



# Comportamiento frente a la corrosión de armaduras de acero inoxidable

Las nuevas armaduras de acero inoxidable para estructuras de hormigón ofrecen unas excepcionales prestaciones frente a los procesos de corrosión, hecho que garantiza una prolongada durabilidad en condiciones de servicio. Los resultados obtenidos durante los dos años de monitorización electroquímica revelan una conservación del estado pasivo de los refuerzos corrugados de acero inoxidable.

**E. Medina** Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

**I. Llorente, S. Fajardo, D. M. Bastidas** Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM-CSIC  
Dpto. Ingeniería de Superficies, Corrosión y Durabilidad

EN LOS ÚLTIMOS AÑOS, los nuevos aceros inoxidable de bajo contenido en níquel, de los tipos austenítico y dúplex, son objeto de interés por su precio más económico, al ser el níquel un aleante determinante en el precio final. Y son numerosas las investigaciones científicas que se centran en estudiar su comportamiento frente a la corrosión, especialmente a la corrosión por cloruros. La mayoría de estas investigaciones se realizan en solución simulada de poros de hormigón (solución saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que simula la fase acuosa o electrolito de los poros del hormigón, es decir, las condiciones electroquímicas en las que se encuentran las armaduras embebidas en el hormigón) [1-3], que permite obtener resultados de forma inmediata. Otros estudios se realizan con probetas de mortero de cemento Portland contaminado con cloruros, que reproducen una situación más cercana a la realidad de forma acelerada [4].

A efectos de estudios de corrosión, la cantidad total de ión cloruro  $\text{Cl}^-$  en el hormigón se suele expresar mediante el ratio  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  (concentración de cloruros/iones hidroxilo de la solución de los poros) [5] o en % respecto al peso de cemento o del hormigón. El primer parámetro se utiliza en los ensayos en solución simulada de poros, y el segundo con probetas de mortero u hormigón.

Los cloruros en el hormigón pueden provenir de sus componentes al amasarlo, del agua de mar por estar sumergido parcial o totalmente en ella, de la niebla salina por estar situado próximo a la costa, o por aportes ocasionales sobre su superficie en forma de sales para el deshielo en el caso de los puentes de carretera en zonas de heladas.

En estructuras situadas a poca distancia de la costa (menos de 5 km), los cloruros se manifiestan como depósitos sobre la superficie del hormigón y como concentración de cloruros por absorción capilar y difusión posterior en su masa interior. Los depósitos disminuyen con la distancia a la costa,

especialmente en los primeros doscientos metros, y las concentraciones también disminuyen, pero en menor medida [6]. Cuando el hormigón se seca, el agua se evapora y los cloruros permanecen en el hormigón, por lo que la repetición del proceso humectación-secado puede causar una elevada concentración de cloruros [7].

Según estudios realizados con probetas de hormigón expuestas a la acción de la niebla salina a diferentes distancias de la costa [8], la concentración de cloruros acumulados en el hormigón alcanzó valores de hasta el 0,65% en peso de cemento después de año y medio de exposición. Otros estudios similares han alcanzado cifras de  $4\text{kg Cl}^-/\text{m}^3$  de hormigón, es decir, aproximadamente el 2% de ión cloruro en peso de cemento [9]. Análisis realizados en muelles portuarios con hormigones sumergidos de hasta seis años de vida han registrado concentraciones entre el 3,5 y el 4% en peso de cemento [10], mientras que en probetas de mortero con fisuras de 0,3 mm se han medido concentraciones de más del 4% en peso de cemento en la superficie de la armadura, con 45 mm de recubrimiento [11].

Una parte del contenido total de cloruros que penetra en el hormigón queda ligado químicamente con el aluminato tricálcico del cemento para formar la Sal de Friedel [12]; otra parte queda inmovilizada por enlaces físicos, y el resto permanece en forma de cloruros libres en la solución de los poros. Esta última fracción es la única que representa peligro de corrosión para las armaduras, pero sólo es capaz de romper la capa pasiva cuando  $\text{Cl}^-/\text{OH}^- = 0,6$ , porque la entrada en el hormigón de los iones cloruro supone la emigración hacia el exterior de los iones hidroxilo [13].

La capa pasiva es una fina y compacta capa de óxidos que se forma en la interfase acero-hormigón, debido a la alta alcalinidad del hormigón, con un pH normalmente comprendido entre 12 y 13, que mantiene en estado pasivo a las armaduras de acero al car-

bono y protege adicionalmente a las de acero inoxidable. Los iones cloruros rompen la capa pasiva en pequeñas áreas, que entonces actúan como ánodos frente al resto de la superficie del acero, que permanece pasivo y actúa como cátodo, produciéndose una corrosión localizada que progresa en profundidad, muy peligrosa porque conlleva una importante reducción local de la sección de la armadura y el posible colapso repentino de la estructura.

