

Sensores para la Determinación de la Durabilidad de Construcciones de Hormigón Armado

Sensors for Determining the Durability of Reinforced Concrete Constructions

M. Llorens ^{1*}, Á. Serrano^{**}, M. Valcuende*

* Universitat Politècnica de València. València, ESPAÑA

** Universidad Católica de Valencia San Vicente Mártir. Valencia, ESPAÑA

Fecha de Recepción: 20/02/2018
Fecha de Aceptación: 10/10/2018
PAG 81-98

Abstract

The durability of reinforced concrete structures is severely affected by corrosion. This phenomenon entails high economic costs due to the large infrastructure built with this material in developed countries, both roads and buildings. This review shows and discusses different techniques now available for monitoring and controlling reinforced concrete structures by means of sensors. These sensors are sophisticated devices that provide information about the factors inducing the processes of corrosion, and they are very useful for predicting the service life of structures and optimizing the repair strategies. This work analyses different sensor systems and compares their applications, taking into account such factors as location, calibration and evaluation data. Finally, some examples of sensor applications and diverse strategies for developing new sensor systems in the near future are presented.

Keywords: Sensors, reinforced concrete, corrosion, durability, structures

Resumen

La durabilidad de las construcciones de hormigón armado está gravemente afectada por los fenómenos de corrosión. Este problema supone un gran coste económico en los países desarrollados debido a la gran infraestructura construida en ellos, tanto vial como edificatoria. En esta revisión se exponen las distintas técnicas disponibles actualmente para monitorizar y controlar mediante sensores las estructuras de hormigón armado. Mediante estos tipos de control existentes es posible obtener información relevante sobre los factores que favorecen los procesos corrosivos, cuya información es de gran utilidad para poder predecir la vida útil de las estructuras y optimizar las estrategias de reparación. Se han comparado entre sí los distintos sistemas de sensores y sus aplicaciones, teniendo en cuenta los factores de ubicación, calibración y evaluación de datos. Finalmente, se presentan varios ejemplos de aplicaciones de sistemas y diversas estrategias a seguir en el desarrollo de nuevos sensores.

Palabras clave: Sensor, hormigón armado, corrosión, durabilidad, estructuras

1. Introducción

El estudio de la durabilidad de las estructuras de hormigón reforzado con acero estructural ha ganado relevancia desde los años 90 en la normativa europea (Richardson 2002). Las acciones que condicionan la durabilidad de las estructuras son las derivadas de los procesos químicos, físicos y biológicos de deterioro que actúan constantemente sobre ellas. Ejemplos de estos procesos son la acción de los oxidantes, los ácidos, las sales o las bacterias. Estos procesos de deterioro modifican su resistencia, rigidez y aspecto, y por tanto, condicionan su seguridad y funcionalidad (Garcés et al., 2008).

Estudios económicos mundiales recientes llevados a cabo por la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión Internacional sitúan el coste directo global de la corrosión entorno al 3-4% del Producto Interior Bruto mundial. De este coste, se estima un posible ahorro del 20-35% (375-875 mil millones de dólares) si se hiciera uso de la tecnología existente de control de corrosión (Koch et al., 2016).

La forma tradicional de conocer la magnitud del deterioro de un hormigón armado dañado se fundamenta en ensayos obtenidos mediante técnicas destructivas en los que se extraen muestras de estructuras en servicio que son posteriormente repuestas mediante morteros especiales de reparación (Sing et al., 2016). Sin embargo, es importante conocer el estado de las armaduras para poder minimizar los costes de intervención. Por este motivo, se han desarrollado nuevas tecnologías, como son los sensores, para monitorizar el estado de las armaduras con precisión y rapidez (Almeraya et al. 1998), (Song y Saraswathy, 2007).

De este modo, en el presente trabajo, se muestra una revisión del estado del arte de los sensores para la determinación de la durabilidad de este tipo de construcciones. Finalmente, se exponen unos ejemplos de aplicación relevantes de sensores y diversas estrategias a seguir en su desarrollo.

2. Medidas requeridas para el estudio de la durabilidad

Actualmente, las metodologías más ampliamente utilizadas para la determinación de los procesos de corrosión son las electroquímicas (Sing et al., 2016), (Ou y Li, 2010),

¹ Autor de Correspondencia:

Universitat Politècnica de Valencia. Valencia, ESPAÑA
E-mail: malloga1@arq.upv.es



(Zaki et al., 2015), (Schiegg y Dauberschmidt, 2008). Sin embargo, todavía se siguen utilizando las técnicas destructivas tradicionales para el control de la corrosión con el objetivo de contrastar resultados (González y Vidales,

2207). La información que se necesita conocer para el estudio y evaluación de la durabilidad se resume en la Tabla 1 (Broomfield et al., 2002), (Yoo et al., 2003).

Tabla 1. Tabla resumen de las medidas habitualmente empleadas para el estudio de la durabilidad de estructuras de hormigón armado (Broomfield et al., 2002), (Yoo et al., 2003)

ELEMENTO	MEDIDAS REQUERIDAS
Armadura	Potencial de corrosión
	Densidad de corriente
Hormigón (recubrimiento de las armaduras)	Conductividad/Resistividad
	Transporte de oxígeno
	Presencia de cloruros y variación de pH
	Temperatura y humedad

Respecto a las medidas que se realizan en las armaduras, el potencial de corrosión (E_{corr}) se mide determinando la diferencia de potencial entre un electrodo de referencia y el acero de las armaduras (Song y Saraswathy,

2007). Estos resultados proporcionan valores orientativos de calificación de riesgo de corrosión de acuerdo con la norma americana ASTM C-876-99 y la española UNE 112083:2010 Tabla 2.

Tabla 2. Riesgo de corrosión en tanto por cien estimado en función del potencial de corrosión utilizando un electrodo saturado de calomelanos (SCE) de referencia

E_{corr} (SCE)/mV	Riesgo de corrosión
> - 200	10 %
- 200 a - 300	50 %
< - 350	90 %

La velocidad de corrosión, medida en $\mu\text{m/año}$, proporciona información sobre el efecto de la corrosión por unidad de tiempo y se determina de forma indirecta mediante técnicas potenciométricas como son la resistencia a la polarización (R_p) (Duffó y Farina, 2009) o el método de extrapolación de Tafel (Arva y Duffó, 2009). La densidad de corriente galvánica (I_{corr}) registrada por el proceso de reducción en el cátodo también da información de la actividad corrosiva (González et al., 2004).

Por otro lado, respecto a las medidas requeridas para el estudio de la durabilidad que se llevan a cabo en el hormigón que recubre las armaduras, los factores que

controlan la velocidad de corrosión y que pueden ser monitorizados son la resistividad eléctrica del hormigón y el transporte de oxígeno (Yoo et al., 2003) (Duffó y Farina, 2009). La conductividad o resistividad del hormigón en la zona de actividad de corrosión proporciona también información del riesgo general de corrosión (Arva, 2002), (González 2004), (Langford y Broomfield, 1987) ver Tabla 3. Respecto al transporte de oxígeno, éste puede medirse en disolución mediante una combinación de dos electrodos metálicos y un electrodo de referencia (Correia et al., 2006) (Castañeda y Corvo, 2004).

Tabla 3. Riesgo de corrosión estimado en función la resistividad eléctrica del hormigón (Langford y Broomfield, 1987), (Alonso et al., 1988), (Sagoe-Crentsil y Glasser, 1989), (López y González, 1993), (Broomfield, 2006)

Resistividad (kΩ·cm)	Riesgo de corrosión
< 5	Muy alto
5 – 10	Alto
10 – 20	Moderado -Bajo
> 20	Bajo o inexistente

Otros parámetros que son medidos mediante sensores electroquímicos en el hormigón y que alertan de forma temprana de la posibilidad de corrosión en las armaduras son la presencia de cloruros o las variaciones de pH (Dong et al 2011), (Angst et al. 2009), (Artero et al. 2012). Por último, la humedad en el interior de los poros de hormigón, juntamente con la temperatura que actúa como catalizador, pueden ampliar la información sobre los procesos de corrosión (McCarter et al. 2001), Barroca et al. 2013).

3. Sensores para la medición de parámetros relacionados con la durabilidad

Desde el comienzo del siglo XX, se han desarrollado sensores para la determinación de la durabilidad. Hasta el momento, uno de los grandes obstáculos ha sido conseguir que el trabajo desarrollado en el laboratorio pueda ser implementado correctamente en el campo de aplicación real (Schiegg y Dauberschmidt 2008). Es por ello que se han establecido una serie de características fundamentales exigibles a un sensor Tabla 4 para poder realizar una correcta transferencia tecnológica del laboratorio a la industria.

Tabla 4. Características exigibles a un sensor

Características	Descripción
Construcción óptima	Optimización del diseño constructivo de los sistemas de sensores (Machado, 1994; Galán et al., 2000).
Resistencia adecuada	Robustez adecuada a su futura aplicación (Alegret, 1992).
Tamaño mínimo	Pequeñas dimensiones, portátiles y de fácil manipulación (worden et al., 2003).
Alta durabilidad	Se requieren sensores estables a largo plazo (Matthew & Dean, 2006).
Precio económico	Seleccionar la tecnología y materiales en su construcción más económicos (Hart & Wring, 1997; Albareda et al., 2000).
Alta precisión	Fiabilidad, reproducibilidad, sensibilidad y límites de detección adecuados a su uso (Garcés et al., 2008).



3.1 Técnicas y sensores físicos de medición

Las técnicas y sensores mostrados en el presente trabajo tienen la función de monitorizar y controlar el estado del hormigón armado frente a los problemas de deterioro que causa el fenómeno de la corrosión (Ahmad, 2003). De acuerdo con la literatura actual existente, la mayoría de sensores utilizados para dicho fin se rigen bajo principios electroquímicos. Sin embargo, también hay que destacar la utilidad de ciertos sistemas que emplean técnicas físicas de monitorización, puesto que miden parámetros indirectos que nos proporcionan información sobre la corrosión como son, por ejemplo, las mediciones de la masa y volumen de las armaduras de refuerzo (Cabrera, 1996). De todas las técnicas físicas utilizadas, las únicas que evalúan cuantitativamente la corrosión son la termografía, los flujos magnéticos y los sistemas ópticos.

