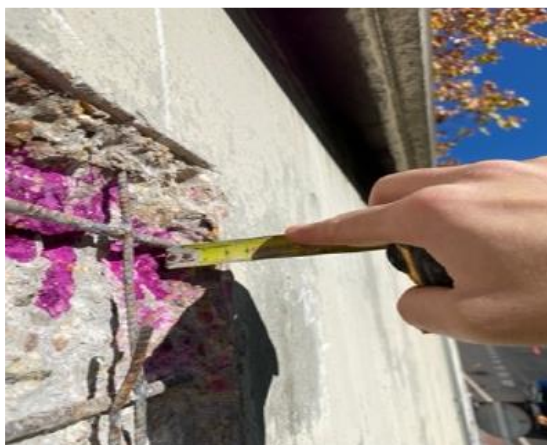


Figura 4. Aplicación de la fenolftaleína in situ en las zonas donde se abrieron las calas.



Figura 5. Aplicación de la fenolftaleína en los testigos para identificar la profundidad de carbonatación.

A continuación, se abordó una campaña de medida de los parámetros de corrosión: velocidad, resistividad y potencial de corrosión. Para valorar los resultados se utilizaron los límites propuestos por la Recomendación de RILEM (2, 3 y 4), que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Ranking de valores de la velocidad de corrosión según la RILEM (4)

$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	Grado de corrosión
<0,1	Despreciable
0,1-0,5	Bajo
0,5-1	Moderado
1-10	Elevado
>10	Muy elevado

Las medidas de velocidad de corrosión se efectuaron con el corrosímetro GECOR 10 (5,6) que se muestra en la figura 6. Este corrosímetro se basa en confinar la corriente de modo efectivo dentro de un área que se sitúa debajo de la sonda que se coloca en la superficie del hormigón. El método se basa en la determinación de la llamada Resistencia de Polarización (7) que mide simultáneamente el potencial de corrosión y la resistividad.



Figura 6. Medida de la velocidad de corrosión con el corrosímetro GECOR 10. En la parte superior se aprecia la sonda de medida circular que tiene un anillo de guarda para confinar al corriente.

Como se aprecia en la figura 7, los valores de la velocidad de corrosión con el GECOR 10 se realizaron al menos por triplicado alrededor de las calas con el fin de tomar un valor medio.



Figura 7. Se muestra una cala en al que se aprecia las diversas zonas en donde se situó la sonda de confinamiento ya que es necesario mojar la superficie

Se realizaron dos campañas de medidas: antes y después de aplicar el inhibidor de corrosión superficial. El inhibidor fue el MASTERPROTECT. Es un inhibidor multifunción ya que tiene también un hidrófugo que colabora para reducir el contenido de humedad en los poros del hormigón.



Figura 8. A la izquierda dispositivo con los sensores de HR y Tª y a la derecha el que contiene los sensores de corrosión.

Aplicado el inhibidor en toda la superficie, y comprobada su capacidad de parar la corrosión previa, se procedió a instalar los sensores

permanentes y también electrodos de referencia de Mn/MnO₂. Los sensores eran de Humedad Relativa (RH) y Temperatura (Tª), instalando unos en el exterior a la atmosfera y otros dentro de las calas efectuadas para ver la humedad dentro del propio hormigón. El sensor de humedad externa se puede apreciar en la figura 8. A su lado se colocó el dispositivo que tiene los sensores de corrosión con un microprocesador y un transmisor de los resultados que son enviados a un servidor.

El método de medida de la velocidad de corrosión de los sensores en este caso no se basa en el “confinamiento modulado de la corriente” sino en el método de “atenuación del potencial” descrito en el Recomendación de la RILEM (5), ya que consume mucha menos energía que el confinamiento lo que reduce la necesidad de cambio de las baterías. En cualquier caso estas sensores son calibrados cuando colocados in situ comparando sus valores con los corrosímetro portátil GECOR10.

