

Análisis de la resistencia a la corrosión de barras corrugadas de acero inoxidable en medios acuosos que simulan el hormigón

F.J. BELZUNCE¹, C. RODRIGUEZ², H. CASTRO²

¹ Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ing. Metalúrgica, Universidad de Oviedo, Campus de Gijón, 33203 Gijón.

² Dpto. de Construcción e Ing. de Fabricación, Universidad de Oviedo, Campus de Gijón, 33203 Gijón.

Se ha realizado un estudio sobre la resistencia a la corrosión de barras corrugadas de acero inoxidable utilizadas en construcción civil para armar el hormigón. Con este objeto se han realizado diferentes ensayos electroquímicos en presencia de un medio acuoso básico, que simula el contacto con hormigón contaminado con sal, y se ha determinado la velocidad de corrosión y la resistencia a la formación de picaduras de diferentes calidades de aceros inoxidables (austeníticos y dúplex), tanto conformadas en caliente como en frío.

Palabras clave: Corrosión. Aceros inoxidables. Barras corrugadas

Corrosion resistance of stainless steel reinforced bars in contact with simulated concrete

The corrosion behaviour of stainless steel reinforced bars used in civil engineering was studied. Different electrochemical tests were performed using several stainless steel bars (austenitic and duplex), hot and cold rolled, in the presence of a solution, which simulates the contact with salt contaminated concrete. The corrosion rates were determined and also their behaviour against localized corrosion (pitting).

Keywords: Corrosion. Stainless steels. Reinforced bars.

1. INTRODUCCION

En aquellas obras civiles de alta responsabilidad que deban prestar servicio tanto en zonas próximas a la costa, donde la contaminación con cloruro sódico puede alcanzar proporciones importantes, como en climas fríos, donde se hace uso abundante de sales para el deshielo, se están utilizando cada vez más las armaduras de acero inoxidable, con el fin de asegurar un buen comportamiento de la estructura durante toda su vida de diseño (normalmente se trata de estructuras, como puentes, edificios singulares, etc., que deben garantizar vidas superiores a 100 años) sin necesidad de realizar costosos mantenimientos ni reparaciones (1, 2, 3). Dentro de los diferentes tipos de inoxidables, los más utilizados en el armado del hormigón son los aceros austeníticos, que combinan una excelente resistencia a la corrosión con unas adecuadas propiedades mecánicas, sobre todos si se usan los grados LN, que se caracterizan por unas altas propiedades mecánicas y una excelente soldabilidad. Un desarrollo más reciente, es la introducción de los aceros dúplex en estas aplicaciones. Teniendo en cuenta que los aceros dúplex aventajan a los austeníticos no sólo en múltiples características mecánicas sino también en resistencia a la corrosión, parece que su menor empleo se basa, fundamentalmente, en el desconocimiento por parte de los técnicos del sector, de las propiedades de este material.

En un intento de clarificar la situación expuesta, en este trabajo se ha analizado, la resistencia a la corrosión uniforme y a la corrosión por picaduras de muestras de armaduras de aceros inoxidables austeníticos (304LN y 316LN) y de aceros dúplex (2205), que habían sido corrugadas tanto en caliente como en frío en las instalaciones de la empresa ROLDAN S.A. (Ponferrada).

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales utilizados

Los materiales utilizados en este trabajo han sido dos aceros inoxidables austeníticos de los tipos AISI 304LN y AISI 316LN (corrugados en caliente y en frío) y dos aceros dúplex del tipo AISI 2205: el

D2205c (corrugado en caliente) y el D2205f (corrugado en frío). Todos estos productos fueron suministrados por la empresa ROLDAN S.A. en forma de barras corrugadas, con un diámetro nominal de 16 mm en el caso de las laminadas en caliente y de 12 mm las conformadas en frío. La Tabla I recoge la composición química de cada uno de los aceros utilizados.

TABLA I. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS BARRAS CORRUGADAS DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS (304LN Y 316LN) Y ACEROS DÚPLEX (2205C Y 2205F).

