

## Sensores para el monitoreo de corrosión en hormigón armado: desarrollo y aplicabilidad

E. D. Gomez<sup>a\*</sup>, J. I. Carricondo<sup>a</sup>, J. E. Torres Ramirez<sup>b</sup>, D. R. Vazquez<sup>a</sup>, S. B. Farina<sup>a,b</sup> y G. S. Duffó<sup>a,b</sup>

<sup>a\*</sup>Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Departamento de corrosión, Centro Atómico Constituyentes - Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM), CP 1650, Gral. San Martín, Buenos Aires, Argentina. [enzogomez@cnea.gov.ar](mailto:enzogomez@cnea.gov.ar), [juancarricondo@cnea.gov.ar](mailto:juancarricondo@cnea.gov.ar), [dvazquez@cnea.gov.ar](mailto:dvazquez@cnea.gov.ar), [farina@cnea.gov.ar](mailto:farina@cnea.gov.ar), [duffo@cnea.gov.ar](mailto:duffo@cnea.gov.ar)

<sup>b</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), CP 1425, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. [jtorram@gmail.com](mailto:jtorram@gmail.com)

Recibido: 16 de septiembre de 2021

Aceptado: 12 de noviembre de 2021

### RESUMEN

El Departamento de Corrosión de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) mantiene un programa de desarrollo de sensores para el monitoreo de la corrosión en estructuras de hormigón armado. En el marco del Programa Nacional de Gestión de Residuos Radioactivos (PNGRR), se desarrolla instrumentación que permite monitorear el avance de la corrosión en elementos estructurales de hormigón armado de alta durabilidad (> 300 años), a la vez que colabora con la prueba de desempeño ante la corrosión de hormigones estructurales especiales. En la actualidad, el grupo de corrosión en hormigón armado mantiene programas de monitoreo de estructuras civiles, asociadas a la industria energética nuclear y no nuclear, utilizando sensores desarrollados íntegramente por el grupo. En este documento se presenta la descripción de los sensores desarrollados a la actualidad, su funcionamiento y su aplicabilidad como instrumento de monitoreo e investigación. A su vez, se hace referencia al desarrollo de nueva tecnología para la actualización de los sensores.

**PALABRAS CLAVE:** Hormigón armado, corrosión en armaduras, monitoreo, sensores, desarrollo

### ABSTRACT

The Corrosion Department of the National Atomic Energy Commission (CNEA) has a sensor development program for monitoring corrosion in reinforced concrete structures. In the context of the National Radioactive Waste Management Program (PNGRR), instrumentation is developed to monitor the progress of corrosion in high durability reinforced concrete structural elements (> 300 years), while collaborating with performance tests against corrosion of special structural concretes. At present, the reinforced concrete corrosion group has monitoring programs for civil structures, associated with the nuclear and non-nuclear energy industry, using sensors developed entirely by the group. This document presents the description of the sensors currently developed, their operation and their applicability as a monitoring and research instrument. In turn, reference is made to the development of new technology for updating sensors.

**KEYWORDS:** Reinforced concrete, reinforcement corrosion, monitoring, sensors, development

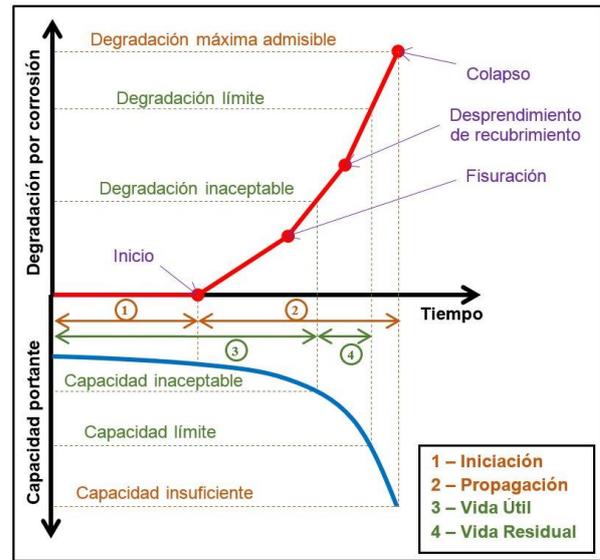
Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Gomez, E. D., Carricondo, J. I., Torres Ramirez, J. E., Vazquez, D. R., Farina, S. B., y Duffó, G. S. (2022). Sensores para el monitoreo de corrosión en hormigón armado: desarrollo y aplicabilidad. *Revista Hormigón*, 61, 24–33. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/cbr98vfvz>

## 1. El proceso de corrosión y la necesidad de su monitoreo

La corrosión de armaduras es el principal proceso de deterioro que afecta a las estructuras de hormigón armado. Como consecuencia de la corrosión, el acero de refuerzo pierde sección resistente y la adherencia acero-hormigón se ve comprometida [1-3]. A su vez, el recubrimiento de hormigón se fisura y eventualmente puede desprenderse como consecuencia de la acumulación de productos de corrosión [4]. Todo esto actúa en detrimento del funcionamiento y desempeño estructural de elementos de hormigón armado. Sin embargo, la corrosión no es un proceso que se inicia de manera instantánea. En hormigones que no están fisurados, el proceso de corrosión puede tardar décadas en iniciarse. Esto se debe a que, inicialmente, el acero se encuentra protegido de la corrosión por una capa de óxido superficial, denominada “capa pasiva”, formada por el pH alcalino ( $\text{pH} \gg 12$ ) de la pasta de cemento. La contaminación del hormigón con agentes agresivos, que generen cambios en el pH o desestabilicen químicamente a la capa pasiva, puede iniciar el proceso de corrosión. Es así que pueden pasar décadas antes de que dichos agentes ingresen en el hormigón y alcancen las armaduras, siendo las condiciones ambientales y la concentración de agentes agresivos en el ambiente exterior los factores más importantes en el tiempo de contaminación [1-3].