Los sensores termográficos convierten la radiación infrarroja e invisible medida en registros visibles mediante distintas técnicas que pueden aplicarse para medir deformaciones y fisuras (Meola, 2013). Recientemente se ha desarrollado una técnica no destructiva de detección de la corrosión basada en una combinación de calentamiento por inducción y termografía infrarroja (Kobayashi y Banthia, 2011). Ésta técnica se basa en el principio de que los compuestos producto de la corrosión tienen una mala conductividad térmica e inhiben la difusión de calor que se genera en la barra de acero debido a un calentamiento por inducción.

Por otro lado, las técnicas basadas en flujos magnéticos hacen atravesar fuertes campos magnéticos por la estructura de hormigón armado (Maki et al., 2001). De este modo, se magnetiza el acero de las armaduras y se mide el campo magnético producido por los elementos metálicos. Este sistema permite detectar las imperfecciones y anomalías de las armaduras puesto que las discontinuidades son registradas como anomalías singulares por el sensor. Algunos de los sensores que utilizan métodos de campo magnético se han desarrollado mediante tecnología MEMS (Sistema Micro-Electro-Mecánico) para obtener así dispositivos de pequeñas dimensiones (Guangtao et al., 2010).

Otro tipo de sensores utilizados para monitorizar la corrosión son los fabricados con tecnología de fibra óptica. Este tipo de sensores pueden detectar la humedad, la expansión y las fisuras en hormigón armado, lo que permite observar la condición de una estructura y predecir su duración (Kung 2014). Su principio de funcionamiento se basa en registrar las variaciones de longitud de onda que experimenta la luz al ser reflejada (Górriz, 2009). Bajo estos principios tecnológicos, recientemente se ha desarrollado un sistema que utiliza una red de sensores introducidos en una malla de fibra de carbono embebida en la estructura de hormigón armado Figura 1. Este sistema genera mediciones de deformación/fisura a la vez que actúa como refuerzo estructural (Bremer et al., 2017).

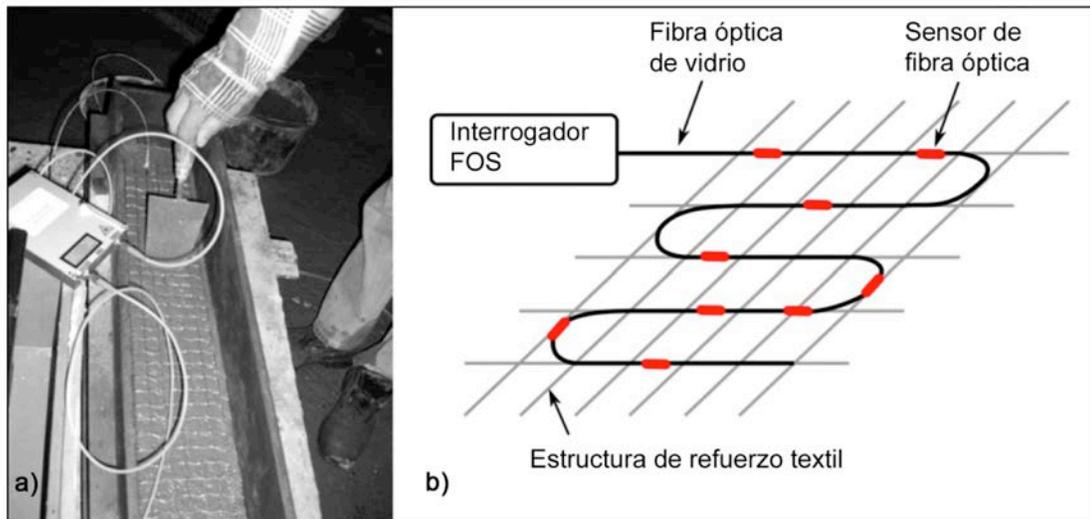


Figura 1. Incorporación del sensor en una pieza de hormigón (a) y esquema de una estructura de refuerzo textil funcionalizada con sensores de fibra óptica (b) (Bremer et al., 2017)

3.2 Sensores y técnicas químicas de medición

El desarrollo de nuevos sensores químicos ha dado lugar a una gran productividad científica desde su descubrimiento en 1906 por Cremer (Alegret et al., 2004), (Frize, 2014). Estos sensores químicos de tipo electroquímico son los dispositivos más ampliamente utilizados en el control de la durabilidad (Toko y Habara, 2005), (Burkert et al., 2006), (Froche, 2017), (Legin et al., 1997), (Schiegg 2002), (Bergmeister, 2004), (Sensortec, 2006), (Mihell y Atkinson, 1998), (Morata et al., 2013), (Brite/EuRam, 2002), (Andringa et al. 2006). Las características que los convierten en apropiados para el estudio de estructuras de hormigón armado son su simplicidad en la obtención de datos, su elevada sensibilidad y su capacidad de fabricación a escala pequeña. Además, estos sensores pueden ser incorporados en el interior del medio objeto de estudio, y por ejemplo, dejarlos embebidos dentro de la estructura (Martínez y Andrade, 2009).

Los sensores electroquímicos se pueden clasificar en tres grandes grupos: potenciométricos, amperométricos y conductimétricos (CSIC, 1987). En la Figura 2 se realiza una clasificación de las técnicas electroquímicas principales (Romero, 2014) basada en criterios de diferentes autores (Kissinger y Heineman, 1996), (Harvey, 2000), (Zoski, 2007).

Las técnicas electroquímicas de tipo farádico son aquellas en las que ocurre un proceso de oxidación-reducción y tienen como objetivo estudiar los procesos que ocurren en la interfaz entre el medio y el electrodo. Dentro de las técnicas farádicas se distinguen las técnicas estáticas en las que no existe circulación de corriente ($I=0$) y las dinámicas en las que sí hay circulación de corriente ($I\neq 0$). Por otro lado, las técnicas no farádicas se centran en el medio objeto de estudio y la técnica más importante es la conductimetría.

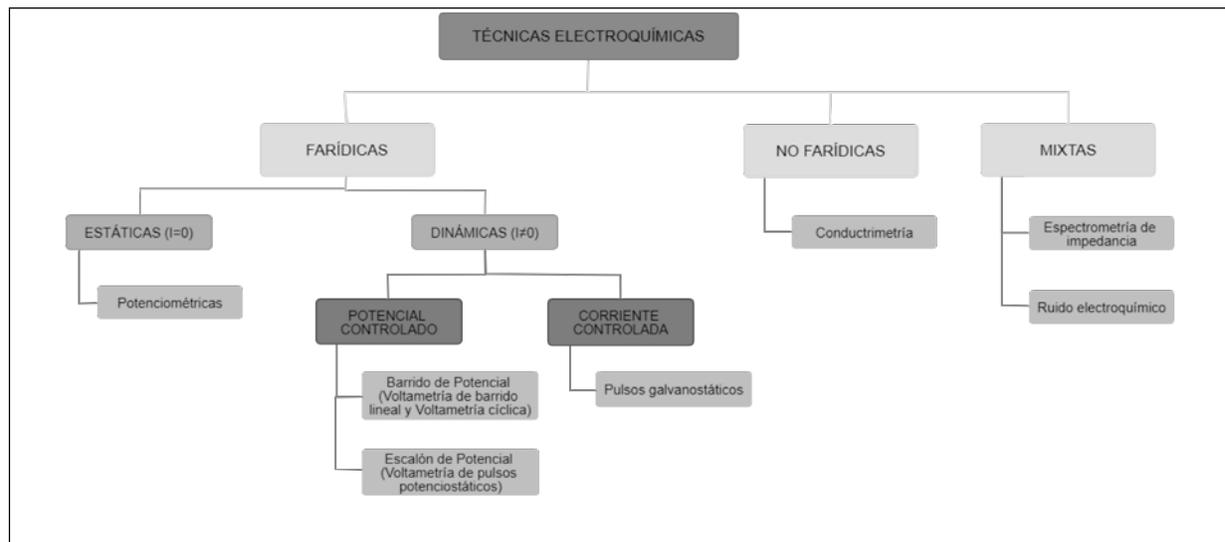


Figura 2. Esquema de las principales técnicas electroquímicas. Modificado de (Romero, 2014)

3.2.1 Sensores Potenciométricos

Los sensores que utilizan técnicas potenciométricas se basan en medir el potencial que se establece entre los electrodos, uno de referencia (RE) y otro de medida (WE), al introducirse en un medio electrolítico sin corriente en circulación (Taylor y Schultz, 1996) (Romero, 2014). El

electrodo de referencia (RE) presenta un potencial estable e indiferente a la composición del elemento a estudiar y debe ser resistente y fácil de conectar. En la Tabla 5 se presentan los electrodos de referencia de mayor utilización (Webster y Eren, 2017). Éstos son de tipo metálico o de membrana, que son específicos o selectivos de iones (Skoog et al., 1997).

