

Corrosión bajo tensión, de armaduras de acero inoxidable expuestas a un ambiente con cloruros.

Stress corrosion cracking of stainless steel reinforcements in chloride content environment

Estibaliz Briz Blanco^{*, a}, Leire Garmendia Arrieta^a, Iñigo Calderon Urizar Aldaca^b

Jesus Cuadrado Rojo^a, Maria Victoria Biezma Moraleda^c, David Martínez Bastidas^d

^a Prof. Dr Industrial Engineer; University of The Basque Country (UPV/EHU).

^b Researcher Dr.Civil; Engineer Tecnalia Research & Innovation

^c Prof.Dr Chemical Sciences; University of Cantabria (UC)

^d Prof.Dr Chemical Sciences; The University of Akron

RESUMEN

Cuando una estructura de hormigón armado se emplaza en un ambiente marino, los cloruros penetran a través de los poros de hormigón reduciendo su alcalinidad y rompiendo la capa pasiva formada alrededor de la armadura. La acción simultánea de las cargas y los cloruros reducen la ductilidad drásticamente produciendo el colapso repentino de la estructura por rotura frágil de la armadura; fenómeno conocido como corrosión bajo tensión (CBT). Las armaduras de acero inoxidable se emplean cada vez más para evitar este efecto. Sin embargo, la falta de resultados concluyentes impide desarrollar una normativa que permita aprovechar las características fisicomecánicas de estos aceros. En el presente trabajo se analiza el comportamiento en CBT de los aceros 2205DSS y 2001LDSS

ABSTRACT

When reinforced concrete structures are placed in marine environment, chloride agents penetrate through concrete internal pore structure and they breakdown the passive film developed around reinforcement thanks to the high alkalinity of well-designed concrete. The simultaneous action of loads and chloride attack can dramatically reduce the ductility of reinforcement leading to an unexpected brittle collapse: stress corrosion cracking (SCC). The use of stainless steel as reinforcement is gathering strength; nevertheless, the lack of conclusive results, impede to develop a specific directive to take advantage of their physic-mechanical properties. This paper presents an assessment of SCC behaviour of 2205 duplex stainless steel and 2001 lean duplex stainless steel in contrast to carbon steel reinforcements.

PALABRAS CLAVE: Hormigón armado, cloruros, corrosión bajo tensión, armadura de acero inoxidable

KEYWORDS: Reinforced concrete, chlorides, stress corrosion cracking, stainless steel reinforcements.

1.Introducción

Uno de los principales problemas de durabilidad de las estructuras de hormigón armado es la corrosión de las armaduras.

El hormigón se diseña para que tenga una alcalinidad alta, con un pH en torno a 12-13.

Esta elevada alcalinidad garantiza el estado de pasivación del refuerzo de acero que queda embebido en el hormigón, protegiendo así la armadura de la corrosión. Sin embargo, cuando la estructura se encuentra ubicada en un ambiente agresivo, los agentes corrosivos penetran a través de los poros de hormigón reduciendo su alcalinidad. Cuando el pH desciende a valores por debajo de 9, el hormigón

pierde su capacidad protectora impidiendo la generación de la capa pasivante.

En el caso de las estructuras de hormigón armado construidas en ambiente marino. Los iones cloruro procedentes de la atmosfera marina rompen la capa pasivante de manera localizada desarrollando en las armaduras unas afecciones denominadas “picaduras”. A su vez, estas estructuras deben soportar las cargas que actúan sobre ella. La acción simultánea de los iones cloruro y las tensiones generadas en las armaduras, disminuyen la resistencia mecánica del acero, y en especial su ductilidad, provocando el colapso prematuro, sin previo aviso de la estructura [1]. Este fenómeno se conoce como Corrosión Bajo Tensión.