---

### Las armaduras de acero inoxidable permiten relajar unas medidas de durabilidad del hormigón pensadas para proteger al acero al carbono

En las armaduras de acero inoxidable el riesgo de corrosión por picaduras disminuye con el incremento del contenido en cromo, molibdeno y nitrógeno, y aumenta por el daño mecánico en su superficie o la sensibilización del acero por la realización de soldaduras [14].

Con motivo de la aparición en el mercado de una nueva armadura de acero inoxidable dúplex de bajo contenido en níquel, el EN 1.4482 (AISI 2001), del fabricante español Roldán S.A. (grupo Acerinox S.A.), se ha analizado su resistencia a la corrosión por  $\text{Cl}^-$ , comparándola con la tradicional de acero austenítico EN 1.4301 (AISI 304) y la dúplex EN 1.4362 (AISI 2304), para la cual se han embebido en probetas de mortero contaminado con diferentes concentraciones de cloruro cálcico  $\text{CaCl}_2$ . Se ha utilizado  $\text{CaCl}_2$  en lugar de cloruro sódico  $\text{NaCl}$ , a pesar de que es éste último el componente natural en el agua de mar y en las sales de deshielo, porque resulta más agresivo para las armaduras. El anión  $\text{Cl}^-$  tiene

**Tabla 1.** Composición química de los tres aceros considerados en el estudio, [%] en peso, resto Fe.

Grado AISI	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N	Mo	Ti
304	0,023	0,28	1,41	0,034	0,023	18,07	7,93	0,33	0,050	0,22	-
2304	0,019	0,35	0,81	0,029	0,001	22,75	4,32	0,31	0,138	0,29	0,029
2001	0,028	0,65	4,19	0,023	0,001	20,07	1,78	0,08	0,129	0,22	0,006

mayor coeficiente de difusión en forma de  $\text{CaCl}_2$  que de  $\text{NaCl}$  [13], y el  $\text{CaCl}_2$  añadido al mortero fresco es más corrosivo que el  $\text{NaCl}$  [15].

Las probetas de mortero se han mantenido, durante un periodo de dos años, en un recipiente hermético con el 95% de humedad relativa (HR). En ese tiempo se han realizado mediciones electroquímicas, monitorizando el potencial de corrosión y la resistencia de polarización; se ha aplicado la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para realizar un seguimiento de las transformaciones que tienen lugar en la capa pasiva y analizar los factores que influyen en ella, y al final del periodo de estudio se ha caracterizado la composición de la capa pasiva mediante espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS).

El objetivo es comprobar si el nuevo acero inoxidable dúplex bajo en níquel AISI 2001 tiene una resistencia a la corrosión por picadura comparable a la de los otros dos aceros inoxidables.

## EXPERIMENTAL

Se han tomado barras corrugadas de 8 mm de diámetro de los siguientes aceros inoxidables: el austenítico AISI 304 (EN 1.4301), el dúplex AISI 2304 (EN 1.4362) y el nuevo dúplex de bajo contenido en níquel AISI 2001 (EN 1.4482). Las armaduras de los dos primeros aceros son laminadas en frío, mientras que las del nuevo dúplex lo son en caliente. La composición química de los tres aceros se recoge en la Tabla 1.

Las barras se han embebido, por parejas de un mismo acero, en probetas de mortero prismáticas de 2 x 5,5 x 8

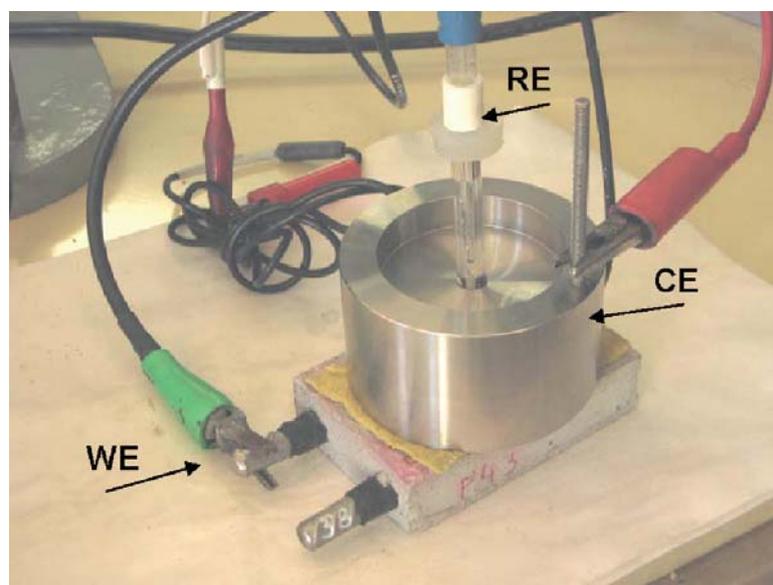
cm. Cada barra se ha protegido con cinta aislante para dejar expuesta a la corrosión una superficie de 10  $\text{cm}^2$  de barra en el centro de la probeta de mortero. Las mediciones electroquímicas se han realizado en las dos barras de cada probeta, aunque aquí sólo se recogen los resultados de la primera de ellas, porque no hay diferencias significativas entre ambas.