Tabla 5. Electrodo de referencia comunes (Webster y Eren, 2017)

Tipo de electrodo	Reacción electródica	Potencial a 25°C V va. EHN
Calomelanos Hg/Hg ₂ Cl ₂ , Cl ⁻	Hg ₂ Cl ₂ + 2e ⁻ ↔ 2Hg + 2Cl ⁻	E = 0.276 – 0.059 log [Cl ⁻] KLC, sat, E = 0.244 V coef. temp.: - 0.65 mV/°C
Cobre/sulfato de cobre Cu/CuSO ₄ , Cu ²⁺	Cu ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Cu	E = 0.6151 – 0.295 log [SO ₄ ²⁻] K ₂ SO ₄ sat. E = 0.710 V
Plata/cloruro de plata Ag/AgCl, Cl ⁻	AgCl + 1e ⁻ ↔ Ag + Cl ⁻	E = 0.2224 – 0.0591 log [Cl ⁻] coef. temp.: - 0.6 mV/°C
Mercurio/sulfato mercurioso	Hg ₂ SO ₄ + 2e ⁻ ↔ 2Hg + SO ₄ ²⁻	E = 0.340 – 0.0195 log [Cu ²⁺] coef. temp.: - 0.9 mV/°C
Zinc/agua de mar	Zn ²⁺ + 2e ⁻ ↔ Zn	E ≈ - 0.80 V

Sin embargo, para la aplicación de los sensores dentro de elementos de hormigón armado es necesario que cumplan como requisitos ser estables e invariantes frente a los cambios térmicos y químicos en el hormigón, ser tolerantes a diversas condiciones climáticas, tener la capacidad de dejar circular una pequeña corriente con un mínimo de polarización y ser estables a largo plazo sin precisar mantenimiento (Duffó et al., 2007). Para ello se han desarrollado y estudiado otros electrodos de referencia y pseudo-referencia embebibles como el grafito, Pt, Ti/RuOx (MMO), Ti/TiO₂ y MnO₂, siendo este último el más interesante porque puede comportarse como una verdadera referencia en un medio alcalino como es el hormigón (Milano et al., 2010), (Lu et al., 2009). Este tipo de electrodos internos de referencia normalmente son embebidos cerca de la armadura para minimizar los problemas derivados de la resistividad del hormigón (Elsener, 2003).

Mediante ésta técnica de medición, el potencial registrado está condicionado por el material de los electrodos, la concentración y naturaleza de especies en el medio estudiado y la temperatura. Es por ello que se deben realizar controles rigurosos de la temperatura y de la limpieza de los electrodos para evitar posibles interferencias en la medición. La medida de potenciales de equilibrio indica la concentración de una sustancia y su evolución durante el proceso de una reacción química (CSIC, 1987).

Los sensores basados en técnicas potenciométricas que son utilizados en la monitorización de la corrosión pueden realizar mediciones del potencial de corrosión, de penetración de cloruros y de pH.

La medida del potencial de corrosión es no destructiva puesto que no se altera el estado del metal y da información sobre el riesgo de corrosión de las armaduras. Esta técnica permite utilizar referencias externas o embebidas en el hormigón Figura 3.

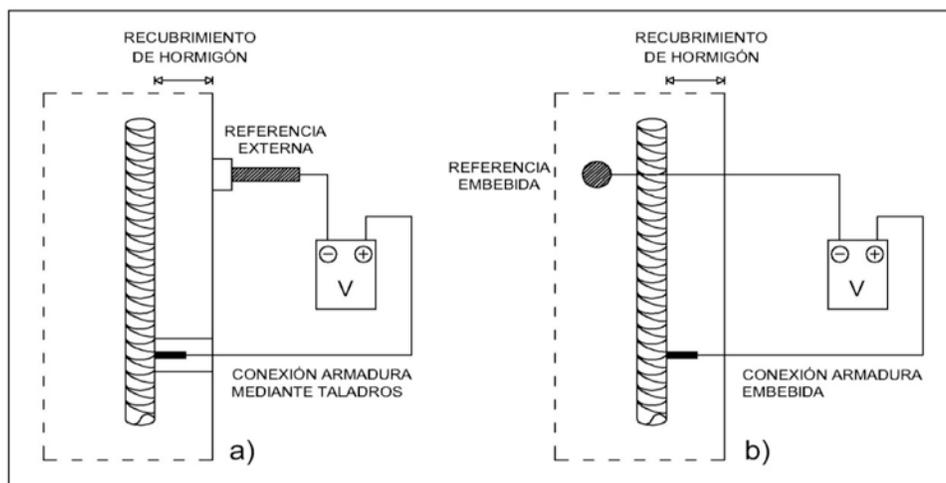


Figura 3. Esquema de medida de potencial de corrosión mediante sensores en armaduras ya ejecutadas (a) y embebidas (b)

Por lo que respecta a los sensores potenciométricos utilizados para medir la actividad de los iones cloruro (Cl^-) se pueden utilizar electrodos de Ag/AgCl fabricados con un alambre de plata anodizado (Aranda, 2015), pero presentan problemas de estabilidad a largo plazo. Esta clase de sensores potenciométricos se ha estudiado en disoluciones acuosas (Labrador 2009), en disoluciones que simulan el agua de los poros del hormigón (Alves et al., 2006), (Vera, 2010) y en hormigones y morteros endurecidos (Duffó y Farina, 2009), (Dong et al., 2011), (Alves et al., 2006), (Climent-Llorca et al., 1996), (Terol et al., 2013). Bajo estos principios se ha desarrollado el Sistema de Anillo de Expansión formado por un anillo de expansión-ánodo y un cátodo que se insertan en el hormigón mediante perforaciones. La pieza de medición es el anillo de expansión-ánodo que permite realizar mediciones del potencial de corrosión y corriente de corrosión entre el ánodo y el cátodo a distintas profundidades (Sensortec, 2006). Otro tipo de sensor para estructuras existentes es la denominada Sonda CorroRisk Figura 4 que consiste en clavos metálicos con un cátodo hecho con una malla de titanio activado y un electrodo de MnO_2 . Estos

clavos se insertan en la estructura existente por martilleo y están hechos de un material similar al de las armaduras, por lo que se espera que se corroan cuando se alcance una concentración crítica de cloruros en el hormigón (Froche, 2017).

Por último, mediante sensores potenciométricos también se puede determinar el pH con electrodos sensibles a las variaciones de pH (Dong et al., 2011). Actualmente, su utilización aún es escasa debido a la necesidad del electrodo a ser resistente al medio y únicamente se utilizan los fabricados con MMO (Metal-Metal-Óxido) (Song et al., 1998), (Du et al., 2006), (Yu y Caseres, 2011). Un ejemplo de sensor electroquímico que puede configurarse tanto para la medición de pH como la de cloruros son los desarrollados mediante tecnología de microelectrónica híbrida de capa gruesa. Este sistema permite la fabricación de sensores económicos, resistentes a largo plazo, miniaturizados y reproducibles mediante técnicas de serigráfico que permiten integrar distintos electrodos en un mismo soporte (Gandía-Romero et al., 2016), (Gandía-Romero et al., 2016a), (Martínez-Mañez, 2005).

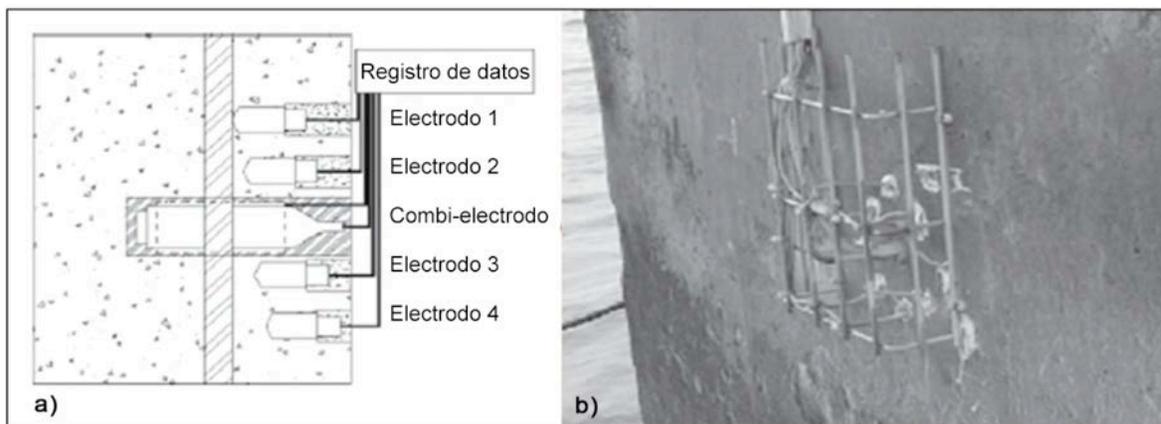


Figura 4. Diseño del "CorroRisk" para determinar la profundidad de la crítica de penetración de cloruros en estructuras existentes vista en sección (a) y montada en una estructura (b)(Froche, 2017)

3.2.2 Sensores Amperométricos

Los sensores amperométricos utilizan métodos dinámicos de potencial controlado (CSIC, 1987). Esta técnica consiste en aplicar una diferencia de potencial determinada entre dos electrodos (Hulanicki et al., 1991). Las variaciones de voltaje se pueden aplicar mediante funciones voltaje-tiempo como la voltametría de barrido lineal (LRP) y la voltametría cíclica (VC) (González, 2012). Mediante estos métodos se mide la corriente en el electrodo de trabajo mientras se hace un barrido lineal del potencial entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo (LRP) o un barrido tanto en sentido directo como en el inverso (VC). La oxidación o la reducción del analito son registradas como un pico en la señal, en el potencial al cual la especie comienza

a oxidarse o reducirse. El electrodo de referencia más utilizado es el óxido de manganeso (MnO_2) que tiene una estabilidad probada a largo plazo en el hormigón (Milano et al., 2010).

Recientemente se ha desarrollado un sistema en red de sensores de corrosión que incorpora un equipo de voltametría de pulsos que permite determinar la intensidad de corrosión para cada punto de la red de sensores implementados en una estructura de hormigón armado (Alcañiz et al., 2016) ver Figura 5.

Conjuntamente con su diseño, los mismos investigadores han desarrollado un software específico que procesa la respuesta eléctrica de cada sensor y analiza la estructura en tiempo real (Ramón et al., 2016).