La corrosión en las estructuras de hormigón armado es un problema para el que aún no se ha encontrado una solución eficaz y económica. Realmente existen varias alternativas para abordarlo, tales como el empleo de inhibidores de corrosión en el hormigón, la protección catódica de la armadura, el empleo de armaduras con recubrimiento orgánico o inorgánico, el empleo de armaduras metálicas de materiales con elevada resistencia a la corrosión, empleo de armaduras de materiales no metálicos o la elaboración de cementos con nuevos componentes protectores.

De las diferentes alternativas, la protección catódica permite minimizar el proceso de corrosión una vez éste se ha iniciado, pero requiere de una inversión económica muy elevada, muy difícil de justificar en numerosas aplicaciones. Otra opción, que ha demostrado su idoneidad, es el uso de acero inoxidable como armadura, tomando como referencia de uso en su primera utilización: la construcción del Puente de El Progreso, Península de Yucatán, Méjico (1941), en el que se utilizó un acero similar al acero inoxidable austenítico AISI 304 (UNS 1.4304). Es necesario resaltar que este puente aún se mantiene en servicio con un rendimiento excelente [2].

Sin embargo, el elevado coste de este tipo de armaduras de acero inoxidable frente al acero tradicional utilizado en la construcción (acero al carbono), ha limitado su uso, pese a que podrían reducir los costes de rehabilitación entre un 20% y un 25% [3]. El desarrollo de nuevos aceros inoxidables estructurales más económicos, como los aceros inoxidable lean dúplex con bajo contenido en níquel, ha hecho que se reconsidere el uso de estos aceros como solución al problema de la corrosión de las armaduras reforzadas con aceros al carbono [4].

Pese a que las normativas para estructuras de hormigón armado contemplan el uso del acero inoxidable como refuerzo [5-7], su empleo se basa en las propiedades del acero al carbono. La falta de resultados congruentes ha impedido el desarrollo de una normativa específica para el uso del acero inoxidable. Este hecho se debe, a la gran dispersión de las condiciones de ensayo realizados hasta la fecha para poder analizar el comportamiento de estos aceros en CBT: algunos ensayos se realizan a altas temperaturas, otros bajo deformación constante hasta rotura, o ambos a la vez, y la mayoría de estos ensayos no se realiza con barras corrugadas [8].

El presente trabajo hace un análisis comparativo de la susceptibilidad a corrosión bajo tensión de las armaduras de acero inoxidables dúplex 2205 (2205 DSS), lean dúplex 2001 (2001 LDSS) y acero al carbono B500SD. Las armaduras se encuentran cargadas entorno al 85% de su límite elástico sumergidas en solución simulada de poros de hormigón con un contenido en cloruros del 8% las muestras de acero inoxidable, y un 3.5% las muestras de acero al carbono.

2. Trabajo experimental

2.1 Materiales

La tabla 1 muestra la composición química de los diferentes aceros (2205DSS, 2001LDSS y B500SD) analizados. Con la intención de

acelerar el proceso de iniciación de grieta, las armaduras han sido mecanizadas con una entalla en V [9]

2.2 Test de Corrosión Bajo Tensión

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las muestras para el análisis del comportamiento de corrosión bajo tensión de las armaduras tanto de acero inoxidable como de acero al carbono, han sido ensayadas simultáneamente bajo la acción de una carga constante y sumergidas en un electrolito.

Para simular las condiciones del ambiente que rodea la armadura se emplea una solución de poros de hormigón saturado según la norma UNE EN 112072 [10] que permite obtener un pH de 12.6, a la que se añadirán los cloruros según peso. En el caso de las muestras de acero al carbono se ha añadido un 3.5% de Cl⁻, porcentaje que simula el contenido de cloruros en agua de mar. En el caso de las muestras de acero inoxidable, estudios previos establecen un umbral de cloruros para este tipo de aceros de entre 6 y 8% [11]. Para el presente estudio, y basado en estudios previos, las armaduras de acero inoxidable se han ensayado con un 8% Cl⁻.

En la tabla 2 se muestra el límite elástico de los aceros analizados (f_y), la tensión que se ha aplicado a cada una de las muestras y la relación del límite elástico respecto a la carga aplicada.