Los morteros son de dosificación cemento/arena/agua 1:3:0,5, con cemento Portland CEM II / B-L 32,5 N y arena normalizada DIN-EN 196-1. A los morteros se han añadido cuatro contenidos diferentes de  $\text{Cl}^-$  en forma de cloruro cálcico dihidratado  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : 0%, 0,4%, 2% y 4% respecto al peso de cemento. Una vez desenco-

fradas las probetas, se han mantenido 28 días en cámara de curado, con el 95% HR y 20°C de temperatura, y, posteriormente, durante el periodo de estudio, se han conservado en un recipiente hermético con el 95% HR.

En la caracterización electroquímica se ha utilizado un potencióstato-galvanostato EG&G PAR y un analizador de frecuencias FRA Solartron, disponiendo una celda electroquímica de tres electrodos (Figura 1): el electrodo de trabajo WE es la armadura de acero inoxidable sobre la que se realiza la medición, el electrodo de referencia RE es de calomelanos saturado SCE, y el contraelectrodo o anillo de guarda CE cierra el circuito con el electrodo de trabajo y está formado por un dis-

**Figura 1.** Celda electroquímica de tres electrodos: de trabajo (WE), de referencia (RE) y contraelectrodo (CE)



co macizo de acero inoxidable de 7 cm de diámetro y 4 cm de altura, con un taladro central para alojar el RE. Para asegurar un buen contacto eléctrico, se ha intercalado un paño húmedo entre el CE y la probeta de mortero.

En cada ensayo, estabilizado el potencial de corrosión  $E_{corr}$  transcurridos 20 minutos, se ha aplicado el método de resistencia de polarización lineal (LPR) para determinar la resistencia de polarización  $R_p$ , imponiendo a cada barra una pequeña polarización de  $\pm 15$  mV respecto del  $E_{corr}$ , a una velocidad de 0,1667 mV/s [16,17].

A partir de  $R_p$  se ha obtenido la densidad de corriente de corrosión  $i_{corr}$ , según la Ec. (1), tomando el valor de 52 mV para el coeficiente B de Stern-Geary [18].

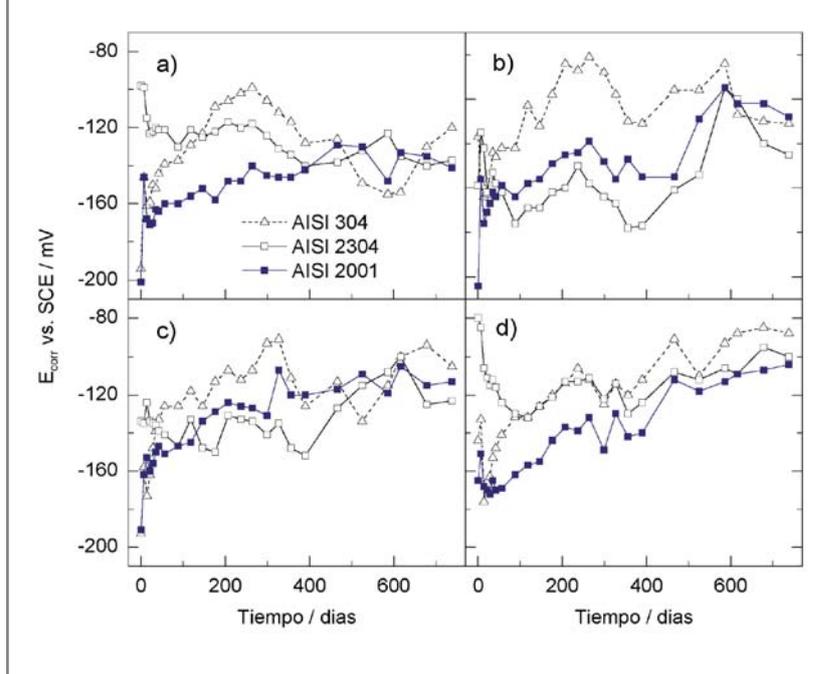
$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (1)$$

A continuación, se ha aplicado la técnica EIS, imponiendo a cada barra una señal de corriente alterna de 10 mV en un rango de frecuencias comprendido entre  $10^5$  Hz y  $10^{-2}$  Hz, aplicando un barrido de frecuencias de cinco pasos por década. Los datos obtenidos se representan en dos tipos de diagramas: Diagrama Nyquist  $-Z''$  vs.  $Z'$ , y Diagramas Bode theta vs. Frecuencia y  $|Z|$  vs. Frecuencia.

Después de año y medio de exposición de las probetas, se ha extraído una barra de cada acero inoxidable dúplex de las que contienen el 4% de  $Cl^-$ , y se ha caracterizado la composición de la capa pasiva formada en la superficie mediante la técnica XPS.