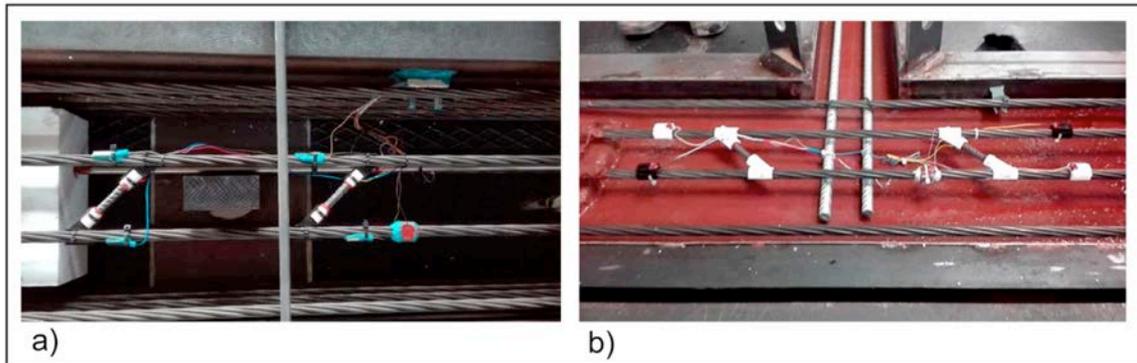


Figura 5. Sensores colocados en unas vigas antes (a) y durante (b) el hormigonado (Alcañiz et al., 2016)

3.2.3 Sensores Conductimétricos

Los sensores conductimétricos son dispositivos compuestos de dos electrodos inertes fabricados con metal noble a los que se les aplica una tensión mediante una señal alterna, lo que permite determinar la corriente en circulación y por lo tanto, la resistencia eléctrica de la muestra estudiada, expresada habitualmente en ohmios (Ω) (CSIC, 1987). Este parámetro está directamente relacionado con la estructura porosa del material y la humedad (Alonso et al., 1988). Es por ello que también se utilizan para determinar indirectamente otros factores como el curado del hormigón, la resistencia a la carbonatación y a la penetración de cloruros (Andrade et al., 2009).

Para determinar la resistividad en hormigones endurecidos se utilizan dos métodos cuyos procedimientos y cálculos se encuentran en las normas UNE83988-1 y UNE83988-2: el método directo mediante dos electrodos

(Jeong et al., 2013) y el método Wenner mediante cuatro electrodos (Broomfield et al., 2002), (Reis, 2006), siendo éste último una alternativa muy utilizada que consiste en establecer una circulación de una corriente conocida entre dos electrodos para medir la tensión entre otros dos electrodos. Una vez conocida la resistividad del hormigón se puede establecer la probabilidad de corrosión de las armaduras según los valores recogidos en la Tabla 3 (Feliu et al., 1989).

Un ejemplo de sensor comercializado actualmente es el denominado electrodo "Multiring", que puede determinar la resistencia eléctrica en función de la profundidad Figura 6. Este sensor desarrollado por Sensortec (Sensortec, 2006) se compone de anillos alternos de acero inoxidable y un polímero que permiten la medición a distintas profundidades con una distancia entre ellas de 5 mm.

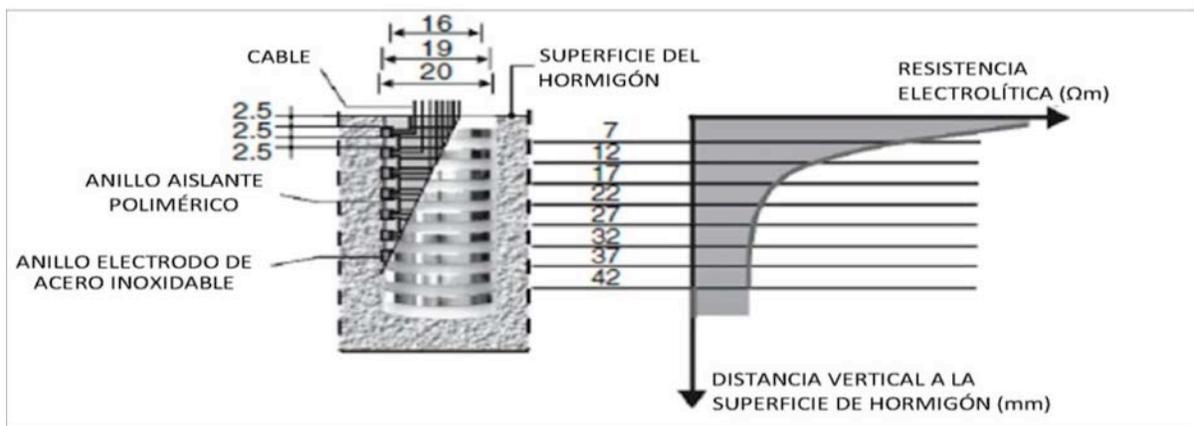


Figura 6. Configuración esquemática del Electrodo "Multiring" para mediciones de Resistencia en función de la profundidad del hormigón (Sensortec, 2006)

4. Calibración

Muchos sistemas de sensores requieren calibración antes de introducirse en el hormigón y el fabricante

normalmente proporciona los valores apropiados. A continuación se han recogido a modo de resumen en la Tabla 6 los sensores y elementos de sensores que requieren calibración antes de su uso (McCarter y Vennesland 2004):

Tabla 6. Sensores y elementos de sensores que requieren calibración previa (McCarter y Vennesland, 2004)

Sensores y elementos de sensores	Calibración requerida
Electrodos de referencia	Respecto a un electrodo de referencia de laboratorio estándar en una disolución saturada de hidróxido de calcio y aire.
Sensores de pH	Respecto a un electrodo de vidrio pH estándar en tres disoluciones de diferente alcalinidad.
Sensores de cloruros	En tres disoluciones de cloruro estándar con diferentes contenidos de cloruro saturadas con hidróxido de calcio.
Sensores de temperatura	Respecto a los termómetros estándar a tres temperaturas diferentes.
Sensores de humedad relativa	Sobre tres disoluciones estándar de sales saturadas.
Sensores de resistencia	En disoluciones de resistencia conocida. A partir de la pendiente de la resistencia medida frente a la curva de resistividad de la disolución, se puede obtener la constante de calibración.

5. Ubicación

Dependiendo del tipo de sensor, este deberá ir embebido, en contacto con la superficie exterior o sin necesidad de contacto, tal como se ha recogido en la Tabla 7.

Tabla 7. Ubicación de los sensores

Clasificación de los sensores según su ubicación		
Embebidos	Externos en contacto	Externos sin contacto
Potenciométricos (localización en armadura)	Ópticos	Termográficos
Amperométricos (próximos a la superficie)	Conductimétricos	
Conductimétricos	De flujos magnéticos	

De todos los tipos de sensores según su ubicación, los sistemas externos sin contacto suelen tener el coste económico de fabricación más elevado, ya que necesitan sofisticados equipos de medida portátiles. Por otro lado, los sistemas internos son más económicos aunque presentan el inconveniente de no ser reutilizables y han de ser diseñados de forma que resistan a las condiciones internas de la estructura y no precisen de mantenimiento (Lynch y Loh, 2006).

Independientemente de su posición respecto al interior/exterior de la estructura, su ubicación real depende no sólo de la morfología y diseño de la estructura, sino también del coste económico del proceso de control. Sin embargo, se pueden determinar tres ubicaciones generales

que son: allí donde exista exposición a sustancias agresivas (por ej. salpicaduras de agua de mar), en lugares estructuralmente críticos y en lugares no expuestos a sustancias agresivas para actuar como controles (McCarter y Vennesland, 2004). Si se toma como referencia, por ejemplo, los puentes de carreteras ver Figura 7, las zonas más críticas son las partes inferiores de los pilares, que también se ven afectadas por una importante concentración de cloruros debido a la contaminación producida por el tráfico de vehículos (McCarter y Vennesland, 2004). Por otro lado, en zonas costeras las zonas críticas de las estructuras son aquellas expuestas a salpicaduras de agua de mar (Schiegg y Dauberschmidt, 2008).

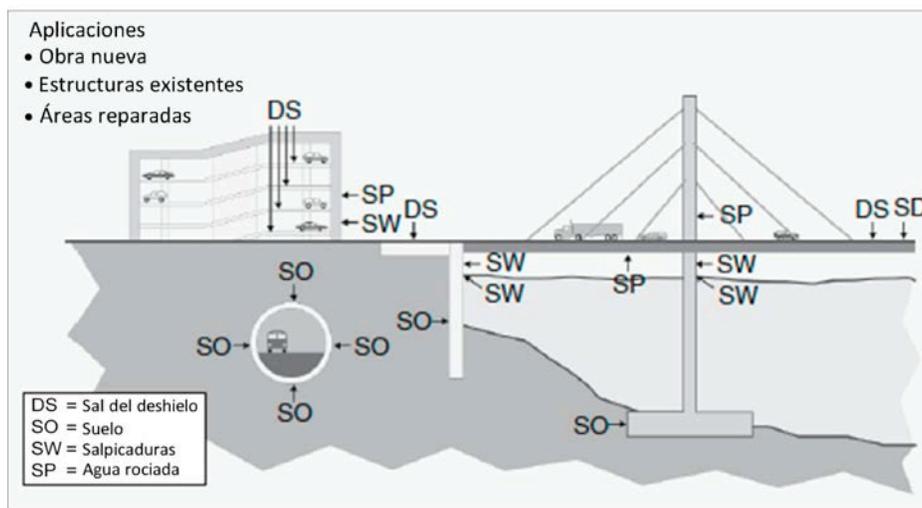


Figura 7. Ejemplos de localizaciones de aplicación de sensores. Modificada de (Schiegg y Dauberschmidt, 2008)

6. Selección y limitaciones

Los sistemas de monitorización de corrosión presentan una serie de limitaciones respecto a la durabilidad del sistema de monitorización, a los tipos de corrosión que se puede monitorizar (picaduras o carbonatación) y a la falta de información sobre puntos débiles fuera del área de control del sensor (Schiegg y Dauberschmidt 2008). Debido a estas limitaciones, la monitorización no puede sustituir las inspecciones visuales rutinarias e inspecciones visuales detalladas en caso de que se detecte un deterioro importante en la estructura.

Por otro lado, la complejidad de los procesos corrosivos hace difícil su monitorización. Es por ello que una buena elección del sistema de monitorización es esencial para garantizar una vida útil además de garantizar la recogida de información de forma exacta, fiable y sensible (Barroca et al. 2013). De entre todas las técnicas revisadas, aquellas no destructivas para la monitorización in situ de la corrosión presentan una importante ventaja respecto a las técnicas

antiguas realizadas por muestreo, que resultan ser invasivas y destructivas (Ahmad 2003).

