

Acero inoxidable corrugado en hormigón expuesto a ambiente marino

Victoria Matres Serrano, Tamara Córdoba Jiménez, Javier Sánchez Montero, Julio Torres Martín y Nuria Rebolledo Ramos

Recibido: 22 de enero de 2022 / Revisado: 16 de febrero de 2022 / Aceptado: 17 de febrero de 2022 / Publicado: 7 de abril de 2022

RESUMEN

Uno de los principales problemas que reduce la vida útil de las estructuras de hormigón armado, sobre todo las expuestas en un ambiente marino, es la corrosión de las armaduras. Una de las alternativas para evitar la corrosión es el uso de armaduras de acero inoxidable.

En este trabajo se muestra a lo largo de 8 años, el comportamiento de armaduras fabricadas con diferentes grados de aceros inoxidables. El objetivo es la búsqueda de tecnologías alternativas innovadoras y sostenibles para la construcción, por lo que se han realizado ensayos sobre componentes expuestos directamente en un ambiente marino real. En este sentido, se evalúa el comportamiento del refuerzo de acero inoxidable en hormigón, realizando medidas in-situ del potencial y de la velocidad de corrosión.

En este trabajo de investigación, realizado en el área de corrosión de las instalaciones que Acerinox Europa tiene en Palmones (Cádiz), junto con el equipo del centro de investigación Eduardo Torroja de Madrid, se han realizado ensayos de campo donde las probetas han estado instaladas en una playa de Huelva. Gracias a la evaluación a largo plazo, se obtiene información del comportamiento real de los inoxidables, consiguiéndose datos fiables que permiten obtener una visión más precisa para la selección de materiales en entornos marinos.

Palabras clave: Acero inoxidable, corrugado, hormigón

ABSTRACT

One of the main problems that reduces the useful life of reinforced concrete structures, especially those exposed to a marine environment, is the corrosion of the reinforcement. One of the alternatives to avoid corrosion is the use of stainless steel reinforcement.

In this work, the behaviour of rebars manufactured with different grades of stainless steels is shown over 8 years. The objective is the search for innovative and sustainable alternative technologies for construction, so tests have been carried out on components directly exposed to a real marine environment. In this sense, the behaviour of stainless steel reinforcement in concrete is evaluated, carrying out in-situ measurements of the corrosion potential and corrosion rate.

In this research work, carried out in the corrosion area of the facilities that Acerinox Europa has in Palmones (Cádiz), together with the team from the Eduardo Torroja research centre in Madrid, field tests were conducted where the samples were installed on a beach in Huelva. Thanks to the long term evaluation, information of the real behaviour of the stainless steel is obtained, obtaining reliable data that allow to obtain a more precise approach for the selection of materials in marine environments.

Keywords: stainless steel, corrugated, concrete

1. INTRODUCCIÓN

El deterioro de las estructuras de hormigón reforzado, a causa de la corrosión del refuerzo de acero, se ha convertido en un problema a nivel global, viéndose comprometida su durabilidad a largo plazo, especialmente en ambientes agresivos.

La durabilidad de una estructura de hormigón hace referencia, tal y como indica el Código

Estructural, a su capacidad para soportar durante su vida útil, las condiciones ambientales y de trabajo a las que se encuentre sometida. Es por ello por lo que, a la hora de diseñar una determinada estructura, debe establecerse una estrategia tal que considere los diferentes mecanismos posibles de degradación, así como las posibles medidas específicas a adoptar en cada fase del diseño y uso de la estructura.

Es posible establecer modelos de durabilidad para los procesos de corrosión a partir de ensayos acelerados de laboratorio, diseñados para armaduras de acero al carbono. El cálculo del tiempo total para que la degradación sea significativa, es decir, el cálculo de la vida útil, tiene en cuenta tanto el período de iniciación de la corrosión como el período de propagación. Se entiende como período de iniciación el tiempo que tarda el frente de penetración del agresivo en alcanzar la armadura, provocando el inicio de la corrosión. El período de propagación se corresponde con el tiempo que transcurre hasta que se produce una degradación significativa del elemento estructural. Los ensayos de laboratorio, que pueden realizarse a partir de técnicas electroquímicas, rara vez pueden extrapolarse a condiciones reales, donde existen otros factores difícilmente reproducibles a escala de laboratorio, como son la aparición de fisuras, cambios en el clima o la complejidad del propio hormigón.