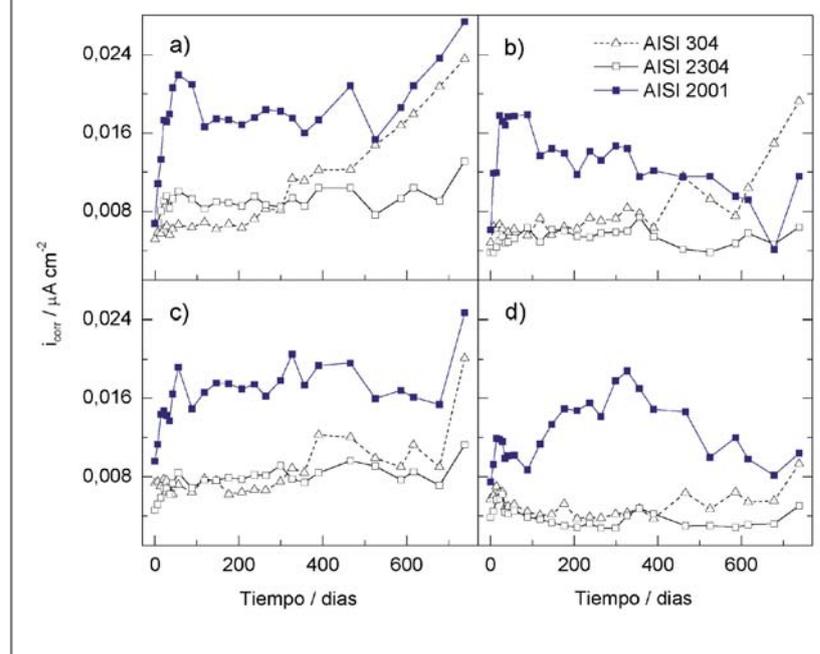
Los espectros de XPS se han obtenido utilizando un espectrómetro Fisons MT500, equipado con un analizador de electrones hemiesférico (CLAM2) y una fuente de rayos X con ánodo de magnesio (1253,6 eV) con una potencia de 300 W. La presión residual en la cámara de análisis se mantuvo por debajo de  $10^{-8}$  torr durante el experimento. La energía de paso ha sido de 20 eV, que es típica de las condiciones de alta resolución. Las intensidades

**Figura 2.** Evolución de los valores de Potencial de Corrosión  $E_{corr}$  de los tres aceros inoxidables estudiados, para: a) 0%, b) 0,4%, c) 2% y d) 4%  $Cl^-$  en peso de cemento



La nueva armadura de acero inoxidable de bajo contenido en níquel, a pesar de su menor coste económico, presenta una resistencia a la corrosión por cloruros similar a las tradicionales austeníticas y dúplex

**Figura 3.** Evolución de la Densidad de Corriente de Corrosión  $i_{corr}$  de los tres aceros inoxidables estudiados, obtenido por el método LPR, para: a) 0%, b) 0,4%, c) 2% y d) 4%  $Cl^-$  en peso de cemento



se estimaron calculando el área de cada pico después de restar la señal del fondo utilizando el método Shirley y ajustando la curva experimental a una combinación de componentes Gaussianas y Lorentzianas de proporción variable. Las energías de ligadura fueron ajustadas utilizando el pico del C1s (C-C/C-H) a 284,8 eV. Las proporciones atómicas se obtuvieron a partir de las relaciones entre las intensidades de los picos y los factores de sensibilidad atómica de referencia.

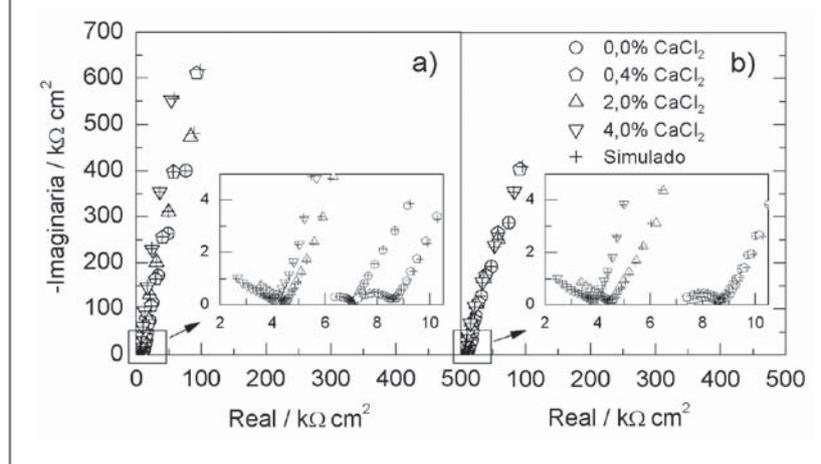
El bombardeo iónico se llevó a cabo utilizando un cañón iónico EX05 incorporado en el equipo, y que opera a un voltaje de 5 kV, una intensidad de 10 mA y una presión de  $10^{-7}$  torr. La corriente de la muestra fue de  $1 \mu\text{A}$  durante el bombardeo.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de  $E_{\text{corr}}$  registrados durante el periodo de estudio de los tres aceros inoxidable no presentan diferencias significativas entre ellos, para cualquiera de los contenidos de Cl<sup>-</sup> en el mortero, como muestra la Figura 2.