Con el objetivo de poder hacer una correcta selección entre las distintas técnicas físicas de monitorización, se han recogido a modo de síntesis en la Tabla 8 las principales aplicaciones, ventajas e inconvenientes, así como referencias de ejemplos de autores de técnicas y sensores desarrollados de cada tipo. De acuerdo con esta tabla, las únicas técnicas que son de aplicación para el estudio del deterioro por los efectos de la corrosión son las técnicas basadas en termografía, flujos magnéticos y sistemas ópticos. Las demás técnicas de medida se utilizan para mediciones de propiedades mecánicas, deformaciones o imperfecciones. Generalmente, mediante estas técnicas se pueden obtener mediciones de forma rápida y sencilla. Sin embargo, su aplicación real en campo presenta varios inconvenientes importantes como son las interferencias y la fragilidad de los sistemas implementados. Otro inconveniente de importante consideración respecto a estos sistemas es su elevado coste de producción.

SPANISH VERSION.....

Respecto al tipo de sensores estudiados de tipo electroquímico, en la Tabla 9 se muestra un cuadro resumen de sus aplicaciones, ventajas e inconvenientes, así como referencias de los principales ejemplos de autores de técnicas y sensores desarrollados. De entre todos ellos, se destaca la limitación cualitativa de los sensores potenciométricos debido a que solo aportan información sobre el potencial de corrosión que permite establecer mapas de potencial y delimitar zonas de actuación (Castañeda et al., 2001). Un gran inconveniente de este sistema en estructuras ya puestas en carga es su necesidad de realización de catas intrusivas por cada medida de potencial realizada. Para conocer datos cuantitativos del estado del proceso de corrosión en las estructuras es necesario obtener la velocidad de corrosión. Mediante los sensores amperométricos y conductimétricos se pueden medir parámetros necesarios que, indirectamente,

nos permiten determinar la velocidad de corrosión (Andrade y Alonso, 1996).

En el presente trabajo se han diferenciado los distintos tipos de técnicas electroquímicas desarrolladas para la monitorización de la corrosión y se han mostrado ejemplos de sensores que utilizan individualmente cada una de estas técnicas. Sin embargo, recientemente se han desarrollado prototipos denominados multisensores que utilizan varias de estas técnicas para poder así ser capaces de medir distintos parámetros tales como la densidad de corriente de corrosión, el potencial de corrosión, el flujo de oxígeno, el contenido de cloruros, la temperatura interna y la resistencia eléctrica (Duffó y Farina, 2009). Además, este prototipo de sensores pretende economizar las técnicas de recolección y análisis de datos mediante sistemas on-line que permitan almacenar la información recogida de forma remota (Duffó et al., 2007), (Lynch y Loh ,2006),(Smalling, 2008).

Tabla 8. Tabla resumen de las ventajas e inconvenientes y aplicaciones de las principales técnicas físicas de sistemas de control y monitorización de estructuras de hormigón armado. La columna final de la derecha muestra referencias de publicaciones de ejemplos de sensores que utilizan las técnicas presentes

TÉCNICAS	VENTAJAS	INCONVENIENTES	APLICACIONES	PUBLICACIONES
TERMOGRAFÍA	<ol style="list-style-type: none"> 1. Buenos resultados en variaciones térmicas. 2. Sistema portátil. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Afectados por entorno. 2. Solo apto en laboratorios. 3. Necesitan calibrado previo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Detección de defectos y fisuración. 2. Corrosión en armaduras 	<p>(Meola, 2013) (Kobayashi & Banthia, 2011)</p>
FLUJOS MAGNÉTICOS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rápido y sencillo. 2. No necesita personal especializado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Afectados por la radiación electromagnética exterior. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corrosión en armaduras 	<p>(Maki et al., 2001) (Guangtao, 2010)</p>
SISTEMAS ÓPTICOS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rápida transmisión de datos. 2. Elevada durabilidad. 3. No afectados por radiaciones electromagnéticas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fragilidad del sistema. 2. Afectados por la suciedad y polvo. 3. Requiere precaución con las dobles del cableado. 4. Necesitan calibrado previo 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Deformaciones. 2. Temperaturas. 3. Corrosión. 4. pH. 5. Retracción. 	<p>(Yun et al., 2010) (Kung, 2014) (Bremer, 2017)</p>



Tabla 9. Tabla resumen de las ventajas e inconvenientes y aplicaciones de de los sistemas electroquímicos empleados en de control y monitorización de estructuras de hormigón armado. La columna final de la derecha muestra referencias de publicaciones de ejemplos de sensores que utilizan las técnicas presentes

TÉCNICAS	VENTAJAS	INCONVENIENTES	APLICACIONES	PUBLICACIONES
POTENCIOMÉTRICO- Medición del potencial de corrosión	1. In situ. 2. Fácil uso. 3. Económicos.	1. Intrusivos, precisan catas. 2. Limitación cualitativa. 3. Influenciados por la temperatura. 4. Necesidad de calibrado previo.	1. Elaboración de mapas de potenciales.	(Toko & Habara, 2005) (Burkert et al., 2006) (Force technology, 2017)
POTENCIOMÉTRICO- Medición de la penetración de cloruros	1. In situ. 2. Fácil uso. 3. Económicos. 4. No destructivo	1. El electrodo es consumible. 2. Vida útil limitada. 3. Influenciados por la temperatura. 4. Necesidad de calibrado previo.	1. Presencia de cloruros.	(Legin et al., 1997) (Schiegg, 2002) (Bergmeister, 2004) (Sensortec, 2006) (Force technology, 2017) (Gandía et al., 2016)
POTENCIOMÉTRICO- Medición del pH	1. In situ. 2. Fácil uso. 3. Económicos. 4. No destructivo	1. El electrodo es consumible. 2. Influenciados por la temperatura. 3. Necesidad de calibrado previo.	1. Determinación del pH.	(Mihell & Atkinson, 1998) (Gandía et al., 2016)
AMPEROMÉTRICOS	1. In situ. 2. Fácil uso y robusto. 3. Económico. 4. No destructivo	1. Interferencias de materiales con el mismo comportamiento redox.	1. Cálculo indirecto de la intensidad de corrosión, potencial de corrosión y velocidad de corrosión.	(Morata et al., 2013) (Brite/EuRam, 2002) (Force technology, 2017)
CONDUCTIMÉTRICOS	1. In situ. 2. Pequeños, robustos, rápida respuesta. 3. No destructivo.	1. Necesidad de calibrado en función del medio y resistencia del material.	1. Cálculo indirecto de la resistencia. humedad relativa y velocidad de corrosión.	(Andringa, 2006) (Spiesz & Brouwers, 2013)

7. Ejemplos de aplicación

Aunque ya se pueden encontrar sensores de corrosión en algunas obras destacables, el uso actual de sensores en la construcción se encuentra en fase incipiente. A continuación se presentan varios ejemplos de aplicaciones reales de técnicas de monitorización y sensores para asegurar una durabilidad óptima de las construcciones. Estas son construcciones de gran envergadura y presupuesto en las que se ha temido por su durabilidad debido a estar expuestas a condiciones que suponen un alto riesgo de corrosión.

7.1 Puente de la Bahía de Hangzhou

Una de las primeras aplicaciones de sistemas de monitorización desde el diseño inicial fue llevada a cabo en 2003, al iniciarse las obras de un puente de 36 km de largo en Hangzhou, al este de China, cuya vida útil fue fijada en 100 años. Al situarse en ambiente marino, este puente está expuesto a severas condiciones ambientales. Es por ello que se instaló un sistema de monitorización a largo plazo que incluye sensores para determinar la penetración de los cloruros y otros sistemas que permiten iniciar medidas de protección catódica de ser necesarias (Raupach, 2006), (Spiesz y Brouwers, 2013), (Gan et al., 2010).

7.2 Cubierta de arcos del estadio de fútbol Allianz-Arena en Munich

En Europa, unos años más tarde se recurrió a los sistemas de monitorización para conseguir un diseño más eficiente del estadio Allianz-Arena de Munich, cuya construcción se realizó para celebrar en 2006 el Mundial de fútbol. Con el fin de proporcionar una infraestructura adecuada para los visitantes, el estadio cuenta con el espacio de estacionamiento más grande de Europa, cuyas cubiertas construidas de hormigón armado y pretensado deben de soportar heladas superficiales y la presencia de sales de deshielo. Debido a sus grandes dimensiones, la opción de proteger las cubiertas mediante recubrimientos se rechazó por su alto coste y en su lugar se decidió actuar en las áreas puntuales donde se presente riesgo de corrosión. Para ello se elaboró un plan de control consistente en realizar inspecciones de forma frecuente mediante un sistema de monitorización local, que proporciona información sobre el riesgo de corrosión a varias profundidades. A partir de la información continuamente actualizada sobre la probabilidad de corrosión de las armaduras se pueden localizar los puntos

necesarios y la edad de aplicación de un recubrimiento protector que frene el inicio de la corrosión (Alexander, 2009).

7.3 Cubiertas del Hipódromo de La Zarzuela de Madrid

En España, los sistemas de monitorización de corrosión fueron puestos a prueba en el año 2005 durante la última obra de reparación del emblemático Hipódromo de La Zarzuela de Torroja. Durante éstos trabajos de intervención se decidió instalar grupos de sistemas de registro de corrosión permanentes con los siguientes tipos de sensores electroquímicos: sensor de detección de presencia de agua líquida, sensor de medida del potencial de corrosión de la armadura embebida con electrodo de referencia tipo Mn/MnO y sensor de medida de la temperatura (Dragados et al., 2011) ver Figura 8.

Gracias a la incorporación de los sensores se pudo comprobar que la reparación de las cubiertas se realizó de forma satisfactoria. Este sistema de implementación de sensores permanentes permitirá el futuro control de la edificación sin medidas destructivas (Dragados et al., 2001).