Los registros de valores se han efectuado desde 2022 hasta la actualidad, aunque aquí se muestran los resultados hasta finales de 2023. Colocados los sensores e procedió a terminar toda la instalación del jardín vertical, quedando los dispositivos todos entre el muro y la estructura metálica del jardín

2.1.1. Calibración de los sensores de corrosión

Los sensores permanentes deben siempre calibrarse previamente durante los primeros registros de datos (8), comparando los valores que obtenidos en los sensores con los que se obtienen con el corrosímetro portátil. Solo con esta calibración previa se puede estar seguro de que no midan erróneamente, dado que la aplicación de una señal eléctrica a la armadura se dispersa con la distancia, lo que dificulta decidir cuál es el área de armadura afectada por la señal. Todos los señores deben especificar el método de medida que usan ya que no deben ser “cajas negras” sino que lo métodos deben estar

amparados por las normas o las Recomendaciones como la de la RILEM (4).

3. Resultados

3.1 Problemas de transmisión de datos de los sensores de corrosión

La técnica de medida llamada Resistencia de Polarización utiliza muy bajas corrientes (alrededor de 10 mV) por lo que la estabilidad de los electrodos embebidos es muy importante, así como la no existencia de otros campos eléctricos.

A la estructura metálica que actúa a modo de caja de Faraday se han atribuido los problemas que se encontraron de que algunos sensores no transmitían ya que cabe indicar que, en los procesos de descarga de datos por bluetooth, se encontró dificultad para realizar la descarga desde puntos que no requiriesen acceso a los carriles de la vía como consecuencia del apantallamiento que supone la estructura metálica que soporta las plantas. Esto se solventó desplazando ligeramente los registradores de la cala 2 del muro exterior y el muro 3 del muro interior.

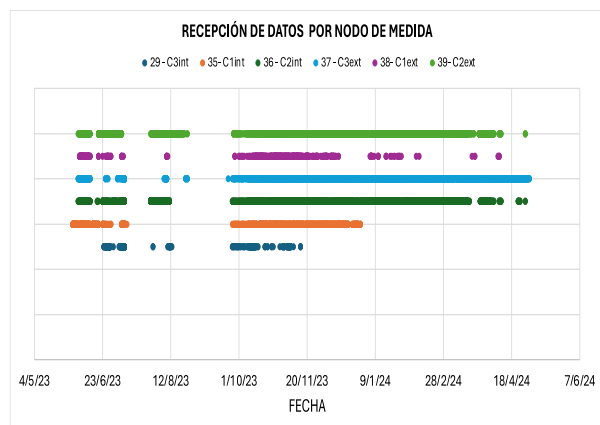


Figura 9. Secuencia de transmisión de los 6 sensores visualizado las interrupciones o problemas de interferencias.

También se encontraron interferencias con otros sistemas de monitorización presentes en la

infraestructura, así como con inhibidores de señal existentes en el entorno.

En el caso de los sensores HOBO, en cambio no han presentado incidencias desde su puesta en funcionamiento en noviembre de 2022 con una salvedad, y es que el sensor HOBO instalado en la cala 3 del muro exterior se vio dañado durante la obra de instalación de los jardines verticales, por lo que se procedió a su reparación, pero ante la posibilidad de que pudiese fallar se añadió un nuevo sensor en ese mismo punto

La secuencia de fallos se ha representado en la figura 9 por cada sensor. Dado que los sensores son redundantes no se ha considerado necesario sustituir los que tienen problemas de transmitir y mas bien usarlos para hacer pruebas del origen de las interferencias.

3.2 Resultados de velocidad de corrosión antes y después de aplicar el inhibidor.

Antes de aplicar el inhibidor las velocidades eran en algunos lugares bastante elevadas como se muestra en la figura 10 ya que las profundidades de carbonatación resultaron ser de entre 17mm y 22mm, lo que suponía en la aradura que estaba muy superficial quedaba en algunos sitios en la zona carbonatada.

La figura 10 muestra valores en azul y gris por encima de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ que es la frontera entre corrosión despreciable y corrosión moderada (Tabla 1 (4)). Las barras en verde muestran los valores después de aplicar el inhibidor siempre por debajo de ese límite de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

3.3 Resultados de humedad relativa, temperatura y velocidad de corrosión

Una vez establecidos los valores de referencia de la velocidad de corrosión con el GECOR 10, ellos valores de los sensores se han estado comparando con ellos para asegurar que los rangos son similares o bien detectar zonas y

periodos en los que las barras se corroen activamente.