En este sentido, se pueden reconocer dos etapas en el proceso de corrosión (Fig. 1): un primer periodo de tiempo denominado “etapa de iniciación”; en la cual las armaduras no se corroen y representa el tiempo que les lleva a los agentes agresivos ingresar gradualmente en el hormigón hasta alcanzar las armaduras; y un segundo periodo de tiempo denominado “etapa de propagación”; en la cual el proceso de corrosión se desarrolla activamente. El límite entre estas dos etapas, cuando los agentes agresivos alcanzan las armaduras y destruyen la capa pasiva, es el punto inicial del proceso de corrosión [3]. Reconocer el inicio de la corrosión es fundamental para



**Figura 1.** Modelo de vida para una estructura degradada por corrosión generalizada.

establecer el fin de la vida de servicio de una estructura de hormigón armado, y para poder lograr esto, es necesario el monitoreo periódico de la estructura.

La vida útil de una estructura es el periodo de tiempo en el cual dicha estructura conserva los requisitos de proyecto asociados a la seguridad, funcionalidad y estética [5]. La relación entre el fin de la vida útil, o comienzo de vida residual, y el inicio del proceso de deterioro es importante en estructuras afectadas por la corrosión. Sin embargo, monitorear una estructura no solo implica reconocer el inicio de la corrosión en las armaduras, también es importante medir la velocidad con la cual se va degradando el acero y el impacto de su degradación en el funcionamiento integral estructural, ya que ambos factores permiten establecer el fin de la vida de servicio de una estructura. Además, el monitoreo de la velocidad de la corrosión permite diseñar estrategias de intervención, reparación y mantenimiento para la gestión de la vida residual.

Teniendo en cuenta la necesidad de establecer tanto el inicio como la velocidad del proceso de corrosión como estrategia de monitoreo, se pueden reconocer dos tipos de instrumentales: instrumental que permite determinar, o estimar de manera precisa, el inicio de la corrosión en las estructuras; e

instrumental que permite cuantificar la velocidad del deterioro del acero mediante mediciones directas sobre las armaduras [6]. La utilización de cada tipo de instrumental dependerá del tipo de estructura que se monitorea y del modelo de vida útil adoptado para dicha estructura.

En estructuras afectadas por corrosión localizada debido al ingreso de cloruros, el inicio de la corrosión suele considerarse el fin de la vida útil de dicha estructura [5]. Esto se debe a la irregularidad y aleatoriedad del mecanismo de corrosión que se manifiesta a través de picaduras que generan pérdidas de sección en puntos localizados. La velocidad de deterioro en dichas picaduras es mayor con respecto al resto de la superficie de la armadura. En estos casos, los instrumentos de medición pueden establecer el inicio y reconocer las zonas donde se forman las picaduras, sin embargo, la medición de la velocidad de corrosión no es precisa y se torna difícil conocer la profundidad de la picadura, es decir la pérdida de sección puntual, sin exponer las armaduras y visualizar el deterioro real. En estos casos la determinación del inicio es muy importante, mientras que el monitoreo de la velocidad de corrosión debe ser corregido, al no ser preciso, utilizando criterios empíricos [5,7] para poder ser utilizado como un indicador del avance del proceso que permita establecer estrategias de intervención y mantenimiento. En estructuras de alto riesgo y complejidad de intervención, el inicio de la corrosión puede ser considerado el fin de la vida de servicio de dicha estructura.

Por otro lado, en estructuras afectadas por corrosión generalizada debido a la pérdida de pH por carbonatación del hormigón, el inicio de la corrosión no determina el fin de la vida de útil de una estructura [5]. Se suelen utilizar otros indicadores, para establecer el fin de la vida útil, como la aparición de fisuras, manchas de óxido o desprendimientos en el recubrimiento. En este caso la pérdida de sección es relativamente homogénea en toda la superficie afectada y los instrumentos permiten establecer el inicio y el avance de la corrosión de manera precisa. Es posible