La susceptibilidad de CBT se ha analizado mediante la técnica de “resistencia de polarización lineal” (LPR). Los pasos a seguir en la realización de los ensayos han sido: inicialmente se ha definido el potencial de corrosión en circuito abierto (E_{corr}), una vez definido el E_{corr} , se polariza la muestra en un intervalo de ± 15 mv vs E_{corr} con una velocidad de barrido de 0.1667mV/s con lo que se obtiene la resistencia de polarización. Por último, para determinar la densidad de corriente de corrosión se aplica la fórmula de Stern&Geary ($i_{corr} = B/R_p$) con $B=26$ mV [16].

Como ya se ha mencionado en la introducción, los cloruros pueden atacar a la capa pasivante de forma localizada desarrollando unas picaduras en la superficie de la armadura. Una vez finalizado el ensayo, se ha evaluado la resistencia las picaduras mediante la técnica de polarización cíclica realizando un barrido de amplitud +1V vs E_{corr} a una velocidad de 0.1667mV.

La celda electroquímica empleada para el análisis de corrosión está compuesta por un electrodo de trabajo (WE) que es la propia barra corrugada de acero con una superficie expuesta de 5.65 cm²; un electrodo de referencia (RE) que, en este caso, es un electrodo saturado de calomelanos (Saturated Calomel Electrode, SCE), un contraelectrodo (CE), que es una malla de acero inoxidable, y el electrolito, que es el medio al que estará expuesto la armadura.

Tabla 1 Composición química de los aceros ensayados (% peso)

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N	Mo	Ti
2205DSS	0.021	0.338	1.617	0.028	0.001	22.245	4.77	0.217	0.184	3.299	0.021
2001LDSS	0.028	0.65	4.19	0.23	0.001	20.07	1.78	0.08	0.129	0.22	0.006
B500SD	0.22	0.22	0.72	0.01	0.022	0.13	0.13	0.18	-	-	-

Tabla 2 Resumen de límite elástico (f_y) y cargas aplicadas (f)

Muestras	f_y [N/mm ²]	f [N/mm ²]	f_y/f
2205DSS	995	882	1.13
2001LDSS	948.5	785	1.21
B500SD	655	575	1.14