En general, la disolución presente en los poros del hormigón presenta una alta alcalinidad, que favorece la formación de una capa pasiva, protectora del acero. No obstante, determinados agentes agresivos, como el CO₂ y los cloruros, pueden acceder hasta la armadura de acero, penetrando a través del hormigón, provocando la ruptura de la capa pasiva y generando una situación de desprotección del acero frente a la corrosión.

El ambiente marino es un claro ejemplo de medio altamente agresivo, donde la alta concentración de cloruros presentes alcanza la armadura de acero, a través de los poros del hormigón.

Debido a lo anterior, se requiere la búsqueda de alternativas que garanticen una mayor durabilidad de las estructuras de hormigón, siendo una de ellas el reemplazo de las armaduras de acero al carbono por acero inoxidable.

Aunque existen ensayos de laboratorio que demuestran el buen comportamiento del acero inoxidable, no existen suficientes estudios de campo que permitan conocer el comportamiento del inoxidable como material de refuerzo en estructuras de hormigón expuestas a condiciones reales. Como la extrapolación de los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio a condiciones reales puede diferir del verdadero comportamiento de la estructura, se hace necesaria la realización de estudios de campo que permitan realizar medidas in situ.

El objetivo del estudio es evaluar el comportamiento de distintos tipos de aceros inoxidables empleados como armadura de estructuras de hormigón, expuestas a un ambiente marino. De forma simultánea, se estudia

el comportamiento del acero al carbono y se establece una comparativa del comportamiento de los diversos materiales estudiados.

El trabajo de investigación ha sido realizado en el área de corrosión de las instalaciones que Acerinox Europa tiene en Palmones (Cádiz), junto con el equipo del centro de investigación Eduardo Torroja de Madrid.

El estudio de campo se realiza mediante la exposición de bloques de hormigón con armaduras de acero inoxidable –denominados Bartolos– en la costa onubense, estando en contacto directo con el ambiente marino.

2. MATERIALES

Se estudian cinco tipos de barras de acero inoxidable corrugado laminadas en frío. Los materiales estudiados son dos aceros inoxidables austeníticos (EN 1.4307 y EN 1.4404) y tres dúplex (EN 1.4462, EN 1.4362 y EN 1.4482).

3. FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE LA PROBETA DE HORMIGÓN CON ARMADURA DE ACERO INOXIDABLE, BARTOLO

Se fabrican dos bloques de hormigón de 200 cm de altura y base cuadrada de 50 x 50 cm². Se emplea cemento CEM | 42.5R/SR, con una dosificación de agua/cemento de 0.44.

Las distintas barras de acero inoxidable (longitud 160 mm y diámetro 12 mm) se distribuyen a lo largo de las 4 caras del bartolo sujetándolas a armaduras de acero al carbono mediante bridas (lámina 1). Para que no exista contacto eléctrico, se usan separadores de plástico no conductores en las zonas donde la armadura de acero al carbono se cruza con la de inoxidable (lámina 2).

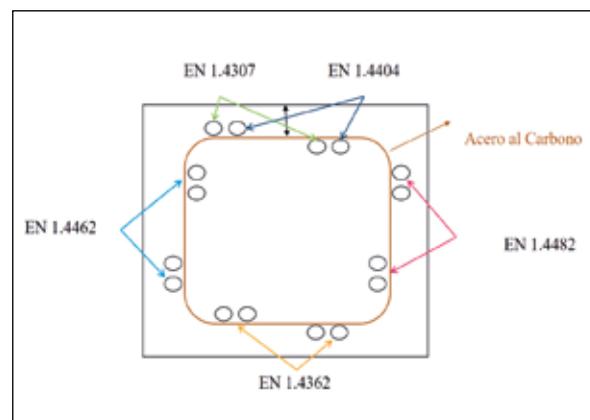


Lámina 1. Distribución de las barras de acero inoxidable. Imagen de los autores



Lámina 2. Aislamiento entre el acero inoxidable y el acero al carbono. Imagen de los autores