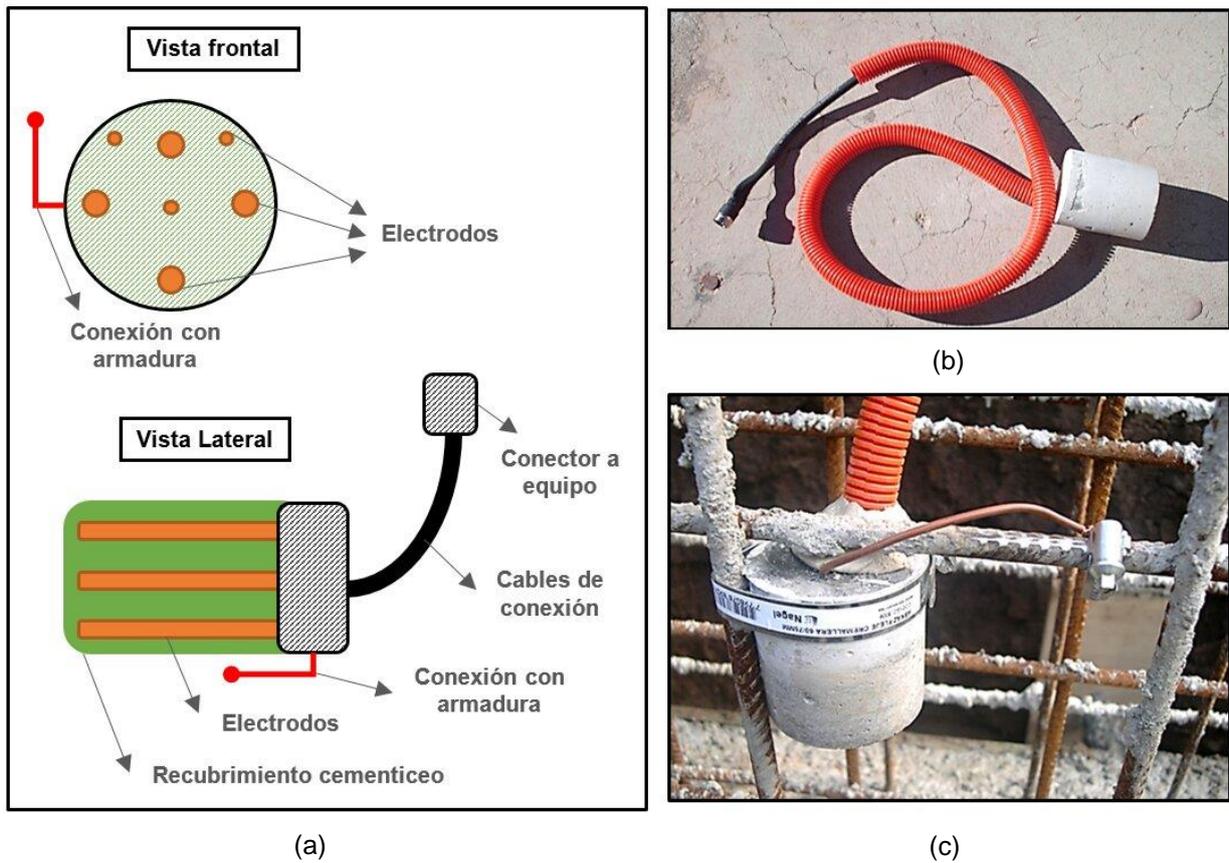
entonces gestionar la vida residual de una estructura con menos riesgo siempre que haya monitoreo y verificación estructural regular.

## **2. Sensor de corrosión – Descripción general**

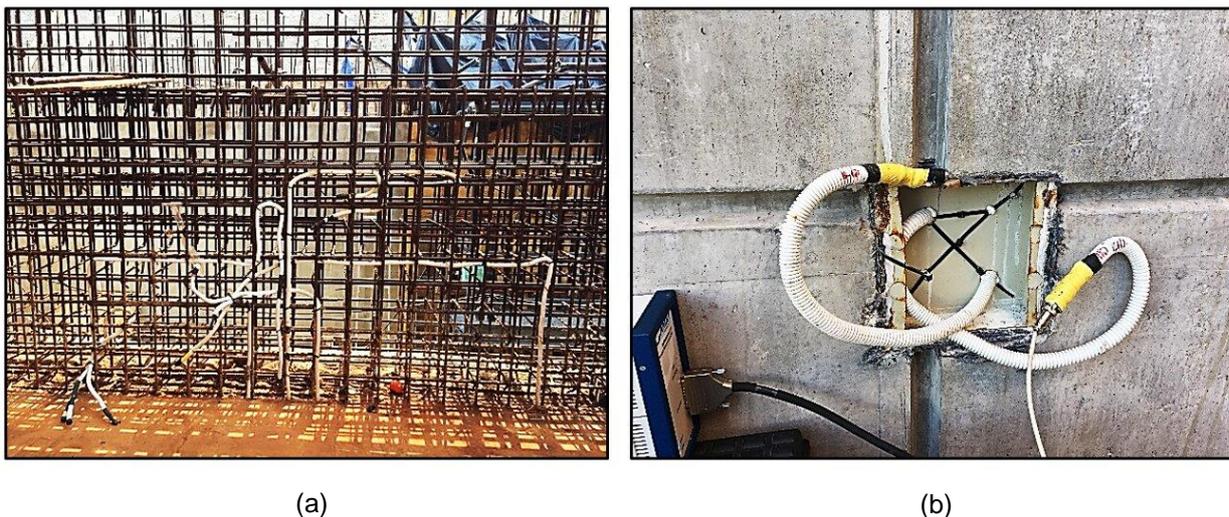
Ante la necesidad de monitorear el inicio de la corrosión en estructuras de interés nuclear, la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), desarrolla sensores de corrosión para incorporarlos en las estructuras, previo al colado del hormigón, monitorear el ingreso de agentes agresivos al material cementiceo y registrar la activación del proceso de corrosión.