Los datos de 4 sensores se presentan en la figura 11. En la figura se han situado los valores de velocidad de corrosión (I_{corr}) y de humedad relativa interna del muro al lado y dispuestos como están en el tramo. Puede comprobarse como la evolución de la HR es paralela a la de la I_{corr} , aunque los valores absolutos difieren.

Es decir, para la misma HR no se obtiene la misma I_{corr} . Lo que es similar es la tendencia, es

decir en una localización si aumenta la humedad aumenta la I_{corr} , pero dado el distinto nivel de carbonatación, los valores absolutos de la velocidad se presentan como diferentes

En general todos los valores se detectan por debajo del límite que indica corrosión despreciable, excepto en algún periodo concreto don se hicieron operaciones de mojado durante la instalación legándose a $HR > 90\%$

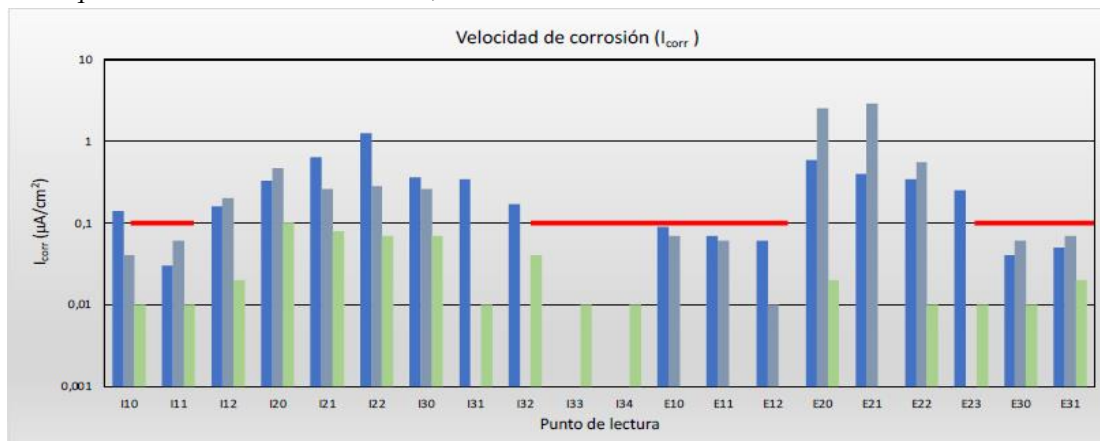


Figura 10. Valores de velocidad e corrosión antes de aplicar el inhibidor (en azul y en gris) y después de aplicarlo (barras verdes. Los valores bajan drásticamente.