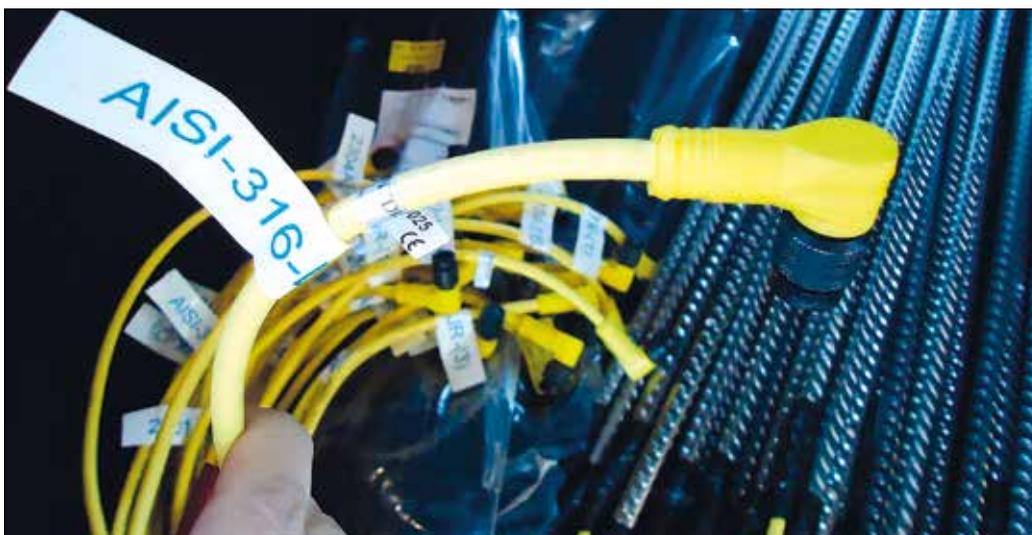


Lámina 3. Cable resistente al agua de mar. Imagen de los autores

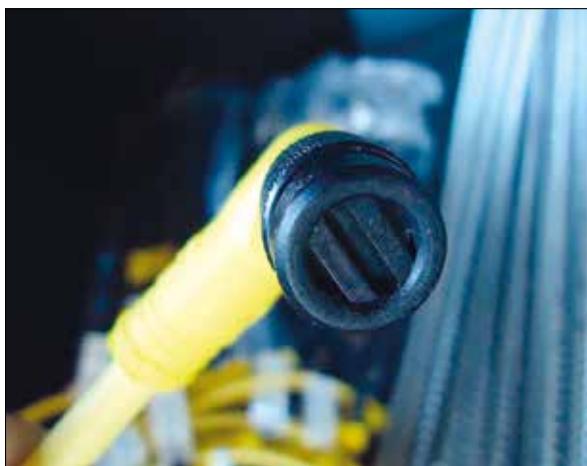


Lámina 4. Tapón aislante de la conexión. Imagen de los autores

Para realizar las medidas in situ a lo largo del periodo de ensayo, tanto las barras de acero inoxidable, como la estructura de acero al carbono, se conectan por sus extremos (mediante soldadura), a unos cables resistentes al agua de mar (IP 65), que disponen de un tapón especial (diseñado específicamente para este trabajo), que permite el completo aislamiento de la conexión, con el entorno (láminas 3 y 4).

Para proteger la zona de la soldadura, esta se cubre con una resina epoxi, que da consistencia a la soldadura a la vez que protege el cable frente al agua de mar y, por consiguiente, de los cloruros. Cada una de las uniones es protegida con cinta aislante (lámina 5).

Una vez fijadas todas las barras de acero inoxidable a la armadura de acero al carbono, esta se introduce dentro del molde, donde se rellenará de hormigón,



Lámina 5. Protección de las uniones corrugado – cable. Imagen de los autores



Lámina 6. Estructura en el molde. Imagen de los autores



Lámina 7. Hormigonado del bartolo. Imagen de los autores

con la precaución de dejar los cables fuera del molde para poder realizar las oportunas medidas de corrosión a lo largo del tiempo (láminas 6 y 7).