Después de formarse la capa pasiva, el potencial se estabiliza en una franja de valores comprendidos entre -80 y

**Figura 4.** Diagramas Nyquist (Impedancia Real - Imaginaria) a la edad de 1,5 años de los dos aceros inoxidable dúplex embebidos en mortero con 0%, 0,4%, 2% y 4% de Cl<sup>-</sup> respecto al peso de cemento: a) AISI 2304 y b) AISI 2001



-150 mV, muy lejos de los -270 mV para el que se considera una probabilidad incierta o inferior al 10% de que se presente la corrosión del metal cuando se trata de armaduras de acero al carbono [19].

A partir de los valores de  $R_p$  obtenidos por el método LPR, y tomando 52 mV como valor del coeficiente B de Stern-Geary, se han calculado los valores de la densidad de corriente de corrosión  $i_{\text{corr}}$  que se representan en la Figura 3.

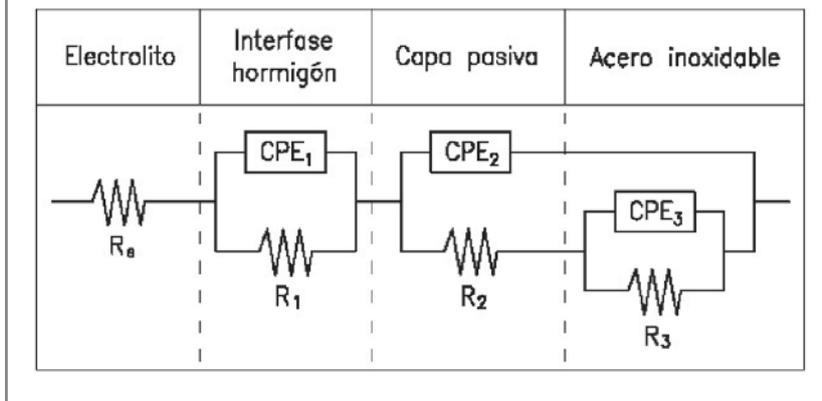
No se presentan diferencias significativas de valores de  $i_{\text{corr}}$  entre los tres aceros ni entre las diferentes cantidades de Cl<sup>-</sup> en los morteros. En todos los casos, los valores registrados son muy bajos, y varían entre  $0,002$  y  $0,024 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . En el caso de las armaduras de acero al carbono, valores de  $i_{\text{corr}}$  inferiores a  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  indican que están en estado pasivo.

Tampoco se encuentra correlación entre los valores de  $i_{\text{corr}}$  y el contenido de ión cloruro en el mortero. En

**Tabla 2.** Parámetros utilizados en la simulación de los datos de los diagramas de impedancia para los dos aceros inoxidable dúplex embebidos en morteros con diferentes concentraciones de cloruro cálcico

Acero dúplex	Cl <sup>-</sup> %	$R_e$ kΩcm <sup>2</sup>	$Y_1$ nFcm <sup>-2</sup> s <sup>-(1-α)</sup>	$α_1$	$R_1$ kΩcm <sup>2</sup>	$Y_2$ μFcm <sup>-2</sup> s <sup>-(1-α)</sup>	$α_2$	$R_2$ kΩcm <sup>2</sup>	$Y_3$ μFcm <sup>-2</sup> s <sup>-(1-α)</sup>	$α_3$	$R_3$ kΩcm <sup>2</sup>
AISI 2001	0	7,62	133,5	0,76	0,98	44,1	0,94	$2,46 \times 10^3$	89,0	0,59	$4,7 \times 10^8$
	0,4	7,27	72,3	0,77	1,37	42,9	1,02	$2,81 \times 10^3$	79,8	0,51	$1,5 \times 10^9$
	2	6,95	34,0	0,57	4,90	63,6	1,00	$1,66 \times 10^3$	149,0	0,47	$6,9 \times 10^{12}$
	4	6,78	2,1	0,38	71,99	35,4	0,93	$3,17 \times 10^3$	444,5	0,37	$1,0 \times 10^{15}$
AISI 2304	0	7,94	274,8	0,62	1,20	31,7	0,92	$5,26 \times 10^3$	39,2	0,73	$4,3 \times 10^8$
	0,4	7,21	47,2	0,81	1,23	28,3	1,02	$5,73 \times 10^3$	72,7	0,51	$8,6 \times 10^9$
	2	6,92	29,7	0,63	3,36	33,3	1,00	$3,92 \times 10^3$	126,5	0,49	$7,1 \times 10^{12}$
	4	6,75	19,3	0,41	19,72	27,4	0,98	$12,3 \times 10^3$	216,7	0,44	$2,8 \times 10^{15}$

**Figura 5.** Circuito eléctrico equivalente que simula los datos experimentales de los diagramas de impedancia para las barras corrugadas de los dos aceros inoxidable dúplex estudiados, el AISI 2304 y el bajo en níquel AISI 2001, embebidas en mortero con 0%, 0,4%, 2% y 4% de Cl<sup>-</sup> respecto al peso de cemento



el caso de los aceros AISI 304 y AISI 2304, los valores de  $i_{corr}$  más bajos se corresponden con las probetas que contienen el mayor contenido de Cl<sup>-</sup>, lo que indica que éstos no están influyendo en el proceso corrosivo de los aceros durante el periodo estudiado de vida de las probetas.