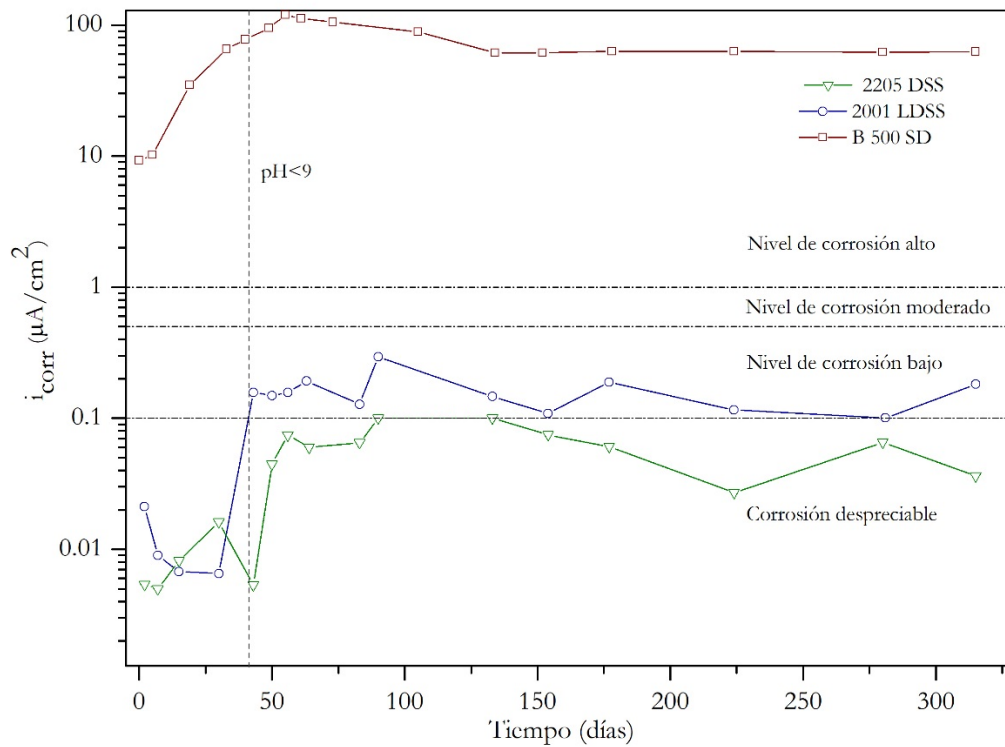
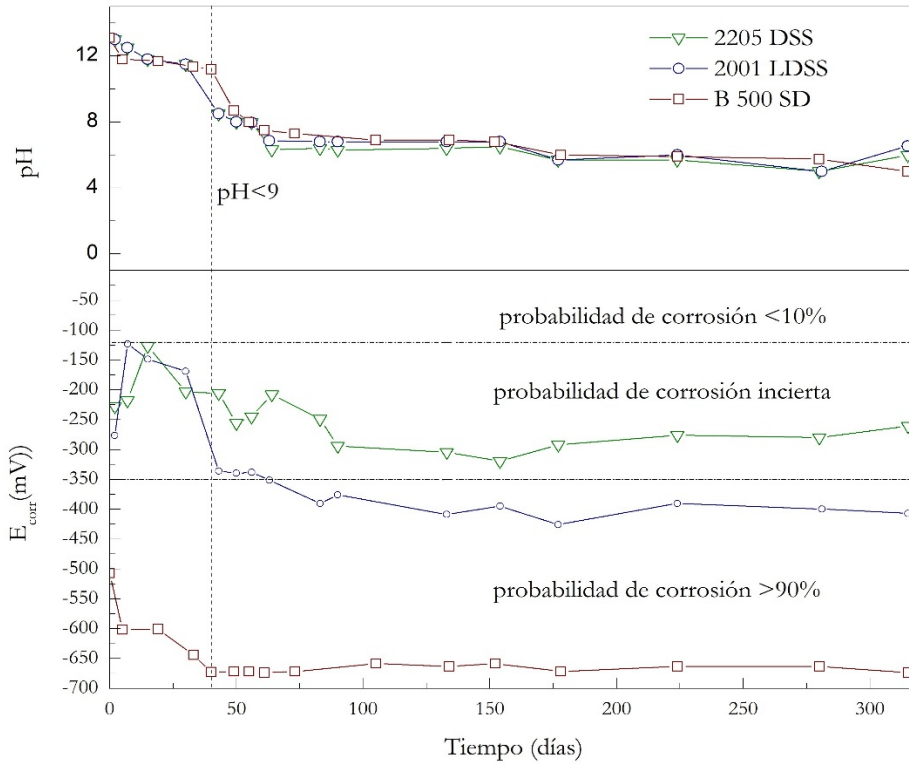
3. Resultados y discusión

El CO₂ de la atmosfera penetra a través de la estructura porosa del hormigón alterando su nivel de alcalinidad y reduciendo su pH. Cuando el pH desciende a valores en torno a 9, se produce la carbonatación del hormigón perdiendo su capacidad protectora. Por ello, con el fin de que simular de la forma más precisa posible las condiciones reales, no se ha aislado la celda electrolítica para así tener en cuenta el efecto del CO₂ presente en la atmosfera. En el momento de puesta en marcha del ensayo el pH de la solución simulada era de 12.6 (solución no carbonatada). Tras 40 días de exposición, el pH desciende repentinamente a valores en torno a 8-9 (solución carbonatada) para estabilizarse en valores en torno a 6.5.