Tras 28 días de fraguado (lámina 8), se desmoldan los Bartolos, se colocan en una zona de la playa situada en el muelle de la Turba (Palos de la Frontera, Huelva) y se entierran un metro de profundidad en la zona de carrera de mareas (láminas 9 y 10), ya que el constante mojado y secado, a consecuencia de las subidas y bajadas de las mareas, hace que sea un medio especialmente agresivo.

4. MÉTODOS DE ENSAYO

Para la evaluación in situ de las probetas de hormigón, se recurre a métodos no destructivos, basados en técnicas electroquímicas, como son la medida del potencial de corrosión (E_{corr}), la resistividad eléctrica (ρ) y la velocidad de corrosión (I_{corr}).

La medida del potencial de corrosión aporta información sobre el riesgo de corrosión de la armadura, además de permitir evaluar los sistemas de protección o de reparación.



Lámina 8. Fraguado del bartolo. Imagen de los autores



Lámina 9. Colocación de los bartolos.



Lámina 10. Bartolos colocados en la playa de Huelva. Imagen de los autores

La resistividad eléctrica proporciona información sobre el riesgo de corrosión, debido a la relación existente entre la intensidad de corrosión y la conductividad electrolítica, de modo que una baja resistividad implicaría la capacidad de desarrollo de una alta intensidad de corrosión. Además, permite estimar la difusión de los agresivos y, por tanto, la degradación del hormigón, por lo que es un buen indicador del estado del mismo y de la durabilidad de la estructura.

La velocidad de corrosión informa de forma cuantitativa acerca de la degradación del material por unidad de tiempo y superficie de armadura expuesta. La evolución de la velocidad de corrosión puede ayudar en la detección de la llegada del agresivo a la armadura, ya que permite estudiar la evolución del sistema.

Las medidas electroquímicas se llevan a cabo mediante un equipo patentado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, denominado GECOR08 (Lámina 11).

El equipo GECOR08 dispone de un sensor formado por un contraelectrodo o electrodo auxiliar estándar y por un electrodo en forma de anillo, que rodea al anterior, denominado anillo de guarda y que crea un campo de sentido opuesto al que genera el electrodo auxiliar, de modo que la corriente aplicada queda confinada en un área conocida (lámina 12).

La primera medida es tomada inmediatamente tras la colocación de los Bartolos. Las sucesivas medidas se llevan a cabo de forma periódica a lo largo del periodo de exposición.



Lámina 11. GECOR08. Imagen de los autores



Lámina 12. Sensor del equipo GECOR08. Imagen de los autores

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo han sido obtenidos a lo largo de 8 años de exposición. Las medidas de velocidad de corrosión, potencial de corrosión y resistividad de cada uno de los dos bartolos se realizan in situ, obteniéndose un promedio entre los resultados registrados en ambos bartolos (láminas 13-15).

Un acero se considera que se encuentra en estado pasivo cuando su intensidad de corrosión es inferior a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. En la lámina 13 se observa que el acero al carbono se encuentra en estado activo a partir del año y medio de exposición, mientras que todas las

armaduras inoxidables se encuentran pasivas después de estos 8 años de exposición.

En la lámina 14 se observan los valores de caída óhmica medidos a lo largo del tiempo, comprobando que esta medida no es útil para establecer diferencias en el comportamiento de los distintos materiales estudiados, aportando información sobre el estado del hormigón.

En cuanto a los potenciales de corrosión (lámina 15), una vez superado el periodo inicial, mientras que la estructura de acero al carbono prácticamente se mantiene constante, los distintos aceros inoxidables,