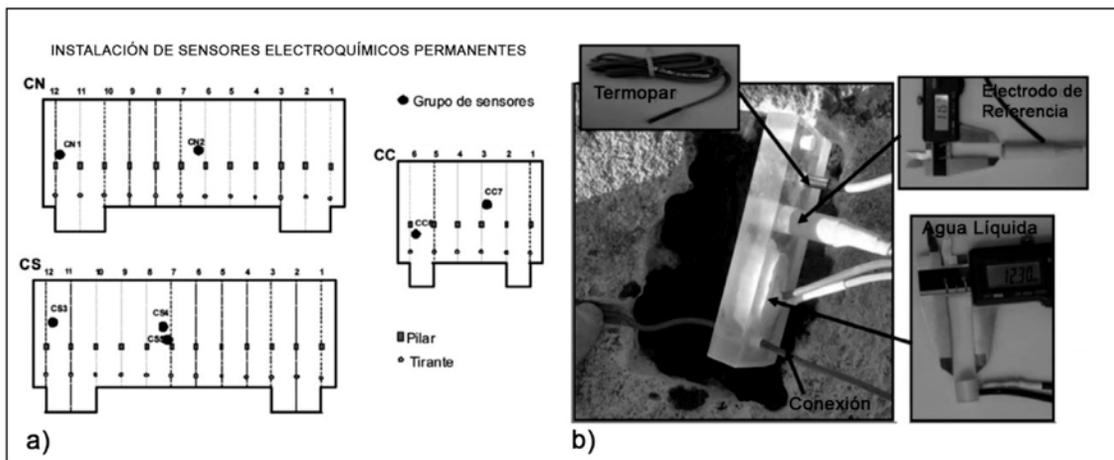


Figura 8. Esquema de localización del grupo de sensores en la cubierta (a) y esquema del grupo de sensores (b). Modificado de (Dragados et al., 2011)

7.4 Bateas Idifor de hormigón pretensado en el País Vasco

Más recientemente, investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia han patentado e instalado unos sensores para medir la velocidad de corrosión en bateas de hormigón pretensado diseñadas por la empresa Idifor (Idifor Technological Creations S.L.), y ubicadas en País Vasco

Figura 9. El sistema de adquisición de datos está automatizado y la información recogida se envía de forma inalámbrica a una unidad central, lo que permite un seguimiento de los procesos de corrosión de forma continua y en tiempo real (Zemloc,k 2014).

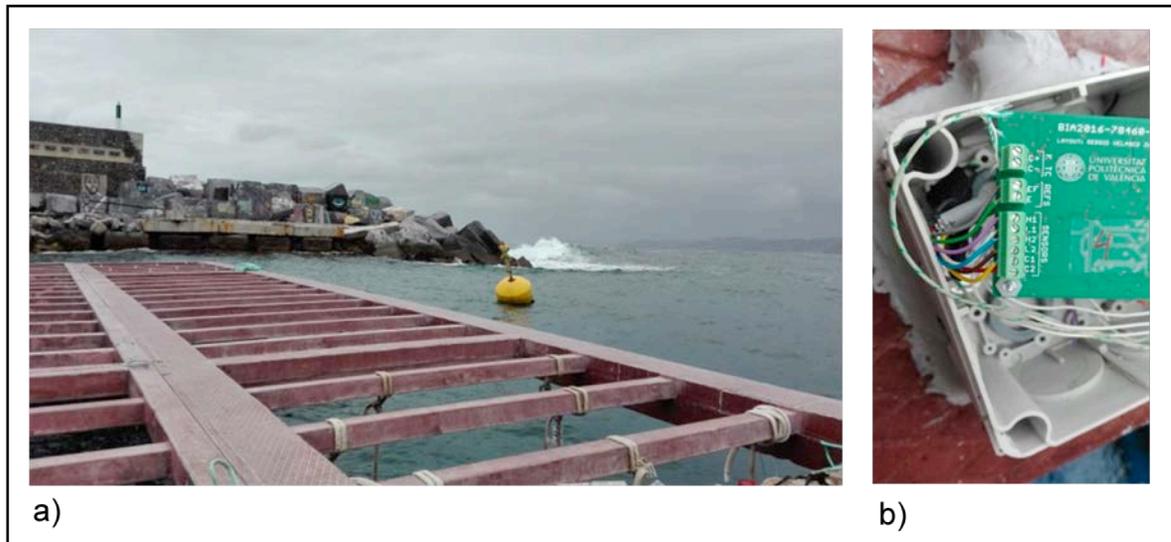


Figura 9. Batea en Mutriku (País Vasco) (a) y módulo de adquisición de datos (b) (Zemlock, 2014)

7.5 Puente Taminabrücke en Suiza

Actualmente, en la Escuela Politécnica Federal de Zurich se están realizando importantes estudios sobre el efecto de la corrosión en la vida útil de las infraestructuras de hormigón armado (Angst y Elsener, 2017) y están barajando la posibilidad de utilizar sensores para la monitorización de la corrosión en puentes de reciente construcción como el Taminabrücke inaugurado en Junio del 2017. Se trata del puente de hormigón armado más largo de Suiza con una extensión de 475 metros (Wit, 2017).

8. Conclusión

La corrosión de las armaduras es la principal causa de deterioro de las estructuras de hormigón armado, y por lo tanto, de reparación de las mismas. Es por ello que la monitorización es una herramienta muy útil y prometedora, ya que permite evaluar la condición de una estructura de forma permanente y, por lo tanto, estimar su fecha de intervención óptima.

Una condición previa para el éxito de la monitorización de la corrosión es un diseño detallado del sistema de monitorización. Para ello es necesaria una descripción clara del objetivo de monitorización y una elección posterior de sensores adecuados. Además, parte del diseño de un sistema de monitorización es planificar cuidadosamente la instalación mientras se está construyendo la estructura, definir los valores umbral de los sensores con anticipación, describir las posibilidades de verificar el sistema y definir la tasa de toma de datos.

Una diferencia significativa con respecto a otros sectores industriales como la industria química es que en la construcción los cambios de parámetros relevantes de la corrosión en las estructuras tienen lugar con bastante lentitud, por lo que se recomienda un bajo ritmo de toma de datos.

Actualmente la capacidad que tienen los últimos sistemas desarrollados de monitorización de forma continua y a tiempo real podría permitir una evaluación más detallada del estado actual y futuro de la estructura, llegando a predecir su vida útil. Si además estos sistemas permiten la automoción, programación y un elevado número de puntos de medida distribuidos se puede conseguir un sistema idóneo de control. Con este objetivo, se está trabajando actualmente en el desarrollo de nuevos software para una mejor toma e interpretación de datos, y la incorporación de sistemas remotos mediante wi-fi que permiten almacenar los datos de forma remota (Lynch y Loh, 2006), (Alcañiz, 2016).

Mientras se sigue trabajando en el desarrollo y mejora de sistemas de monitorización, actualmente ya están disponibles comercialmente algunos tipos de sensores de corrosión que miden parámetros directos como por ejemplo la velocidad de corrosión, o parámetros indirectos como el potencial de corrosión o la resistividad (Kuang-Tsan and Yang, 2010) (Zemlock et al., 2014).. Sin embargo, la tecnología actual todavía debe enfrentarse al obstáculo de su industrialización y comercialización, para disponer así algún día de una red de sensores instalada a lo largo de nuestro parque edificatorio que permita conocer su estado de forma inmediata y se tenga pleno control sobre los posibles riesgos de deterioro.