Los sensores son dispositivos que constan de un conjunto de electrodos y conexiones (Fig. 2a) que son utilizados para ejecutar ensayos electroquímicos que permiten registrar parámetros asociados al proceso de corrosión y a las condiciones de exposición que tienen las armaduras dentro del hormigón [8]. La composición y la disposición de los electrodos dentro del sensor fueron estudiadas y diseñadas por la CNEA, y pueden ser adaptadas para su uso en diferentes elementos estructurales. La disposición de los electrodos permite ejecutar ensayos para registrar los diferentes parámetros electroquímicos de interés. Cada electrodo contiene una conexión individual que emerge desde el dispositivo y queda expuesta al exterior de las estructuras posterior al colado del hormigón (Fig. 2b y 3a). Además, el dispositivo dispone de una conexión directa a las armaduras que emerge en conjunto con las conexiones a los electrodos del sensor (Fig. 2c). Estas conexiones serán las que permitan registrar desde el exterior de la estructura los parámetros requeridos (Fig. 3b).

Las técnicas electroquímicas, que se utilizan para registrar los parámetros de interés, son ejecutadas utilizando equipos potenciostato-galvanostatos con la sensibilidad suficiente para registrar señales a partir de los electrodos testigos. Cada técnica



**Figura 2.** Sensor de corrosión. (a) Esquema general del sensor. (b) Sensor previo a la instalación. (c) Sensor instalado.



**Figura 3.** Conexiones emergentes de sensores. (a) Conexiones previas al colado del hormigón. (b) Conexiones en disposición final mientras se realiza una medición.

electroquímica ejecutada requiere una configuración de conexiones particular, entre el equipo de medición y los electrodos

testigos, la cual se materializa a través de adaptadores de conexión. Los valores de ejecución de las técnicas electroquímicas, la

configuración de las conexiones y el diseño de los adaptadores también fueron estudiados por la CNEA, en conjunto con la configuración y composición de los electrodos, como parte de programas de desarrollo de sensores para el monitoreo.

Los sensores se ubican en el interior de las estructuras, en sectores considerados de interés, previo al colado del hormigón. Los sensores se adhieren a las armaduras de las estructuras procurando que la barra testigo principal tenga un recubrimiento similar al del acero estructural (Fig. 2c). Posterior al colado del hormigón, los sensores quedan embebidos y solo emergen sus conexiones (Fig. 3).

El registro de los parámetros se realiza de manera manual, midiendo con la periodicidad que el operador establezca, mientras el sensor se mantenga operativo. La ejecución de las técnicas electroquímicas requiere de equipos especiales y operadores entrenados que ejecuten correctamente la configuración de los electrodos y los ensayos. Una mala ejecución, por errores en la configuración de los electrodos o la definición de los parámetros de ensayo por ejemplo, puede alterar las condiciones electroquímicas de los electrodos y cancelar la posibilidad de ejecutar mediciones de manera temporal o permanente.

### 3. Registro de proceso de corrosión utilizando el sensor

El electrodo testigo principal, que utiliza el sensor, es una barra de acero al carbono igual al de las armaduras que contiene la estructura. Sobre dicho electrodo principal, y las armaduras, se registran los parámetros electroquímicos asociados al avance de la corrosión. Por otro lado, el sensor cuenta con electrodos secundarios, fabricados con diferentes aleaciones metálicas, que permiten monitorear parámetros electroquímicos asociados a la matriz cementicia y a la presencia de agentes agresivos. Los electrodos secundarios también se utilizan como electrodos auxiliares para ejecutar ensayos electroquímicos sobre el electrodo principal.

El sensor tiene la capacidad de registrar diferentes parámetros electroquímicos (Tabla 1) [8]. Por un lado, utilizando el electrodo principal y la conexión a las armaduras, se pueden registrar tres parámetros asociados al avance de la corrosión: el potencial de corrosión ( $E_{CORR,A}$ ) en la armadura, el potencial de corrosión ( $E_{CORR,S}$ ) en la barra testigo y la corriente de corrosión ( $I_{CORR}$ ) en la barra testigo. Por otro lado utilizando los electrodos secundarios se pueden registrar parámetros asociados a las condiciones ambientales en la matriz

**Tabla 1.** Parámetros electroquímicos que pueden ser medidos con el sensor y su interpretación.

Parámetros electroquímicos	Interpretación
Potencial de corrosión ( $E_{CORR}$ )	Indica cambios en el metal por efecto ambiental.
Corriente de corrosión ( $I_{CORR}$ )	Indica la velocidad de avance del proceso de corrosión.
Resistencia eléctrica de la matriz cementicia ( $R_M$ )	Indica la capacidad de transporte iónico que tiene la matriz cementicia.
Corriente de oxígeno ( $I_{O_2}$ )	Indica la disponibilidad de oxígeno para la reacción catódica en la superficie del metal.
Resistencia térmica de la matriz cementicia ( $R_{Temp}$ )	Indica la temperatura que tiene la matriz cementicia.
Potencial de cloruros ( $E_{Cl}$ )	Indica cambios en la concentración de iones cloruros en la matriz cementicia.
Potencial de pH ( $E_{pH}$ )	Indica cambios en el pH de la matriz cementicia.

cementicea: la resistividad de la matriz ( $\rho_M$ ), la corriente límite de oxígeno en la matriz ( $I_{O_2}$ ), la resistencia asociada a la temperatura ( $R_{TEMP}$ ), el potencial asociado a cloruros ( $E_{Cl}$ ) y el potencial asociado al pH ( $E_{pH}$ ).

Tanto la corriente de corrosión, indicadora de la velocidad de deterioro, como el potencial de corrosión, en la barra testigo y las armaduras, son los parámetros que permiten establecer de manera precisa el inicio de la corrosión en las armaduras. Además, la medición de los parámetros electroquímicos asociados a la matriz cementicea complementa el análisis, permitiendo entender cuáles son las condiciones ambientales a las que están expuestos tanto el electrodo testigo principal, como las armaduras estructurales [7,9].