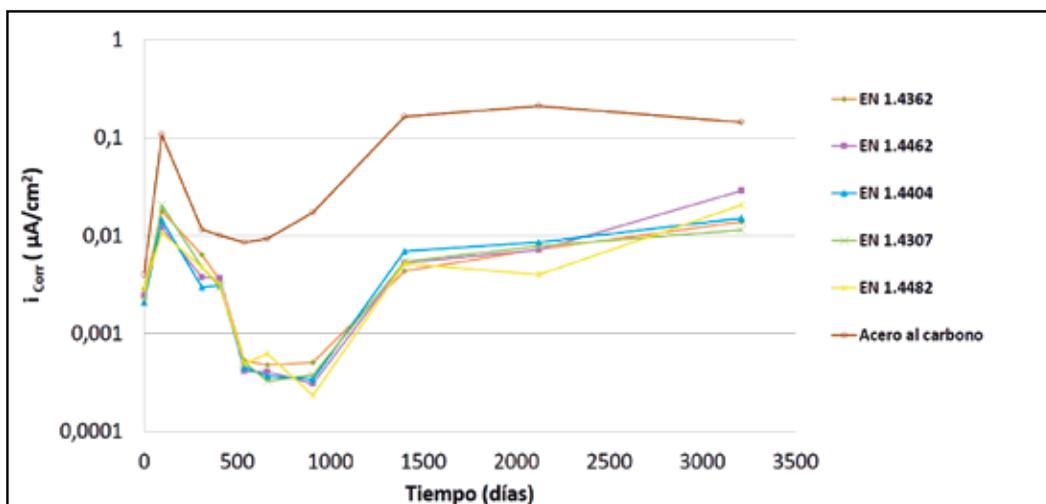


Lámina 13. Evolución de icorr a lo largo del tiempo. Imagen de los autores

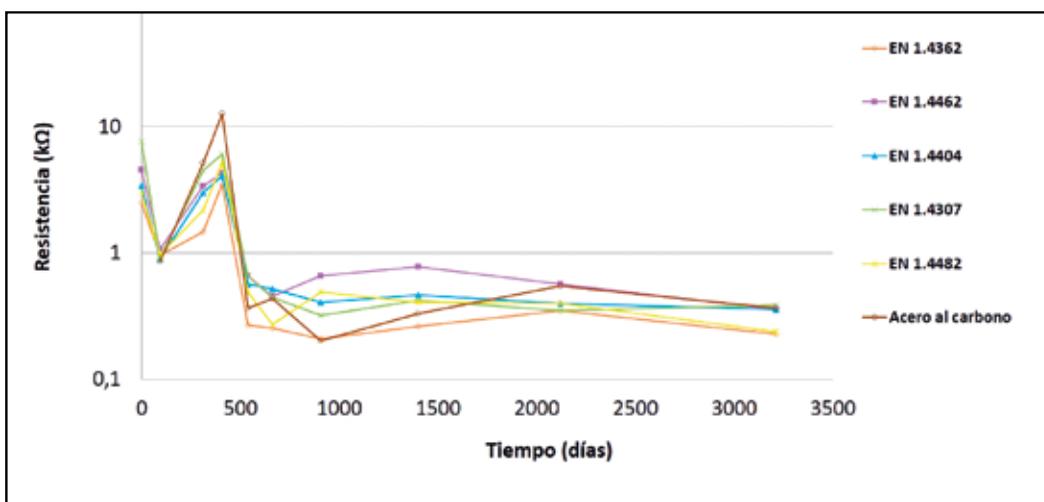


Lámina 14. Evolución de Resistencia a lo largo del tiempo. Imagen de los autores

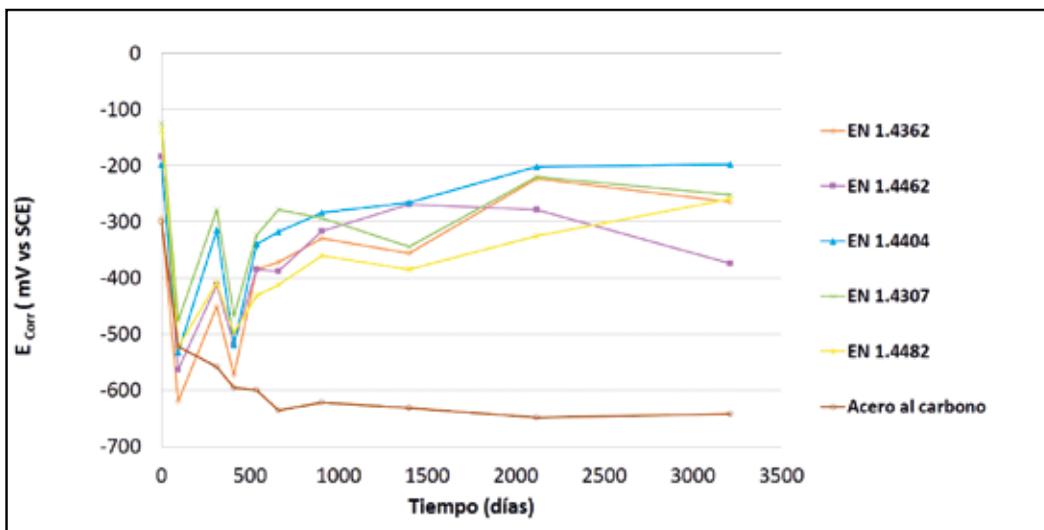


Lámina 15. Evolución de Ecorr a lo largo del tiempo. Imagen de los autores

tienden a potenciales de corrosión más positivos, manifestando su mayor resistencia a la corrosión, debido a la mayor nobleza.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudia el comportamiento frente a la corrosión de armaduras de acero inoxidable corrugado como material de refuerzo en estructuras de hormigón en un ambiente marino en carrera de mareas. Los datos de comportamiento se han recopilado a lo largo de 8 años de ensayo.

Los resultados obtenidos muestran como las armaduras de acero inoxidable presentan mucho mejor comportamiento como material de refuerzo en armaduras de hormigón expuestas en un medio marino frente al acero al carbono.

Actualmente, las estructuras de hormigón con Aceros inoxidables siguen colocadas en la zona de marea de una playa de Huelva, con el fin de poder seguir recabando información a lo largo del tiempo.

7. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

Documentos

- BS 6744, “Stainless Steel bars for the reinforcement of and use in concrete. Requirements and test methods”, *British Standard*.
- REAL DECRETO 1247/2008, “Instrucción de hormigón estructural (EHE- 08)”.

Bibliografía

- Acosta, P., Matres, A., Pachón, A., Sánchez, J., Fullea, J. y Picón, J.M. (2013). “Armaduras de acero inoxidable expuestas en ambiente marino. Caracterización in-situ de la corrosión”. *Armaduras de acero inoxidable, Cedinox*, pp. 115-128.