9. Referencias

- Ahmad S. (2003)**, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review, *Cem. Concr. Compos.* 25 459–471. doi:10.1016/S0958-9465(02)00086-0.
- Albareda-Sirvent M., Merkoçi A., Alegret S. (2000)**, Configurations used in the design of screen-printed enzymatic biosensors - A review, *Sensors Actuators B Chem.* 69 153–163. doi:10.1016/S0925-4005(00)00536-0.
- Alcañiz Fillol M., Bataller Prats R., Gandía Romero J.M., Ramón Zamora J.M., Soto Camino J., Valcuende Payá M. (2016)**, Sensor, red de sensores, método y programa informático para determinar la corrosión en una estructura de hormigón armado, ES2 545 669.
- Alcañiz Fillol M., Bataller Prats R., Gandía Romero J., Ramón Zamora J., Soto Camino J., Valcuende Payá M. (2016)**, Sensor, red de sensores, método y programa informático para determinar la corrosión en una estructura de hormigón armado, WO2016177929 A1.
- Alegret S. (1992)**, Sobre senyals, sensors i altres aspectes de l'anàlisi química. Discurs de la sessió inaugural del curs 1992-1993, Instituts d'Estudis Catalans, Barcelona.
- Alegret S., del Valle M., Merkoçi A. (2004)**, Universitat Autònoma de Barcelona. Servei de Publicacions., Sensores electroquímicos : introducción a los quimiosensores y biosensores : curso teórico-práctico, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Alexander M.G. (2009)**, Concrete repair, rehabilitation and retrofitting II, CRC Press.
- Almeraya V.A., Gaona C.F., Martínez T. C. (1998)**, Monitoreo y control de la corrosión en estructuras de concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Ciudad de México.
- Alonso C., Andrade C., González J.A. (1988)**, Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types, *Cem. Concr. Res.* 18 687–698. doi:10.1016/0008-8846(88)90091-9.
- Alves J.H., Simões A.M., Fernandes J.C.S., Lourenço Z., Costa A.J.S., Appleton A.J., Ferreira M.G.S. (2006)**, Multiprobe chloride sensor for in situ monitoring of reinforced concrete structures, *Cem. Concr. Compos.* 28233–236. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.01.005.
- Andrade C., Andrade C., Castillo A., Castellote M. (2009)**, The Use of Electrical Resistivity as NDT Method for the Specification of the durability of Reinforced Concrete, Centro de Seguridad y Durabilidad Estructural y de Materiales, Toulouse.
- Andrade C., Alonso C. (1996)**, Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site, *Constr. Build. Mater.* 10 315–328. doi:10.1016/0950-0618(95)00044-5.
- Andrade C., Castillo A., Castellote M. (2009)**, The Use of Electrical Resistivity as NDT Method for the Specification of the durability of Reinforced Concrete, Centro de Seguridad y Durabilidad Estructural y de Materiales, Toulouse.
- Andringa M., Puryear J., Neikirk D., Wood, S. (2006)**, Low-cost wireless corrosion and conductivity sensors, in: M. Tomizuka, C.-B. Yun, V. Giurgiutiu (Eds.), p. 61740X. doi:10.1117/12.658836.
- Angst U., Elsener B. (2017)**, The size effect in corrosion greatly influences the predicted life span of concrete infrastructures, *Sci. Adv.* 3
- Angst U., Elsener B., Larsen C.K., Vennesland Ø. (2009)**, Critical chloride content in reinforced concrete — A review, *Cem. Concr. Res.* 39 1122–1138. doi:10.1016/j.cemconres.2009.08.006.
- Aranda M. de los Á., Santiago V.L., Altava B., Galindo F. (2015)**, Construcción y evaluación de electrodos selectivos de iones cloruro, *Rev. Cuba. Química.* 27 119–130.
- Artero C., Nogueiras Cervera M., Manuel A. (2012)**, PH sensor, *Instrum. Viewp.* 3. Winter 23–25.
- Arva E., Duffó G.S., Morris W. (2002)**, Aspectos electroquímicos en la medición de la velocidad de corrosión del acero en el hormigón, CONAMET/SAM-SIMPOSIO Mater.
- Barroca N., Borges L.M., Velez F.J., Monteiro F., Górski M., Castro-Gomes J. (2013)**, Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures, *Constr. Build. Mater.* 40 1156–1166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.087.
- Bergmeister K., Santa U. (2004)**, Brückeninspektion und –überwachung, in: BetonKalender (Ed.), Wörner J. D, Ernst & So, Berlin, pp. 409–481.
- Bremer K., Weigand F., Zheng Y., Alwis L.S., Helbig R., Roth B. (2017)**, Structural Health Monitoring Using Textile Reinforcement Structures with Integrated Optical Fiber Sensors., *Sensors (Basel).* 17 (2017). doi:10.3390/s17020345.
- Brite/EuRam (2002)**, Smart Structures (Integrated Monitoring System for Durability Assessment of Concrete Structures), in: Final Tech. Rep. Rep. Task 2.1 Determ. Key Parameters, Bruxelles.
- Broomfield J.P. (2006)**, Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, Second Edition, Taylor & Francis. doi:10.4324/9780203414606.
- Broomfield J.P., Davies K., Hladky K. (2002)**, The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures, *Cem. Concr. Compos.* 24 27–34. doi:10.1016/S0958-9465(01)00024-5.
- Burkert I.B., Eich G., Bäßler R. (2006)**, Corrosion Monitoring im Bauwesen, in: Sicherheitsgewinn Durch Monit., Freunde des Institutes für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, pp. 115–135.
- Cabrera J.G. (1996)**, Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion, *Cem. Concr. Compos.* 18 (1996) 47–59. doi:10.1016/0958-9465(95)00043-7.
- Castañeda J., Almeraya F., Gaona C., Vásquez G., Martínez A. (2001)**, Inspección de la corrosión en puentes de concreto reforzado mediante un monitoreo autónomo a distancia, *Ing. Construcción.* 16 (2001).
- Castañeda A., Corvo F., Meitín J. (2004)**, Determinación de la velocidad de corrosión de la barra de refuerzo del hormigón armado mediante técnicas electroquímicas, *Rev. CENIC Ciencias Químicas.* 35 (2004).
- Climent-Llorca M.A., Viqueira-Pérez E., López-Atalaya, M.M. (1996)**, Embeddable Ag/AgCl sensors for in-situ monitoring chloride contents in concrete, *Cem. Concr. Res.* 26 1157–1161. doi:10.1016/0008-8846(96)00104-4.
- Correia M.J., Pereira E.V., Salta M.M., Fonseca I.T.E. (2006)**, Sensor for oxygen evaluation in concrete, *Cem. Concr. Compos.* 28, 226–232. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.01.006.
- CSIC (1987)**, Introducción a los sensores, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.



- Dong S.G., Lin C.-J., Hu R.-G., Li L.-Q., Du R.-G. (2011)**, Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor, *Electrochim. Acta.* 56, 1881–1888. doi:10.1016/j.electacta.2010.08.089.
- Dragados S.A., Castillo A., Andrade C., Martínez I., Rebollo N., Fernández-Troyano L., Ayuso G., Cuervo J., Junquera J., Santana C., Delgado J. (2011)**, Evaluación y monitorización de la durabilidad de las cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela de Madrid; Assessment and monitoring of durability of shell structures in “Zarzuela Racecourse” Madrid, *Informes de la Construcción* 63, 33-41. doi:10.3989/ic10.058.
- Du R.G., Hu R.G., Huang R.S., Lin C.J. (2006)**, In situ measurement of Cl⁻ concentrations and pH at the reinforcing steel/concrete interface by combination sensors, *Anal. Chem.* 78, 3179–3185. doi:10.1021/ac0517139.
- Duffó G.S., Farina S.B. (2009)**, Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures, *Constr. Build. Mater.* 23, 2746–2751. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.04.001.
- Duffó G., Farina S.B., Arva E.A., Giordano C.M., Lafont C.J. (2007)**, Sistema integrado de monitoreo de la corrosión del acero en el hormigón armado, in: *Congr. SAM/CONAMET*.
- Elsener B., Andrade C., Gulikers J., Polder R., Raupach M. (2003)**, Hall-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures, *Mater. Struct.* 36, 461–471. doi:10.1007/BF02481526.
- Feliu S., González J.A., Feliu S., Andrade C. (1989)**, Relationship between conductivity of concrete and corrosion of reinforcing bars, *Br. Corros. J.* 24, 195–198. doi:10.1179/000705989798270027.
- Frize M. (2014)**, Health care engineering. Part I, Clinical engineering and technology management, Connecticut, https://books.google.es/books?id=okE3AgAAQBAJ&pg=PA22&lpg=PA22&dq=cremer+sensor+1906&source=bl&ots=Nj9_nVCdkm&sig=7x-wuTWvGMR2MDD7ZmpyaQ8iW2A&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEvjPiZGinKfVAhVH1hoKHUzOBVAQ6AEIKjAA#v=onepage&q=cremer+sensor+1906&f=false (accessed July 26, 2017).
- Froche Technology (2017)**, Probes and measuring equipment for corrosion monitoring of steel reinforcement: ERE 20 reference electrode, Prod. Sheet. (2017). <https://forcetechnology.com/en/infraestructure/transport-sector/probes-and-measuring-equipment-for-corrosion-monitoring-of-steel-reinforcement>
- Galán-Vidal C.A., Muñoz J., Domínguez C., Alegret S. (2000)**, Thick-Film Biosensors, in: *Biosens. Their Appl.*, Springer US, Boston, MA, pp. 299–309. doi:10.1007/978-1-4615-4181-3_17.
- Gan Z.W.; Raupach M., Jin W.L., Lu Z.D. (2010)**, In-situ Monitoring and Early Warning System for Durability of Concrete Structure of Hangzhou Bay Sea-crossing Bridge, *China J. Highw. Transp.* 23, 31–35.
- Gandía-Romero J.M., Batallera R., Monzó P., Campos I., García-Breijoa E., Valcuendeb M.; Soto J. (2016)**, Characterization of embeddable potentiometric thick-film sensors for monitoring chloride penetration in concrete, *Sensors Actuators B Chem.* 222, 407–418.
- Gandía-Romero J.M., Campos I., Valcuende M., García-Breijoa E., Marcos J., Payá M.D., Soto J. (2016a)**, Potentiometric thick-film sensors for measuring the pH of concrete, *Cem. Concr. Compos.* 68 (2016) 66–67.
- Garcés P., Climent Llorca M.A., Zornoza Gómez E. (2008)**, *Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado*, Editorial Club Universitario, San Vicente.
- González J. (2012)**, *Métodos experimentales en Electroquímica*, Cultiva Libros, Madrid.
- González J.A., Miranda J. (2007)**, *Corrosión en las estructuras de hormigón armado fundamentos, medida, diagnosis y prevención*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- González J.A., Miranda J., Feliu S. (2004)**, Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete, *Corros. Sci.* 46, 2467–2485. doi:10.1016/j.corsci.2004.02.003.
- Górriz B.T. (2009)**, Estudio experimental de sensores ópticos tipo FBG para medir deformaciones y temperaturas en estructuras, Universidad Politécnica de Valencia.
- Guangtao D., Xiangdong C., Qibin L., Hui L., Huihui G. (2010)**, MEMS magnetic field sensor based on silicon bridge structure, *J. Semicond.* 31. doi:10.1088/1674-4926/31/10/104011.
- Hart J.P., Wring S.A. (1997)**, Recent developments in the design and application of screen-printed electrochemical sensors for biomedical, environmental and industrial analyses, *Trends Anal. Chem.* 16, 89–103. doi:10.1016/S0165-9936(96)00097-0.
- Harvey D. (2000)**, *Modern analytical chemistry*, McGraw-Hill, International Edition, 2000.
- Hulanicki A., Geab S. Ingman F. (1991)**, Chemical sensors definitions and classification, *Int. Union Pure Appl. Chemistry.* 63, 1247–1250.
- Jeong J.A., Jin C.-K., Kim Y.-H., Chung W.-S. (2013)**, Electrochemical Performance Evaluation of Corrosion Monitoring Sensor for Reinforced Concrete Structures, *J. Adv. Concr. Technol.* 11, 1–6. doi:10.3151/jact.11.1.
- Kissinger P.T., Heineman W.R. (2017)**, *Laboratory techniques in electroanalytical chemistry*, Second, Marcel Dekker, Inc, New York, 1996. <https://www.crcpress.com/Laboratory-Techniques-in-Electroanalytical-Chemistry-Second-Edition-Revised/Kissinger-Heineman/p/book/9780824794453> (accessed July 27, 2017).
- Kobayashi K., Banthia N. (2011)**, Corrosion detection in reinforced concrete using induction heating and infrared thermography, *J. Civ. Struct. Heal. Monit.* 1, 25–35. doi:10.1007/s13349-010-0002-4.
- Koch G., Thompson N., Moghissi O., Gould M., Payer J. (2016)**, *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*, NACE International, Houston.
- Kuang-Tsan K., Yang L. (2010)**, *Corrosion Monitoring of Concrete Reinforcement Bars (Or Other Buried Corrodable Structures) Using Distributed Node Electrodes*, US12859572.
- Kung P. (2014)**, *Fiber optic sensors to monitor reinforced concrete corrosion*, SPIE Newsroom. (2014). doi:10.1117/2.1201404.005448.
- Labrador Montero R.H. (2009)**, *Diseño y caracterización de sensores químicos en estado sólido. Aplicación de modelos teóricos para el estudio de interferencias.*, Universitat Politècnica de València, doi:10.4995/Thesis/102514601.
- Langford P., Broomfield, J. (1987)**, *Monitoring the corrosion of reinforcing steel*, in: *Constr. Repair v1 (2)*, Palladian Publications, pp. 32–6.
- Legin A., Rudnitskaya A., Vlasov Y., Di Natale C., Davide F., D’Amico A. (1997)**, Tasting of beverages using an electronic tongue, *Sensors Actuators B Chem.* 44, 291–296. doi:10.1016/S0925-4005(97)00167-6.
- López F, Rodríguez V, Santa Cruz J, Torreño I, Ubeda de Mingo P. (2004)**, *Manual de patología de la edificación*, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.
- López W., González J.A. (1993)**, Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement, *Cem. Concr. Res.* 23, 368–376. doi:10.1016/0008-8846(93)90102-F.
- Lu S., Ba H.-J., Yang Y.-Z. (2009)**, MnO₂ reference electrode for monitoring corrosion in concrete structures, *J. Wuhan Univ. Technol.* 31, 42–45.