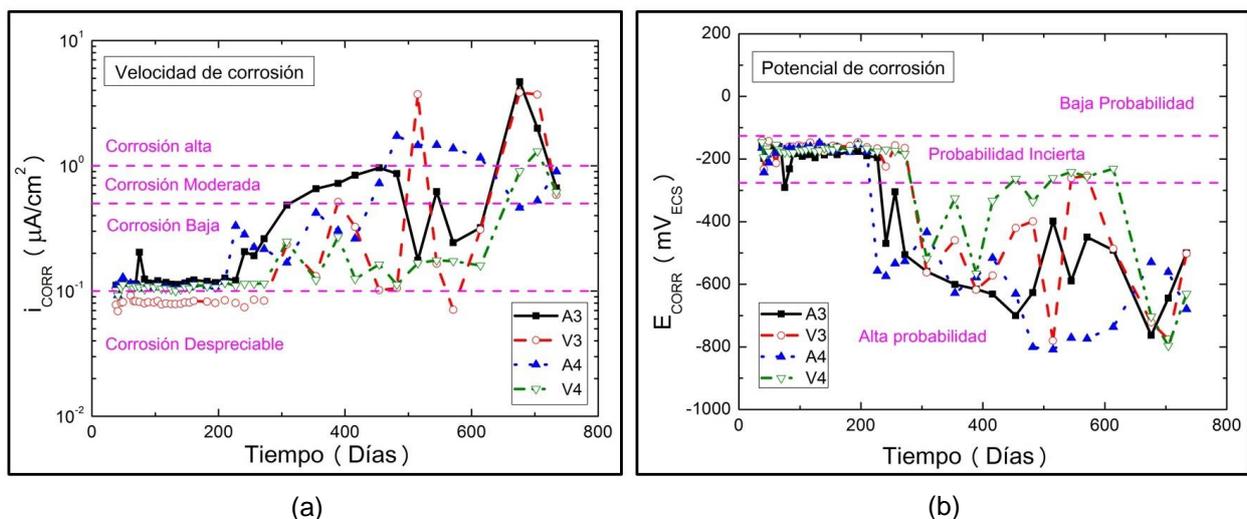
El inicio de la corrosión en las armaduras puede detectarse, de manera directa, a través del registro de cambios en el potencial de las armaduras ( $E_{CORR,A}$ ) [10,11]. Esta información puede ser confirmada a través de cambios en los registros del potencial de corrosión ( $E_{CORR,S}$ ) y la corriente de corrosión ( $I_{CORR}$ ) en el electrodo testigo del sensor [12] (Fig. 4). A partir del inicio de la corrosión, el avance del deterioro en la barra testigo, registrado a través de  $I_{CORR}$ , puede representarse en términos de velocidad de corrosión ( $V_{CORR}$ )

para determinar el deterioro total sobre la barra, es decir la pérdida de sección resistente del acero ( $P_x$ ) (Fig. 5) [7,9]. Como complemento, la medición de los parámetros de la matriz siguen siendo indicadores directos de las condiciones ambientales a las que están expuestas las armaduras, lo cual permite establecer el grado de vulnerabilidad que dichas armaduras tienen posterior al inicio de la corrosión.

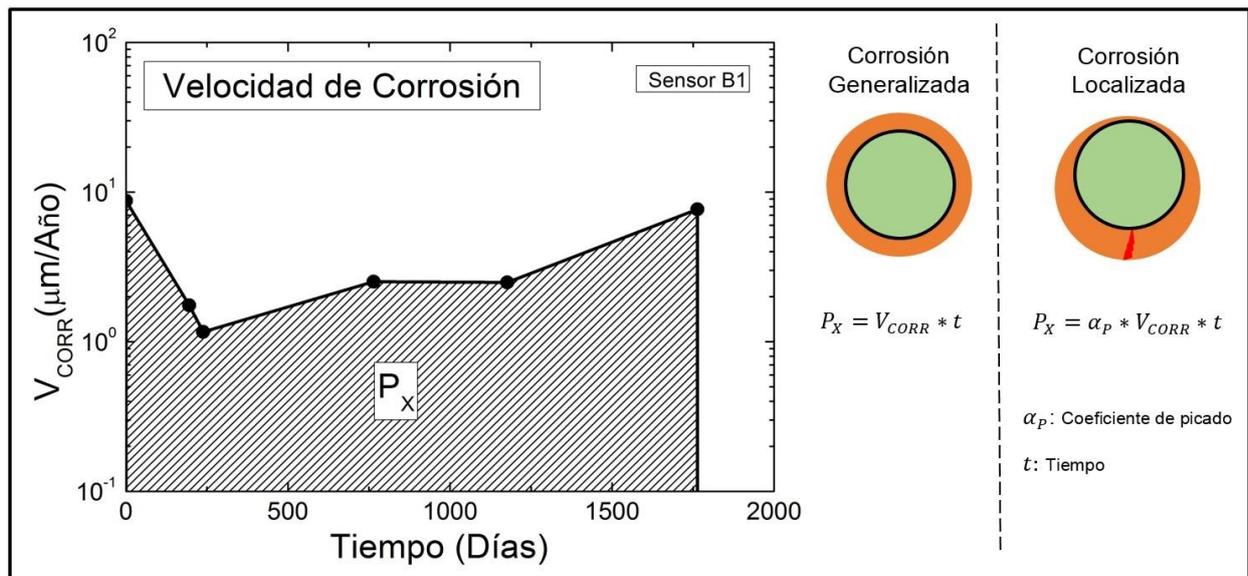
De esta manera, el sensor se considera un instrumento que permite:

- Establecer de manera precisa el inicio de la corrosión en las armaduras cercanas a la posición del sensor.
- Estimar de manera indirecta el avance del deterioro, posterior al inicio de la corrosión, utilizando el electrodo testigo principal.
- Conocer las condiciones de vulnerabilidad de las armaduras, en todo momento, a través del registro de las condiciones ambientales en la matriz cementicea.