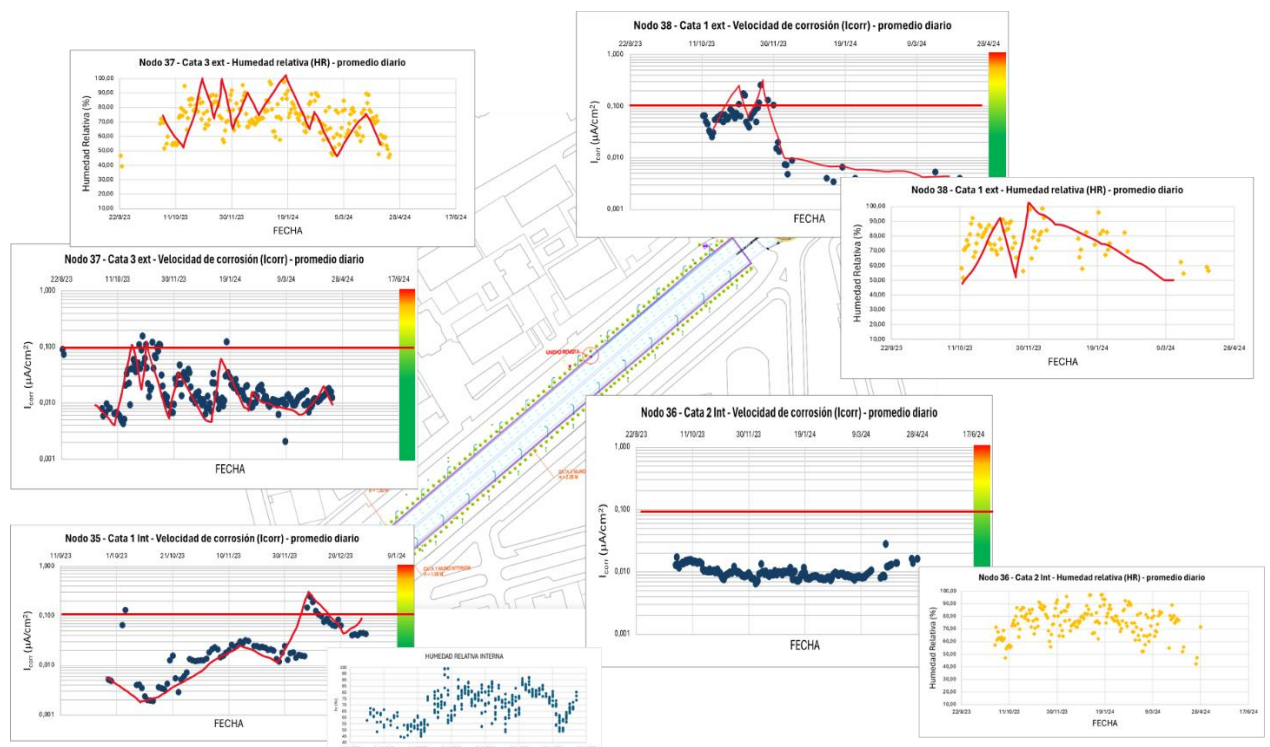


Figura 11. Secuencia de transmisión de los 6 sensores visualizado las interrupciones o problemas de interferencias La barra de color a la derecha de la figura refleja de forma cualitativa el criterio de grado de corrosión recogido en la recomendación del comité RILEM (4).

4. Discusión

Toda la operación ha permitido profundizar en las limitaciones del empleo de sensores de corrosión que debido a su bajo uso de corriente pueden presentar interferencias.

4.1 Sobre el sistema de sensores y la transmisión

Los sensores han sido calibrados y los datos que portan en la actualidad confirma la repasivación de la armadura por el uso del inhibidor de corrosión.

Las discontinuidades que se observan en la recepción de datos no tendrán un efecto significativo en la interpretación de resultados del sistema por dos motivos, en primer lugar porque a pesar de las interrupciones en la transmisión, el número de datos recibido es elevado y en segundo lugar porque las variables de corrosión que se están monitorizando presentan una evolución lenta en el tiempo y que depende de la humedad, lo que confirma el buen funcionamiento del sistema.

Los sensores con los que se registran la temperatura y humedad relativa dentro del hormigón no han presentado ninguna incidencia en su funcionamiento, aunque pueden aparecer los problemas en la descarga de datos.

También es necesario prestar mucha atención a las baterías que es uno de las debilidades de los sensores permanentes.

4.2 Sobre los datos registrados

4.2.1. Humedad y temperatura

Una primera deducción de los datos registrados es que existe una diferencia en las lecturas del muro interior y del muro exterior que se mitiga con la instalación de las plantas. Es decir, el muro más soleado (el Norte) tiene una humedad menor que el del Sur que este más tiempo en sombra. También es de destacar que las humedades que se midieron y la corrosión

antes de aplicar el inhibidor era superior en las zonas bajas del muro cercanas al pavimento.

La instalación de las plantas no se ha reflejado en los valores de humedad, pero sí en el registro de temperaturas, la cual se suaviza. Con la salvedad del sensor en la cala 3 del muro interior que presenta un cambio de comportamiento, pero en fechas anteriores a la instalación de las plantas. Resulta significativa la coincidencia La similitud de valores dentro y fuera del hormigón. Es muy probable que la presencia de las plantas, que protegen a las sondas que no se encuentran embebidas tanto de la incidencia solar como del viento, tenga una influencia importante en este hecho. En este aspecto cabe añadir que el registro de humedad relativa en el interior del muro presenta menos dispersión que el ambiental.

En particular cabe señalar que la humedad relativa medida en el interior del muro en la cala 2 del muro exterior desde finales de octubre de 2023 presenta un valor del 100%, lo que puede ser debido a la saturación de la sonda o al hecho de que el hormigón presenta un elevado grado de humedad, en esa zona.