El nuevo dúplex de bajo contenido en níquel AISI 2001 presenta valores ligeramente superiores a los valores registrados de los otros dos aceros,

pero son diferencias que oscilan entre 0,008 y 0,010  $\mu A/cm^2$ , que no son significativas a efectos de corrosión y que muestran tendencia a disminuir.

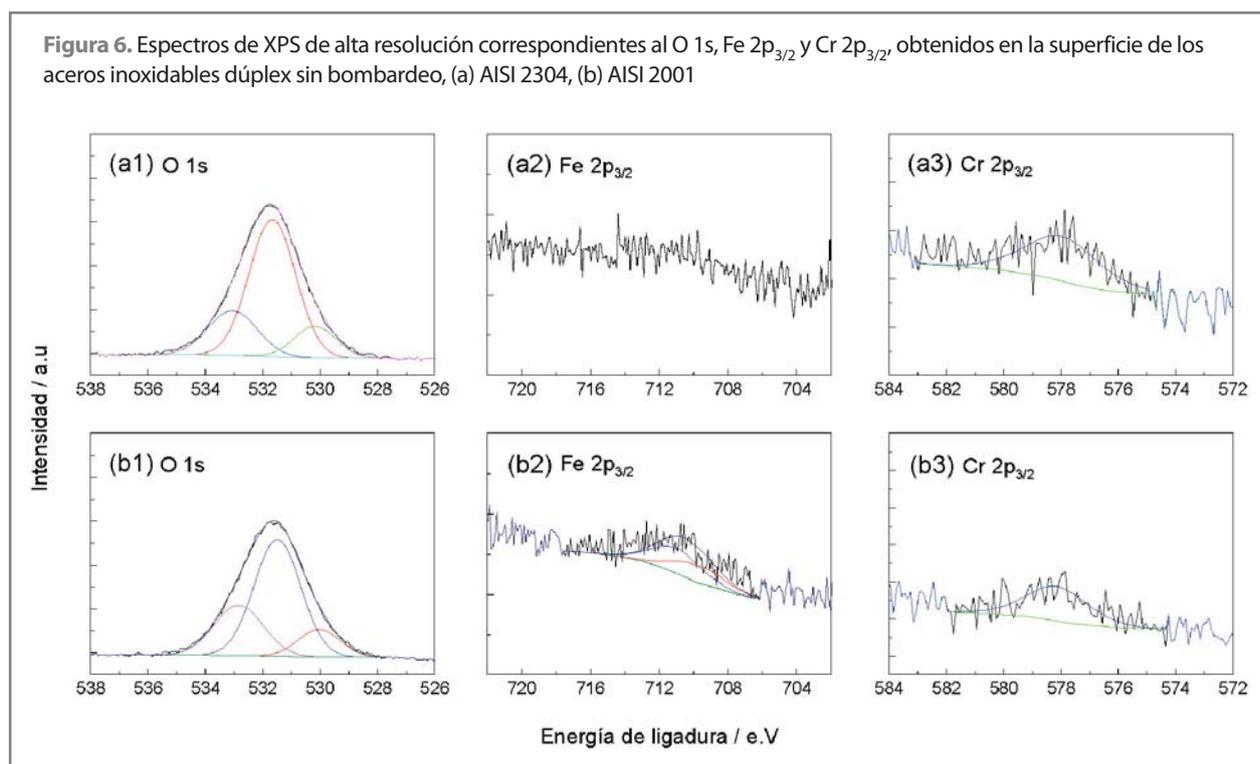
En diversos estudios recientes, realizados en solución simulada de poros de hormigón con diferentes concentraciones de NaCl, se pueden encontrar resultados similares, con aceros dúplex de bajo contenido en níquel [2] o con aceros austeníticos de bajo contenido en níquel [3]. En estudios realizados

con probetas de mortero y de hormigón, los resultados con varios aceros inoxidables de bajo contenido en níquel también son similares [4, 20].