Existen diferentes recomendaciones sobre metodologías que establecen categorías de vulnerabilidad y velocidad de deterioro a partir de la interpretación de los parámetros electroquímicos medidos [5,7,9,11,12]. No se profundiza en cada una de estas metodologías en este texto. Sin embargo, es



**Figura 4.** Detección del inicio de la corrosión. (a) Inicio de la corrosión detectado a través de la medición de  $E_{CORR}$  utilizando un electrodo de calomel saturado (ECS) como referencia. (b) Inicio de la corrosión detectado a través de la medición de  $I_{CORR}$ .



**Figura 5.** Estimación del deterioro del acero a partir de mediciones de corriente de corrosión ( $I_{CORR}$ ) expresadas en términos de velocidad de corrosión ( $V_{CORR}$ ).

necesario remarcar que no es recomendable adoptar metodologías estándar sin hacer una correcta interpretación de sus condiciones de aplicación. En estructuras especiales, como las usadas en aplicaciones nucleares, las metodologías de análisis deben ser particularizadas, siendo importante definir previamente la vida de servicio de la estructura, las características de los materiales utilizados, el funcionamiento mecánico-estructural y la agresividad del ambiente. Todos estos aspectos mencionados pueden modificar las condiciones de monitoreo y la interpretación de los parámetros registrados.

#### 4. Posibilidades de utilización del sensor

La utilización del sensor permite, a los operadores de estructuras de hormigón armado, establecer el inicio de la corrosión en las armaduras y estimar el avance del deterioro durante la etapa de propagación. Su utilización también permite el seguimiento continuo del efecto de las condiciones ambientales sobre el material. Con esta información se pueden diseñar estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo, establecer planes de gestión de envejecimiento e inclusive establecer criterios

para extensiones de vida que permitan garantizar la operación segura de elementos que puedan ser considerados de alto riesgo o de gran importancia para el desarrollo de una actividad.

El monitoreo del inicio y avance de la corrosión en estructuras de hormigón armado es la función principal del sensor, sin embargo, su capacidad de caracterizar las condiciones ambientales hace que también pueda ser utilizado como un instrumento indicador de agresividad ambiental y desempeño de material cementiceo como protección contra la corrosión (Fig. 6).

En contacto con suelos, rocas y aguas subterráneas, el sensor puede utilizarse como indicador de agresividad ambiental, monitoreando el efecto ambiental sobre la corrosión del electrodo testigo principal. De esta forma es utilizado en galerías de filtración de presas de hormigón, galerías en macizos rocosos y anclajes sumergidos, en diferentes centrales hidroeléctricas del país [13].

Así mismo, el sensor puede ser colocado en el interior de elementos elaborados con compuestos cementiceos especiales y registrar su desempeño, como protección de armaduras, al ser expuestos a condiciones