% Peso	304 LN	316LN	D2205c	D2205f
C	0.023	0.030	0.021	0.029
Si	0.38	0.36	0.45	0.39
Mn	1.49	1.31	1.75	1.72
Cr	18.55	17.62	22.25	22.50
Ni	8.77	11.70	4.79	4.72
Mo	0.21	2.87	3.28	3.22
Ti	0.003	0.005	0.070	0.030
Cu	0.18	0.10	0.30	0.24
N	0.176	0.182	0.165	0.174
S	0.022	0.004	0.001	0.001
P	0.027	0.023	0.026	0.029

El proceso de corrugado en caliente de los aceros austeníticos parte de palanquilla de 165x165 mm (145x145 mm para el dúplex), que se lamina en caliente desde 1250°C (entre 1150-1200°C en el dúplex), siendo en la última caja donde se imprime la corruga al redondo. El corrugado sale del tren a unos 975°C (925°C el dúplex) con un diámetro nominal de 16 mm, tras lo que se realiza un hipertemple en agua. Por su parte, el proceso de corrugado en frío parte de alambón de 13 mm de diámetro (obtenido tras la laminación de desbastes de 92x92 mm), que en el caso del acero dúplex se somete directamente a un proceso de deformación en frío que genera la corruga y el nervio de las barras, obteniéndose finalmente barras corrugadas de 12 mm de diámetro nominal (la reducción final de área, realizada en frío, es aproximadamente de un 15%). En el caso de los aceros inoxidables

austeníticos, sin embargo, el alambroón de $\phi=13\text{mm}$ de partida, sufre un tratamiento térmico fuera de línea antes de ser sometido al mismo proceso de deformación en frío que sufre el dúplex. Dicho tratamiento consiste en una solubilización a 1050°C (25min, aproximadamente) seguida de hipertemple y decapado ácido.

2.2 Procedimiento experimental

Con la ayuda de un potenciostato EG&G, modelo VersaStat II y una celda modelo K0235, se ejecutaron ensayos electroquímicos para la determinación de la resistencia de polarización, las curvas de Tafel (método de la intersección) y ensayos potenciodinámicos cíclicos de acuerdo con la normativa ASTM (4,5). Se utilizaron siempre secciones transversales de los diferentes redondos de 1 cm^2 , un electrodo de referencia de Ag/AgCl y una velocidad de barrido de 0.6V/h . Como electrolito se utilizó una solución acuosa $0.3\text{N KOH} + 0.05\text{N NaOH} + 3\% \text{NaCl}$, que, con un pH de 13.2, simula las condiciones que imperan en el contacto en obra entre la barra corrugada y el hormigón, cuando existe una contaminación salina del ambiente, que podría entrar a través de las porosidades y grietas generadas en el hormigón con el paso del tiempo (6). Todos los resultados que se presentarán en el apartado correspondiente, son los valores medios obtenidos tras la ejecución de 5 ensayos diferentes.

También se realizaron ensayos de tracción sobre segmentos completos, de 200 mm de longitud, cortados directamente de las barras corrugadas, de acuerdo con la normativa aplicable a este tipo de producto (7).

3. RESULTADOS

La Tabla II muestra los resultados obtenidos en los ensayos de tracción. Merece la pena destacar la mayor capacidad resistente y menor ductilidad de los aceros dúplex en relación a los austeníticos y también el fuerte incremento de resistencia (con la subsiguiente pérdida de ductilidad) que se confiere a las barras cuando la corruga se conforma en frío.

TABLA II. PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN. σ_{elas} : LÍMITE ELÁSTICO, σ_{rot} : RESISTENCIA A LA TRACCIÓN, ALARG: ALARGAMIENTO Y ESTRIC: ESTRICCIÓN.

Grado	σ_{elas} (MPa)	σ_{rot} (MPa)	Alarg (%)	Estric (%)
304 LN cal.	442	745	48	64
316 LN cal.	413	739	47	63
D2205cal.	580	834	37	46
304 LN frío	765	931	23	45
316 LN frío	711	884	24	45
D2205frío	967	1131	11	55

La resistencia a la polarización ha sido el parámetro que se ha utilizado a la hora de caracterizar el comportamiento frente a la corrosión de estos aceros en contacto con el medio agresivo citado, haciéndose notar que la resistencia a la polarización está inversamente relacionada con la velocidad de corrosión. Además, el comportamiento frente a la corrosión uniforme también se cuantificó a partir de la densidad de corriente de corrosión obtenida en el ensayo de Tafel. La Figura 1 muestra los resultados medios de la resistencia de polarización y de la densidad de la corriente de corrosión obtenidas con los diferentes productos. Se observa que la mayor resistencia a la corrosión en este medio corresponde al acero dúplex laminado en caliente, seguido de los otros dos aceros laminados en caliente (AISI 304LN y 316LN). Se destaca también con claridad el mejor comportamiento de los aceros corrugados en caliente en relación a los corrugados en frío, aunque,

en todos los casos, la densidad de la corriente de corrosión medida ha sido muy pequeña. La correlación buena entre los resultados obtenidos en los dos ensayos realizados, resistencia de polarización y ensayo de Tafel, se pone de manifiesto en la Figura 2, que representa la resistencia de polarización de los seis aceros frente a sus densidades de corrosión correspondientes.