Paralelamente se han registrado los valores de E_{corr}, la carbonatación del hormigón desencadena un proceso acelerado de corrosión. En la figura 1 se muestran los datos de pH y E_{corr} registrados durante el ensayo. Los valores del pH de la solución y los de E_{corr} muestran una misma tendencia, en el momento en que se registra un descenso del pH también se registra un descenso en el E_{corr} de las armaduras.

La determinación de E_{corr} nos permite realizar un análisis de corrosión cualitativo. Para valores de E_{corr} por debajo de -350mV según UNE 112083[12] y ASTM-C876 [13] se estima una probabilidad de corrosión superior al 90%. Este es el caso de las armaduras 2001 LDSS y B500SD. Tras estabilizarse el pH en 6, el potencial de corrosión se estabiliza en -400mV para el 2001 LDSS y en -660mV para el B500SD. En cuanto al 2205 DSS, se estabiliza en un E_{corr} igual a -280mV situando a este acero en una zona de probabilidad de corrosión incierta.

A partir de las medidas de resistencia de polarización lineal se han obtenido los valores de densidad de corriente de corrosión de las armaduras durante el tiempo de ensayo de exposición de las armaduras. En la figura 2 se resume la evolución de los valores de densidad de corrosión durante el ensayo de CBT. Tal y como se puede apreciar en la misma, una vez estabilizado el proceso, los valores de i_{corr} se estabilizan en 0.05 μA/cm², 0.18 μA/cm² y 70 μA/cm² para 2205 DSS, 2001 LDSS y B 500 SD respectivamente. Esto, considerando los límites establecidos en la norma UNE 112072 [10] estos valores se corresponden con un nivel de corrosión despreciable para 2205 DSS, nivel bajo de corrosión en el caso de 2001 LDSS y nivel alto de corrosión en lo que al B 500S D respecta.



En la tabla 3 se han resumido los datos obtenidos del análisis de corrosión (E_{corr} e i_{corr}) para las muestras 2205 DSS, 2001 LDSS y B 500SD una vez estabilizado el sistema. Analizando los resultados obtenidos para el acero B 500SD, ambos parámetros dan un resultado común, una probabilidad de corrosión superior al 90% con un nivel alto de corrosión. Sin embargo, la valoración E_{corr} de los aceros inoxidables analizados no se ajusta a la valoración obtenida de la densidad de corrosión. Mientras el E_{corr} indica una probabilidad superior al 90% en el caso de 2001 LDSS, la densidad de corriente de corrosión nos informa de un nivel bajo de corrosión. Analizando el 2205 DSS, E_{corr} da una probabilidad incierta de corrosión e i_{corr} informa de un nivel de corrosión despreciable. Esta discrepancia se debe a que los límites de E_{corr} fijados para medir la probabilidad de corrosión se han basado en los resultados obtenidos de muestra de acero al carbono.

Tabla 3 Resume de los valores E_{corr} e i_{corr} tras estabilizarse el sistema

Muestra	E_{corr} [mV]	i_{corr} [μ A/cm ²]
2205 DSS	-280	0.05
2001 LDSS	-400	0.18
D 500 SD	-660	70

La lectura del potencial en circuito abierto es un estudio sencillo para un análisis preliminar del estado de corrosión de las armaduras. La disparidad de criterios obtenidos para las muestras de acero inoxidable deja de manifiesto la necesidad de establecer unos límites para estos aceros que concuerden con los resultados obtenidos tras el estudio de resistencia de polarización lineal.

Una vez concluido el ensayo de corrosión bajo tensión, se realizó una curva de polarización cíclica en las muestras 2205 DSS y 2001 LDSS para conocer su resistencia a corrosión por picadura.