En otras posiciones se observa que los sensores de humedad también llegan de forma temporal a valores del 100%.

4.2.21. Velocidad de corrosión

Los valores de velocidad de corrosión (I_{corr}) que se han podido observar en las calas 1 y 2 del muro inferior y en las calas 2 y 3 del muro exterior con inferiores a $0,1\mu A/cm^2$, y mayoritariamente se encuentran por debajo de $0,01\mu A/cm^2$ lo cual permite concluir que el nivel de corrosión que puede haber es despreciable o muy bajo, además, desde el punto de vista del análisis global de la estructura, debe tenerse en cuenta que en los puntos en los que se han colocado los electrodos, no se ha aplicado pintura anticarbonatación, lo cual si se ha hecho

en el resto de la superficie de los muros; lo cual implica que la protección existente en los puntos medidos es, presumiblemente, la menor.

Los registros de velocidad de corrosión en la cala 1 del muro interior y las calas 1 y 3 del muro exterior (nodos 35,27 y 38) presentan una correlación con la humedad relativa ambiental coherente. Esto no es preocupante desde el punto de vista de la corrosión en la estructura, ya que los valores de I_{corr} son suficientemente bajos si bien no totalmente nulos y por lo tanto, a medio plazo, se debe valorar si está justificada una nueva aplicación del inhibidor o si o dada la relativamente pequeña importancia estructural, simplemente se observa su evolución

En los puntos en los que no se ha podido medir la velocidad de corrosión (cala 23 del muro interior y cala 2 del muro exterior) y se ha analizado el potencial de corrosión se ha encontrado, en ambos casos, que los valores de potencial se encuentran en un rango propio de bajo riesgo de corrosión.

5. Conclusiones

Las conclusiones más importantes son:

- Que la pasividad de las armaduras obtenida con el inhibidor se mantiene a pesar de las elevadas humedades que se detectan en algunos momentos.
- Los sensores de corrosión funcionan razonablemente bien, indicando valores de pasividad y de forma paralela a la humedad dentro del hormigón
- Es muy importante acompañar los sensores de corrosión con los de humedad y temperatura con el fin de interpretar las variaciones típicas de la evolución del clima
- También es importante calibrar los sensores periódicamente con un corrosímetro portátil para asegurar la precisión de las medidas

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ayuntamiento de Madrid, a la empresa municipal Calle30 y a

EMESA, las facilidades y medios aportados para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] González J.A., Algaba S. and Andrade C. (1980) *Corrosion of reinforcing bars in carbonated concrete*-British Corrosion Journal, 3, 135-139.
- [2] Elsener B., Andrade C., Gulikers J., Polder R., Raupach M. (2003) RILEM TC 154-EMC: *Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion Half-Cell Potential Measurements – Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures* -Materials and Structures, Vol 36, 461-471.
- [3] Polder, R.; Andrade, C.; Elsener, B.; Vennesland, O.; Gulikers, J.; Weidert, R.; and Raupach, M.; *Test methods for onsite measurement of resistivity of concrete*”, RILEM TC 154-EMC: *Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion*, Materials and Structure, Vol 33 (2000), pp. 603-611.
- [4] Andrade C, Alonso C, Gulikers J, Polder R, Cigna R, Vennesland Ø, Salta M, Raharinaivo A, Elsener B. (2004). "RILEM TC 154-EMC: *Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Recommendations Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*. Materials & Structures **37**(273): 623-643.
- [5] Rodríguez J., Ortega L. M., García A. M., Johansson L., Petterson K. (1994) *On site corrosion rate measurements in concrete structures using a device developed under the EUREKA project EU-401*. Proc. Conference “Concrete Across borders” June, Odense, Denmark, Palladian Publications Ltd, 1995, 215–226.
- [6] Andrade C., Alonso C. (1996) *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*. Construction and Building Materials, **10**, no. 5 315-328
- [7] Andrade, C. and González, J.A. (1978) *measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements*-Werkstoffe und Korrosion. 29, 515.
- [8] Vennesland Ø., Climent M. A., Andrade C. (2013) *Methods for obtaining dust samples by means of grinding concrete in order to determine the chloride concentration profile*. Materials and Structures. vol 46pp337–344