SPANISH VERSION.....

- Lynch J.P., Loh K.J. (2006)**, A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring, *Shock Vib. Dig.* 38. doi:10.1177/0583102406061499.
- Machado A. (1994)**, Review: conductive epoxy-based ion-selective electrodes, *Analyst.* 119 (11), 2263–2274. doi:10.1039/an9941902263.
- Maki A.H., Ozarowski A., Misra A., Urbaneja M.A., Casas-Finet J.R. (2001)**, Phosphorescence and optically detected magnetic resonance of HIV-1 nucleocapsid protein complexes with stem-loop sequences of the genomic Psi-recognition element, *Biochemistry.* 40, 1403–12.
- Martínez I., Andrade C. (2009)**, Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures, *Cem. Concr. Compos.* 31, 545–554. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.05.007.
- Martínez-Máñez R., Soto J., García-Breijo E., Gil L., Ibáñez J., Gadea E. (2005)**, A multisensor in thick-film technology for water quality control, *Sensors Actuators A Phys.* 120, 589–595. doi:10.1016/j.sna.2005.03.006.
- Matthew M., P. Dean P. (2006)**, Unpowered Wireless Corrosion Sensor for Steel Reinforced Concrete, in: *SENSORS, IEEE, Irvine.* doi:10.1109/ICSENS.2005.1597659.
- McCarter W.J., Chrisp T.M., Butler A., Basheer P.A.M. (2001)**, Near-surface sensors for condition monitoring of cover-zone concrete, *Constr. Build. Mater.* 15, 115–124. doi:10.1016/S0950-0618(00)00060-X.
- McCarter W.J., Vennesland Ø. (2004)**, Sensor systems for use in reinforced concrete structures, *Constr. Build. Mater.* 18, 351–358. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.03.008.
- Meola C. (2013)**, Infrared thermography in the architectural field., *Sci. World J.* 8p. doi:10.1155/2013/323948.
- Mihell J.A., Atkinson J.K. (1998)**, Planar thick-film pH electrodes based on ruthenium dioxide hydrate, *Sensors Actuators B Chem.* 48, 505–511. doi:10.1016/S0925-4005(98)00090-2.
- Milano O., Pérez H., Berardo L., Moína C., Fraigi L. (2010)**, Desarrollo y caracterización de electrodos de referencia embebidos de MnO₂ fabricados por tecnología de película gruesa, *Inersensor 2010.* 9.
- Morata A., Garbayo I., Tarancón A., Sabaté M., Fonseca L., Salleras M., Morante J. (2013)**, Descripción Sensor Electroquímico de Estado Sólido y Procedimiento para su Fabricación, 2, 537–587.
- Ou J., Li H. (2010)**, Structural Health Monitoring in mainland China: Review and Future Trends, *Struct. Heal. Monit.* 9.
- Ramón J.E., Gandía-Romero J.M., Valcuende M., Bataller R. (2016)**, Integrated sensor network for monitoring steel corrosion in concrete structures, *Vitr. - Int. J. Archit. Technol. Sustain.* 1, 65p. doi:10.4995/vitruvio-ijats.2016.5191.
- Raupach M. (2006)**, Korrosions-Monitoring an der 36 km langen Hangzhou Bay Bridge in China, *Darmstädter Massivbau-Seminar ; 29 Freunde des Inst. für Massivbau der TU, Darmstadt.*
- Reis R. (2006)**, Evaluation of the VTI ECI-1 corrosion monitoring device, *California Department of Transportation, Sacramento.*
- Richardson M.G. (2002)**, *Fundamentals of durable reinforced concrete*, Spon Press, London.
- Romero J.M.G. (2014)**, Sensores electroquímicos aplicados al estudio de la corrosión en estructuras de hormigón armado, *Universitat Politècnica de València. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura.*
- Sagoe-Crentsil K.K., Glasser F.P. (1989)**, Steel in concrete: Part I A review of the electrochemical and thermodynamic aspects, *Mag. Concr. Res.* 41, 205–212. doi:10.1680/macrc.1989.41.149.205.
- Schiegg P., Dauberschmidt C. (2008)**, *Corrosion monitoring in concrete*, Woodhead P, Elsevier, Cambridge. doi:10.1533/9781845694050.3.388.
- Schiegg Y. (2002)**, Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen, *Selbstverl., Zürich.*
- Sensortec (2006)**, Expansion ring anode, (2006). http://www.sensortec.de/images/pdf/Data_Sheet_Expansion_Ring_Anode_eng.pdf (accessed September 5, 2017).
- Sensortec (2006)**, Multiring electrodes MRE. http://www.sensortec.de/images/pdf/Data_Sheet_Multiring_electrode_eng.pdf (accessed September 5, 2017).
- Sensortec (2006)**, Speizringanode | expansion ring anode.
- Sing, D.V.; Sacha, A.K.; Rawa, A. (2016). *Developments in Corrosion Detection Techniques for Reinforced Concrete Structures*, *Indian J. Sci. Technol.* 9.
- Skoog D.A., West D.M., Holler F.J., Berenguer V. (1997)**, *Fundamentos de química analítica*, Reverté.
- Smalling R., Blankenstein L. (2008)**, Remote monitoring and computer applications, in: *Tech. Corros. Monit.*, pp. 476–498. doi:10.1533/9781845694050.3.476.
- Song I., Fink, K., Payer J.H. (1998)**, Metal Oxide/Metal pH Sensor: Effect of Anions on pH Measurements, *Corrosion.* 54, 13–19. doi:10.5006/1.3284823.
- Song H.W., Saraswathy V. (2007)**, Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures -A Review, *Int. J. Electrochem. Sci.* 2, 1–28.
- Spiesz P., Brouwers H.J.H. (2013)**, Application of the conductivity sensor as a chloride detector in concrete., in: *T.U. in Berlin (Ed.), Proceeding 1st Int. Conf. Chem. Constr. Mater. Mech. Prop. Durab. Sect., Berlin*, pp. 351–354.
- Srinivasan S., Basheer P. A. M., Mao J-H., Jin W-L., McCarter W. J. (2013)**, An Integrated Sensing System for Monitoring the Corrosion Activity in Concrete Blocks Exposed at Hangzhou Bay Bridge. *Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Istanbul, Turkey.*
- Taylor R.F., Schultz J.S. (1996)**, *Handbook of chemical and biological sensors*, Institute of Physics Publishing, Bristol.
- Terol J., Gandía J.M., Soto J., Valcuende M. (2013)**, Monitorización de aniones cloruro en probetas de hormigón mediante sensores serigrafados, in: *VII Int. Work. Sensors Mol. Recognit., Valencia*, pp. 514–527.
- Toko K., Habara M. (2005)**, Taste Sensor, *Chem. Senses.* 30, i256–i257. doi:10.1093/chemse/bjh212.
- Vera G. De, Climent M.A., Antón C., Hidalgo A., Andrade C. (2010)**, Determination of the selectivity coefficient of a chloride ion selective electrode in alkaline media simulating the cement paste pore solution, *J. Electroanal. Chem.* 63, 43–49. doi:10.1016/j.jelechem.2009.11.010.
- Webster, J.G.; Eren, H. (2017)**, *Measurement, instrumentation, and sensors handbook. Spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement*, 2nd ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Wit Inken De (2017)**, When time ravages from within, *ETH News.* doi:10.1126/sciadv.1700751.
- Worden K., Bullough W.A., Haywood J. (2003)**, *Smart Technologies*, WORLD SCIENTIFIC, Singapore. doi:10.1142/4832.
- Yoo J.H., Park Z.-T., Kim J.-G., Chung L. (2003)**, Development of a galvanic sensor system for detecting the corrosion damage of the steel embedded in concrete structures: Part 1. Laboratory tests to correlate galvanic current with actual damage, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 2057–2062. doi:10.1016/S0008-8846(03)00226-6.
- Yu H.; Caseres L. (2011)**, An embedded multi-parameter corrosion sensor for reinforced concrete structures, *Mater. Corros.* 63, n/a-n/a.



doi:10.1002/maco.201106113.

- Yun Y.W., Wang X.W., Jang I.Y., Kim S.S. (2010)**, Application of Fiber Bragg Grating Sensor to Monitor Early Age Deformation of High Performance Concrete, *Key Eng. Mater.* 450, 478–481. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.450.478.
- Zaki A., Chai H.; Aggelis D., Alver N. (2015)**, Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique, *Sensors*. 15, 19069–19101. doi:10.3390/s150819069.
- Zemlock M., Taskar I., Shareef A. (2014)**, Corrosion sensor retainer assembly apparatus and method for detecting corrosion, US20160076989A1, 2014.
- Zoski C.G. (2007)**, *Handbook of Electrochemistry*, Elsevier, Amsterdam.