- Acosta, P., Matres, V., Sánchez J., Andrade, A., Pachón, A., Fullea, J., Rebolledo, Picón, J.M. y Martín, J.M. (2013). “Metodología de ensayo para evaluar el comportamiento de armaduras pasivas de aceros inoxidables corrugados en hormigones expuestos en ambientes marinos”. *Actas del X Congreso Nacional de Materiales Compuestos*, pp. 569-574.
- Andrade, C. y Alonso, C. (2004). “Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method”, *Materials and Structures* 37 (9), pp. 623-643.

- Bautista, A., Velasco, F. y Álvarez, S.M. (2003) “Hall-cell potential measurements – potential mapping on reinforced concrete structures”, *Materials and structures* 36 (7), pp. 461-471.
- Bautista, A., Velasco, F. y Álvarez, S.M. (2009). “Resistencia a la corrosión del acero inoxidable dúplex UNS S32001 en disoluciones que simulan el hormigón”. Universidad Carlos III de Madrid.
- Polder, R. et al, (2000) “Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete”, *Materials and Structures* 33 (10), pp. 603-611.
- Smith. F.N. (1998) “The use of stainless Steel for concrete reinforcing bars is gaining momentum”, *Stainless Steel World*, pp. 52-55.

Victoria Matres Serrano

Acerinox Europa S.A.U.

Tamara Córdoba Jiménez

Acerinox Europa S.A.U.

Javier Sánchez Montero

Instituto de Ciencias de la Constitución Eduardo Torroja (IETcc-CSIC)

Julio Torres Martín

Instituto de Ciencias de la Constitución Eduardo Torroja (IETcc-CSIC)

Nuria Rebolledo Ramos

Instituto de Ciencias de la Constitución Eduardo Torroja (IETcc-CSIC)

Cómo citar este artículo:

Victoria Matres Serrano, Tamara Córdoba Jiménez, Javier Sánchez Montero, Julio Torres Martín y Nuria Rebolledo Ramos (2022). “Acero Inoxidable Corrugado en hormigón expuesto a ambiente marino”. *Almoraima. Revista de Estudios Campogibaltareños* (56), abril 2022. Algeciras: Instituto de Estudios Campogibaltareños, pp. 176-183.