La Figura 4 muestra los diagramas Nyquist (Impedancia Real - Imaginaria) de los dos aceros inoxidables dúplex a la edad de 1,5 años. Se observa un comportamiento capacitivo con la formación de un semicírculo ligeramente deprimido a altas frecuencias R<sub>1</sub>-CPE<sub>1</sub>, que corresponde a la interfase acero-hormigón y otro semicírculo, el cual está compuesto por dos constantes de tiempo a bajas frecuencias (R<sub>2</sub>-CPE<sub>2</sub> y R<sub>3</sub>-CPE<sub>3</sub>) que corresponde a la capa pasiva y a los procesos redox en la interfase del acero inoxidable, según el circuito eléctrico equivalente propuesto en la Figura 5. El valor de la resistencia del electrolito (R<sub>e</sub>) disminuye al aumentar el contenido en Cl<sup>-</sup>, estando comprendido entre 6,7 y 7,9  $k\Omega cm^2$ .

En la Tabla 2 se recogen los parámetros de impedancia utilizados para la simulación. Se observa que a altas frecuencias los valores de R<sub>1</sub> y CPE<sub>1</sub> están comprendidos en un rango entre 0,98–71,99  $k\Omega cm^2$  y 2,1–274,8  $nF cm^{-2} s^{-1}$ . Esta variación se atribuye a las

**Figura 6.** Espectros de XPS de alta resolución correspondientes al O 1s, Fe 2p<sub>3/2</sub> y Cr 2p<sub>3/2</sub>, obtenidos en la superficie de los aceros inoxidables dúplex sin bombardeo, (a) AISI 2304, (b) AISI 2001



diferentes reacciones de hidratación del cemento Portland en función de los contenidos de Cl<sup>-</sup>. A frecuencias intermedias 10<sup>3</sup> Hz–102 Hz, el valor de R2 aumenta para la máxima concentración de Cl<sup>-</sup>, mientras que CPE2 disminuye. Este hecho se atribuye a la formación de la capa pasiva en la superficie del acero inoxidable. A bajas frecuencias, el valor de R3 aumenta y el CPE3 disminuye, indicando una baja probabilidad de corrosión para estos aceros inoxidables dúplex, aún en presencia de contenidos de Cl<sup>-</sup> del 4%.

Los espectros de XPS de alta resolución obtenidos para O 1s, Fe 2p<sub>3/2</sub> y Cr 2p<sub>3/2</sub>, en ausencia de bombardeo sobre los aceros inoxidables, se muestran en la Figura 6.

El espectro del O 1s muestra una componente más intensa a una energía de ligadura de 531,5 eV, que se puede asociar a la presencia de oxígeno en forma de grupos OH/C=O, y otras dos componente de menor intensidad a energías de ligadura de 530,0 eV y 533,0 eV, que se pueden atribuir a la presencia de oxígeno en la forma de óxido y de grupos H<sub>2</sub>O/C-O, respectivamente.

El espectro de Fe 2p<sub>3/2</sub> presenta dos componentes a energías de ligadura de 709,7 y 711 eV, que se pueden asociar a la presencia de hierro en forma de Fe<sup>2+</sup> y Fe<sup>3+</sup>, respectivamente. La intensidad del pico de Fe 2p<sub>3/2</sub> para el acero inoxidable dúplex AISI 2304 es prácticamente despreciable.

El espectro de Cr 2p<sub>3/2</sub> muestra una única componente a una energía de ligadura de 577,5 eV, la cual puede ser atribuida a la presencia de cromo en forma de Cr(OH)<sub>3</sub>.

## CONCLUSIONES

Los tres aceros inoxidables estudiados, el austenítico AISI 304, el dúplex AISI 2304 y el nuevo dúplex de bajo contenido en níquel AISI 2001, embebidos en morteros amasados con diferentes cantidades de Cl<sup>-</sup>, hasta un 4% respecto al peso de cemento, y después de dos años de exposición al 95% HR, presentan unos valores de E<sub>corr</sub> e i<sub>corr</sub>

característicos del estado pasivo cuando se tratan de armaduras de acero al carbono.

Al mayor valor de i<sub>corr</sub> registrado, 0,022 μA/cm<sup>2</sup> en el nuevo acero inoxidable dúplex AISI 2001, le corresponde una velocidad de corrosión (obtenida por la ley de Faraday) [21]:

$$v_{\text{corr}} = 11,6 \cdot 0,022 \mu\text{A}/\text{cm}^2 / 10 \text{ cm}^2 = 0,03 \mu\text{m}/\text{año} \quad (2)$$

Lo que indica un valor insignificante en términos de durabilidad de la estructura de hormigón, muy lejos de los 100-125 μm/año que son los necesarios para causar el agrietamiento del hormigón [22, 23].

Los resultados de EIS demuestran la formación de una capa pasiva muy protectora, con resistencias de corrosión muy altas, incluso en presencia de contenidos de Cl<sup>-</sup> del 4%.

El acero inoxidable dúplex AISI 2001 presenta una composición elemental en superficie muy similar a la del AISI 2304, apreciándose la presencia de cloruros en la superficie de la armadura en ambos aceros inoxidables. El análisis por XPS de los espectros de alta resolución muestra en ambos aceros inoxidables dúplex la presencia de Cr(OH)<sub>3</sub> como componente de la capa pasiva.