Por otro lado, los ensayos potenciodinámicos se han realizado con objeto de estudiar la resistencia a la corrosión por picaduras de los mismos aceros en contacto con idéntico medio. Se definen de este modo, como parámetros más característicos, la intensidad media de la zona de pasivación, i_p , el potencial de ruptura de la capa pasiva o potencial de no pasivación, E_{np} y el potencial de repasivación E_{rp} ,

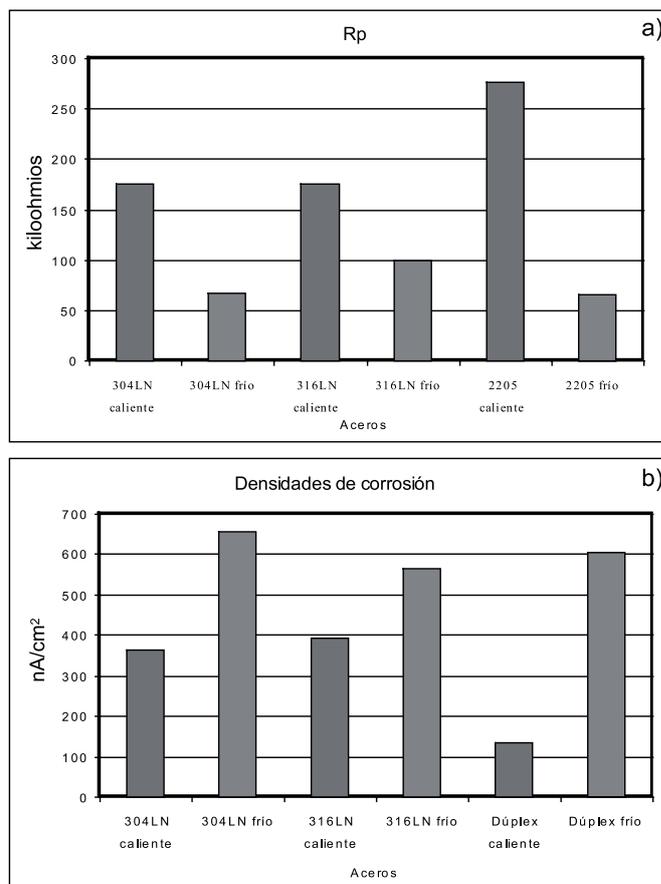


Figura 1. Cuantificación de la velocidad de corrosión uniforme. a) resistencia de polarización, $k\Omega\text{ cm}^2$, b) densidad de corriente de corrosión, nA/cm^2 .

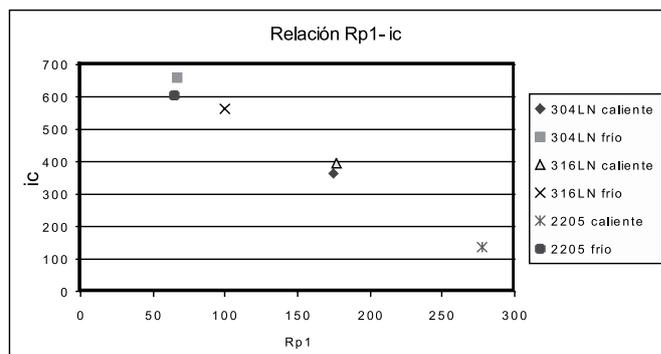


Figura 2. Correlación entre los resultados de los ensayos de medida de la resistencia de polarización, R_p ($k\Omega\text{ cm}^2$) y la densidad de corriente de corrosión determinada en el ensayo de Tafel, i_c (nA/cm^2).

aparte del potencial de corrosión, E_c . La Figura 3 muestra, a modo de ejemplo, la curva potenciodinámica cíclica obtenida en el caso de las barras corrugadas en caliente del acero AISI 316LN. La diferencia entre el potencial de ruptura de la capa pasiva y el potencial de corrosión cuantifica la resistencia a la corrosión por picaduras de cualquier combinación aleación-medio ambiente, mientras que la diferencia entre los potenciales de ruptura de la capa pasiva y el de repasivación define el rango de potenciales en los que puede producirse corrosión por picaduras, de modo que, desde un punto de vista práctico, interesa que esta diferencia sea lo menor posible.