El valor de potencial de nucleación de picaduras para el 2001 LDSS es de 160,7 mV para un E_{corr} de -406.75 mV. En el acero 2205 DSS no se ha alcanzado el valor del potencial de nucleación de picadura. Este hecho indica un mejor comportamiento del acero inoxidable 2205 DSS a corrosión por picadura frente al acero inoxidable 2001 LDSS. Por otro lado, en el intervalo de barrido escogido, en el acero inoxidable 2001 LDSS no se ha podido definir el potencial de repasivación, por lo que este será inferior al E_{corr} ; este hecho indica que la armadura no puede desarrollar la capa pasiva una vez rota y las picaduras crecerán de forma ininterrumpida.

Una valoración preliminar para el análisis de comportamiento frente a corrosión localizada por picaduras es la determinación del "Pitting Resistance Equivalent Number", (PREN). Se trata de una expresión empírica que relaciona, según la ecuación (1), el contenido de los elementos aleantes contenidos en el acero con la tendencia formar a picaduras de tal manera que, un incremento en el PREN supone mayores potenciales de picadura, lo que implica una mayor resistencia a corrosión por picadura [14]. En la tabla 4 se han recopilado los valores de E_{np} obtenidos para el acero inoxidable AISI 2205 y AISI 2001 junto con el valor los $PREN_{16}$. Si se analizan los valores PREN con el E_{np} se puede ver cómo un valor más elevado de PREN corresponde con un valor superior de E_{np} y una mayor resistencia de corrosión por picadura.

En la figura 3 se presentan las imágenes de las probetas de acero inoxidable en su estado inicial (figura 3a) una vez finalizado el ensayo de CBT tras la polarización cíclica. En la figura 3b se aprecia como el acero 2005 DSS permanece inalterado. Por lo contrario, en el 2001 LDSS se aprecian las picaduras desarrolladas. Estas imágenes corroboran los resultados obtenidos de las diferentes mediciones.

$$PREN_{16} = Cr(\%) + 3.3Mo(\%) + 16N(\%) \quad (4)$$

Tabla 4 Potencial de nucleación de picadura (Enp) y PREN₁₆

Muestra	Enp [mV]	PREN ₁₆
2205 DSS	>830	36.81
2001 LDSS	160.75	22.86

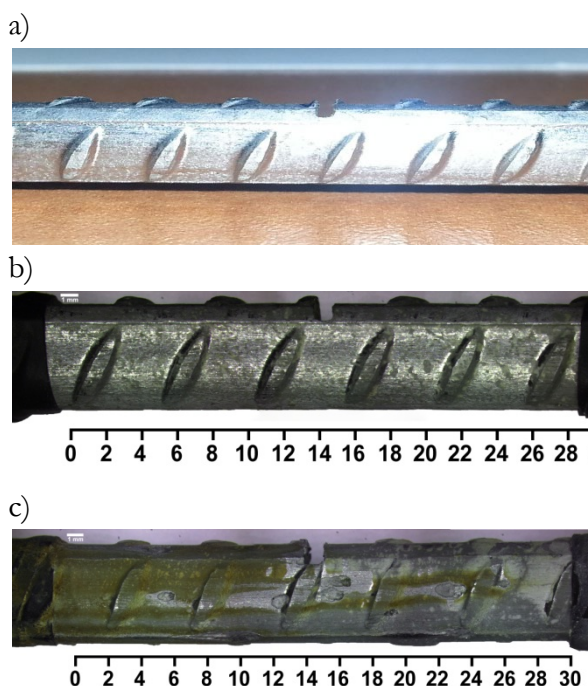


Figura 3 a) Estado de las armaduras 2001 LDSS y 2205 DSS antes del ensayo y una vez finalizado el ensayo b) 2205 DSS c) 2001LDSS.

4. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación, se han expuesto los resultados del análisis de corrosión de las armaduras de acero inoxidable 2205 DSS y 2001 LDSS y de acero al carbono B 500 SD. Para ello, las muestras se han puesto en carga, entorno al 85% bajo una presión constante. En cuanto al ambiente, se han sumergido en solución saturada simulada de poros de hormigón a la que se le ha añadido un 8% Cl en el caso de las armaduras de acero inoxidable y un 3.5% Cl en las armaduras de acero al carbono. Resumiendo, las conclusiones principales del estudio son:

- Tanto los valores de E_{corr} como de i_{corr} corroboran un mejor comportamiento de las armaduras de acero inoxidable frente a las de acero al carbono.
- En las muestras 2001 LDSS y 2205 DSS, el nivel de corrosión medido a través de E_{corr} e i_{corr} no se corresponden. Esto es debido a que los límites que fijan la UNE 112083[12] y ASTM-C876 [13] corresponden al acero al carbono. Este hecho deja de manifiesto la necesidad de fijar unos límites específicos para las armaduras de acero inoxidable.
- El valor de i_{corr} obtenido para 2001 LDSS una vez estabilizado el sistema es 3.6 veces mayor en comparación con 2205 DSS.
- Tal y como predice el PREN, el 2205 DSS tiene mejor comportamiento ante corrosión por picaduras que el 2001 LDSS.
- Comparando 2001 LDSS con B 500 SD, el valor de i_{corr} del B 500 SD es 389 veces superior. Dejando de manifiesto la mejora que supone, desde el punto de vista de durabilidad, el empleo de 2001 LDSS.
- Las imágenes muestran un mejor estado del 2205 DSS en comparación con 2001 LDSS.

Agradecimientos

El autor quiere expresar su agradecimiento a los grupos de investigación del Gobierno Vasco IT1314-19 y UPV/EHU GIU19/029, así como a la financiación de la UPV/EHU PPGA19/61.

Referencias

- [1.] J. Sanchez, C. Fulla, C. Andrade y C. Alonso, Stress corrosion cracking behaviour of duplex stainless steel by slow rate test, Corrosion Engineering Section, vol. 65, nº 2, pp. 154-159, 2009.
- [2.] E. I. Moreno, A. A. Torres Acosta y P. Castro Borges, Construcción del muelle de progreso, Ingeniería Revista Académica, vol. 8, pp. 61-66, 2004.
- [3.] E. Otero Huerta, Corrosión y degradación

- de los materiales, Madrid: Editorial Síntesis, 2001.
- [4.] Sistemas de Reparación y Protección para garantizar la durabilidad de estructuras existentes, de Sistemas de reparación y protección de estructuras de hormigón con corrosión, Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural, ACHE, 2015, pp. 194-206.
- [5.] BS6744, Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete-Requirements and test methods, September: British Standard, 2009.
- [6.] ASTM-A955, Standard specification for deformed and plain stainless-steel Bars for concrete reinforcement, American Society for Testing and Materials, 2016.
- [7.] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [8.] W.-T. Tsai y M.-S. Chen, «Stress corrosion cracking behavior of 2205 duplex stainless steel in concentrated NaCl solution, Corrosion Science, vol. 42, pp. 545-559, 2000.
- [9.] UNE-EN-ISO7539-6, Corrosión de metales y aleaciones. Ensayo de corrosión bajo tensión. Parte 6: Preparación y uso de probetas prefisuradas para ensayos bajo carga constante o desplazamiento constante., Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012.
- [10.] UNE112072, Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia a la polarización, Asociación Española de Normalización y Certificación, 2011.
- [11.] S. Fajardo, D. Bastidas, M. Criado y J. Bastidas, Electrochemical study on the corrosion behaviour of a new low-nickel stainless steel in carbonated alkaline solution in the presence of chlorides, *Electrochimica Acta*, vol. 129, pp. 160-170, 2014.
- [12.] UNE112083, Medición de potencial de corrosión libre en estructuras de hormigón armado, Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación, 2010.
- [13.] ASTM-C876, Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, Filadelfia: American Society for Testing and Materials, 2009.
- [14.] R. Merello, F. Botana, J. Botella, M. Matres y M. Marcos, Influence of chemical composition on the pitting corrosion resistance of non-standard low-Ni high-Mn-N duplex stainless steel, *Corrosion Science*, vol. 45, n° 2003, pp. 909-921, 2003.