## Bibliografía

- [1] Bautista, A., Blanco, G. y Velasco, F., 2006. "Corrosion behaviour of low-nickel austenitic stainless steel reinforcements: A comparative study in simulated pore solutions". *Cement and Concrete Research* 36, 1922-1930.
- [2] Álvarez, S.M., Bautista, A. y Velasco, F., 2011. "Corrosion behaviour of corrugated lean duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions". *Corrosion Science* 53, 1748-1755.
- [3] Fajardo, S., Bastidas, D.M., Criado, M., Romero, M. y Bastidas, J.M., 2011. "Corrosion behaviour of a low-nickel stainless steel in saturated calcium hydroxide solution". *Construction and Building Materials* 25, 4190-4196.
- [4] García-Alonso, M.C., González, J.A., Miranda, J., Escudero, M.L., Correia, M.J., Salta, M. y Bennani, A., 2007. "Corrosion behaviour of innovative stainless steels in mortar". *Cement and Concrete Research* 37, 1562-1569.
- [5] Ann, K.Y. y Song, H., 2007. "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete". *Corrosion Science* 49, 4113-4133.
- [6] Meira, G.R., Padaratz, I.J., Alonso, C. y Andrade, C., 2002. "Efecto de la distancia al mar en la agresividad por cloruros en estructuras de hormigón en la costa brasileña". *Materiales de Construcción*, Vol. 53, nº 271-272, 179-188.

[7] Grupo español del hormigón, GEHO, 1993. "Durabilidad de estructuras de hormigón". Guía de diseño CEB, Boletín nº 12, Cap. VI, 45-57.

[8] Meira, G.R., Andrade, C., Padaratz, I.J., Alonso, C. y Borba Jr. J.C., 2007. "Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone. Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete". *Cement and Concrete Composites* 29, 667-676.

[9] Castañeda, H., Castro, P., González, C. y Genescá, J., 1997. "Modelo de difusión de cloruros en las estructuras de hormigón armado expuestas en la Península de Yucatán (México)". *Rev. Metal. Madrid* 33, 387-392.

[10] Bermúdez, M.A. y Alejos, P., 2007. "Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado en ambiente marino sumergido". *Revista Ingeniería de Construcción* 22 (1), 15-22.

[11] Mohamed, T.U., Yamaji, T. y Hamada, H., 2003. "Chloride diffusion, microstructure and mineralogy of concrete after 15 years of exposure in tidal environment". *ACI Materials Journal*, 99(3), 256-263.

[12] Lannegrand, R., Ramos, G. y Talero, R., 2001. "Estado del conocimiento sobre la sal de Friedel". *Materiales de Construcción* 51 (262), 63-70.

[13] Andrade, C., 1984. "Corrosión localizada del acero en contacto con el hormigón". *Rev. Iberoamericana de corrosión y protección* 15 (4), 27-34.

[14] Medina, E. y Bastidas, D.M., 2013. "Armaduras de acero inoxidable". *Cedinox*, Madrid.

[15] Pruckner, F. y Gjörv, O.E., 2004. "Effect of CaCl<sub>2</sub> and NaCl additions on concrete corrosivity". *Cement and Concrete Research* 34, 1209-1217.

[16] ASTM G61-86, 2009. "Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentio-dynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys", P.A.

[17] AENOR, 2011. "UNE 112072:2011 Determinación de la velocidad de corrosión de armaduras en laboratorio mediante medida de la resistencia a la polarización". Madrid.

[18] Stern, M. y Geary, A.L., 1957. *J. Electrochem. Soc.* 104 (1), 56-63.

[19] ASTM C876-99, 1999. "Standard test method for half-cell potentials of coated reinforcing steel in concrete", P.A.

[20] García-Alonso, M.C., Escudero, M.L., Miranda, J.M., Vega, M.I., Capilla, F., Correia, M.J., Salta, M., Bennani, A. y González, J.A., 2007. "Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete". *Cement and Concrete Research* 37, 1463-1471.

[21] ASTM G102-89, 2010. "Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements", P.A.

[22] 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.

[23] González, J.A., Andrade, C. y Escudero, M.L., 1984. "Corrosión de las armaduras por carbonatación del hormigón". *Rev. Iberoamericana de corrosión y protección* 15 (4), 11-19.

## Agradecimientos

Los autores quieren expresar su gratitud al Plan Nacional de I+D+i por la financiación al Proyecto BIA2012-32320; a Acerinox S.A.; a Roldán S.A. por el suministro de las armaduras de acero inoxidable utilizadas en los ensayos; Cemex España S.A.; Sika S.A.U., y FCC S.A. D. M. Bastidas agradece la financiación al Programa Ramón y Cajal del Ministerio de Economía y Competitividad, y E. Medina el apoyo y ayuda del Laboratorio de Materiales de Construcción de la EUATM-UPM.