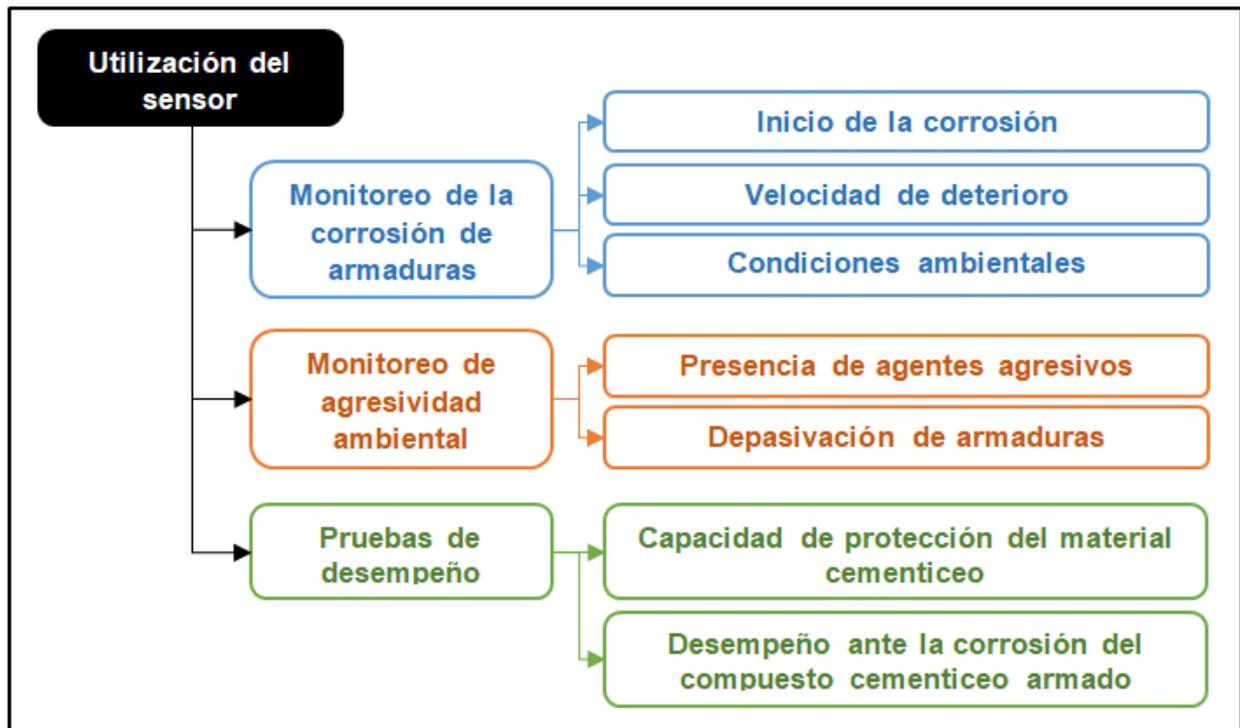


Figura 6. Posibilidades de utilización del sensor.

ambientales agresivas. De esta manera se utilizó en programas experimentales de desarrollo de compuestos cementicios de alta durabilidad en la CNEA [14].

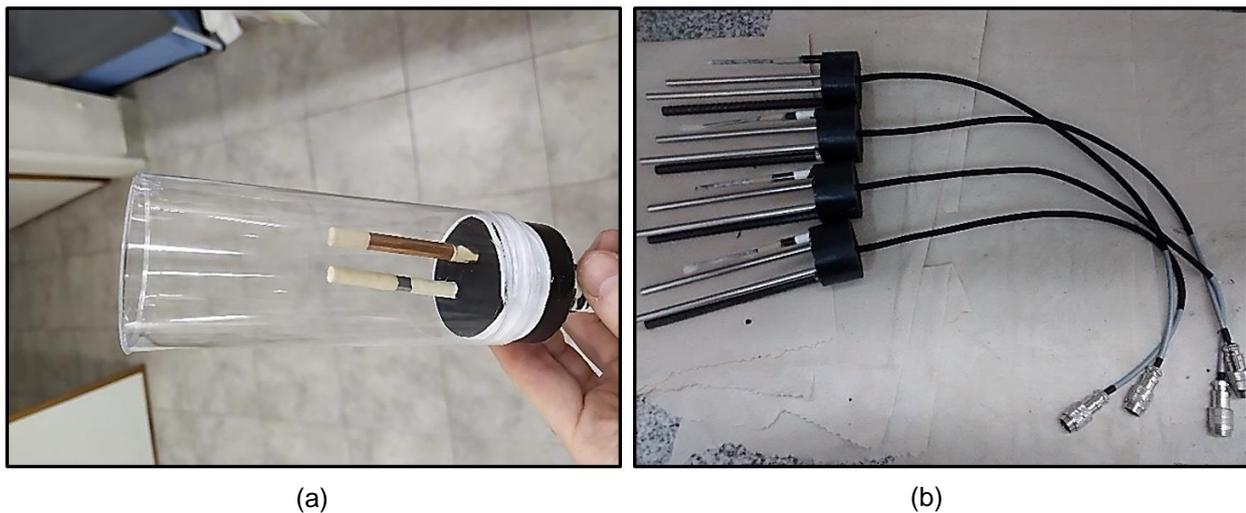
## 5. Continuidad en el desarrollo de sensores

Los sensores pueden ser utilizados de manera directa sobre diferentes tipos de elementos de hormigón armado convencional. Originalmente fueron diseñados para ser incorporados en elementos de gran espesor (> 0,5 m de espesor), sin embargo, mediante adaptaciones mínimas (Fig. 7), se pueden incorporar a elementos de menores dimensiones y decidir qué parámetros de la matriz cementicea se quiere monitorear.

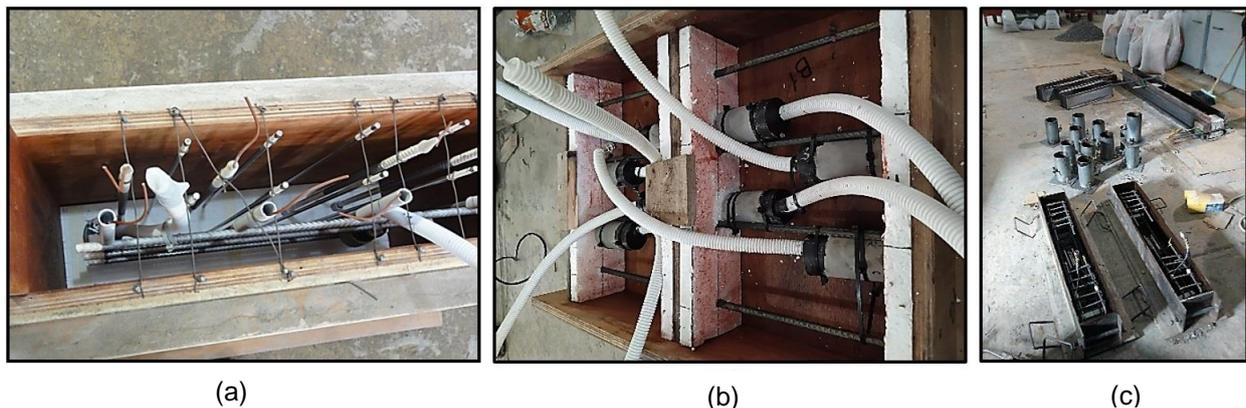
Sin embargo, los escenarios de deterioro pueden ser muy diversos, al combinar tipos de elementos estructurales y condiciones ambientales de exposición, siendo necesario desarrollar tecnologías que permitan a los sensores ser adaptables.

En este sentido, actualmente se trabaja en diferentes opciones de adecuación del sensor que permitan obtener registros precisos en relación al avance del proceso de degradación y la agresividad ambiental. Los principales programas en marcha (Fig. 8) trabajan en desarrollos que permitan a los sensores:

- Establecer el inicio de la corrosión utilizando nuevas técnicas y principios electroquímicos, según el grado de precisión que se requiera [15].
- Incorporar electrodos testigos tensionados que puedan ser utilizados para el monitoreo de elementos pretensados.
- Registrar de manera precisa parámetros electroquímicos en compuestos cementicios no convencionales, como hormigones reforzados con fibras [16] o matrices de alta resistividad [17].



**Figura 7.** Adaptaciones de sensores. (a) Adaptación para ejecutar nuevas técnicas electroquímicas. (b) Adaptación para utilización en hormigones especiales.



**Figura 8.** Utilización de sensores en programas experimentales. (a) Pruebas de contraste con otros equipos. (b) Pruebas para la utilización de nuevas técnicas electroquímicas. (c) Pruebas en hormigones especiales.

## 6. Conclusiones

Los sensores electroquímicos desarrollados permiten:

- Monitorear el proceso de corrosión a través del registro del inicio de la corrosión, en las armaduras, y el avance del deterioro, sobre una barra testigo, durante la etapa de propagación.
- Monitorear la agresividad ambiental a través de la detección de la presencia de agentes agresivos y de cambios electroquímicos en la barra testigo debido a variaciones de las condiciones ambientales.

- Ser adaptados para su utilización en matrices cementicias especiales.
- Monitorear el desempeño, como protección de las armaduras contra la corrosión, de matrices cementicias no convencionales.

## Referencias

- [1] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., y Polder R. B. (2013). *Corrosion of steel in concrete - Prevention, diagnosis, repair*. Wiley-VCH.
- [2] Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair*. Taylor & Francis.

- [3] Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Institute.
- [4] Andrade, C., Alonso, C., y Molina, F. J. (1993). Cover cracking as a function of bar corrosion. Part I - Experimental test. *Materials and Structures*, 26, 453–464. <https://doi.org/10.1007/BF02472805>
- [5] Rincón, O. T., Carruyo, A. R., Andrade, C., Helene P. R. L., y Díaz, I. (Eds.). (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED.
- [6] Gomez, E. D. (2017). *Efecto de la resistividad de la matriz y el contenido de oxígeno en la corrosión de estructuras de hormigón armado*. [Disertación de Maestría, Instituto de tecnología Prof. Jorge Sábato]. Repositorio IS/T 179/17. <https://www.cnea.gob.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=29790>
- [7] Andrade, C., y Alonso, C. (2005). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37, 623–643. <https://doi.org/b2skhq>
- [8] Duffó, G. S., y Farina, S. B. (2009). Development of an embeddable sensor to monitor the corrosion process of new and existing reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2746–2751. <https://doi.org/c5vvk5>
- [9] Andrade, C., y Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, 10(5), 315–328. <https://doi.org/fqd7fw>
- [10] Li, L., y Sagüés, A. A. (2001). Chloride corrosion threshold of reinforcing steel in alkaline solutions—open-circuit immersion tests. *Corrosion*, 57(1), 19–28. <https://doi.org/10.5006/1.3290325>
- [11] American Society for Testing and Materials. (2001). *ASTM C876. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*.
- [12] Vennesland, Ø., Raupach, M., y Andrade, C. (2007). Recommendation of RILEM TC154 – EMC: Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete – Measurements with embedded probes. *Materials and Structures*, 40, 745–758. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9219-4>
- [13] Burkart, A. L., Duffó, G. S., y Castro P. (2014). Corrosion monitoring of post-tensioned strands at the Piedra de Aguila spillway. *The International Journal on Hydropower & Dams*, 21(6), 64–70.
- [14] Duffó, G. S., Arva, E. A., Schulz, F. M., y Vazquez, D. R. (2012). Durability of a reinforced concrete designed for the construction of an intermediate-level radioactive waste disposal facility. *Journal of Nuclear Materials*, 420(1–3), 382–387. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.10.044>
- [15] Torres Ramirez, J. E., Duffó, G. S., y Farina, S. B. (2019). Feasibility of the use of galvanic couples to develop corrosion sensors for reinforced concrete structures. *Corrosion*, 75(8), 990–998. <https://doi.org/10.5006/2992>
- [16] Gomez, E. D., Zerbino, R., y Duffó G. S. (2020). Corrosión en armaduras de elementos de hormigón reforzado con fibras en estado fisurado. En M. C. Torrijos, y C. Zega (Eds.), *IX Congreso Internacional - 23ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón* (pp. 397-404). AATH.
- [17] Vazquez, D. R., Villagrán Zaccardi, Y. A., Zega, C. J., Sosa, M. E., y Duffó, G. S. (2015). Implementation of different techniques for monitoring the corrosion of rebars embedded in concretes made with ordinary and puzzolanic cements. *Procedia Materials Science*, 8, 73–81. <https://doi.org/g5pv>