La Tabla III recoge los valores medios de todos estos parámetros. Se pone de manifiesto la menor intensidad media de corrosión en la región pasiva (i_p) de las barras corrugadas en caliente frente a las barras corrugadas en frío (de cualquier manera, todos estos productos presentan valores muy pequeños) y es especialmente destacable el muy inferior comportamiento frente a la corrosión por picaduras de las barras de acero AISI 304LN, tanto corrugadas en caliente como en frío, que se cuantifica en unos valores muy bajos (negativos) del potencial de repasivación y en el amplio rango de potenciales en el que se manifiesta el fenómeno de corrosión por picaduras ($E_{np} - E_{rp}$), que deben ser atribuidos a la ausencia de molibdeno en la composición química de estos aceros.

TABLA III: PARÁMETROS POTENCIODINÁMICOS DE CORROSIÓN. E_c : POTENCIAL DE CORROSIÓN, i_p : DENSIDAD MEDIA DE CORROSIÓN EN LA REGIÓN PASIVA, E_{np} : POTENCIAL DE ROTURA DE LA CAPA PASIVA Y E_{rp} : POTENCIAL DE REPASIVACIÓN.

	E_c (mV)	i_p ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_{np} (mV)	E_{rp} (mV)	$E_{np} - E_{cor}$ (mV)	$E_{np} - E_{rp}$ (mV)
304LN cal	-165	4.7	615	-136	780	751
316LNcal	-313	4.9	543	515	856	28
D2205cal	-341	4.9	557	495	898	62
304LNfrío	-248	17.4	563	-182	811	745
316LNfrío	-228	14.8	551	533	779	18
D2205frío	-236	16.2	573	531	809	42

4. CONCLUSIONES

La velocidad de corrosión de las barras de acero inoxidable, austenítico y dúplex, en presencia de un medio acuoso simulativo del hormigón contaminado con sal es muy pequeña, apreciándose, sin embargo, un peor comportamiento de las barras corrugadas en frío. En relación a la susceptibilidad a la corrosión por picaduras, solo las barras de acero AISI 304LN muestran un comportamiento preocupante, mientras que las barras de acero inoxidable AISI 316LN y de acero dúplex se caracterizan por una gran capacidad de repasivación en contacto con este medio.

Por otro lado, las armaduras de acero inoxidable dúplex muestran unas propiedades resistentes apreciablemente superiores a las de los aceros inoxidables austeníticos, que además, se pueden incrementar de manera apreciable por conformado en frío.

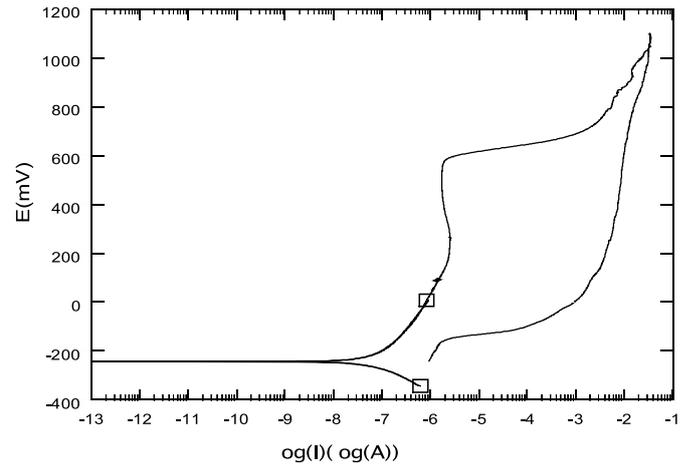


Figura 3. Curva potenciodinámica cíclica de la barra corrugada en caliente del acero AISI 316LN.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación de este trabajo, que se ha sido realizado en el marco del proyecto FEDER 1FD97-1525 y también el suministro de las barras del acero objeto de estudio por parte de la empresa ROLDAN S.A. (Ponferrada).

6. BIBLIOGRAFIA

1. A Knudsen. "Cost effective enhancement of durability of concrete structures by intelligent use of stainless steel reinforcement, Proc. of the Int. Conf. on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Orlando (E.E.U.U.) 1998.
2. L. Bertolini. "Stainless steel in reinforced concrete structures, 2nd Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions", Vol. 1, Tromso, Noruega 1998.
3. The Concrete Society. "Guidance on the use of stainless steel reinforcement", Concrete Society Technical Report 51, 1998.
4. ASTM G59. "Standard practice for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02, E.E.U.U., 1992
5. ASTM G61. "Standard test method for conducting cyclic potentiodynamic polarization measurements for localized corrosion susceptibility of iron-, nickel-, or cobalt-based alloys", Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, E.E.U.U., 1992
6. D. McDonald et al. "Corrosion-resistant reinforcing bars findings of a 5-year FHEA study". Proc. of the Int. Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Orlando (EEUU) 1998.
7. BS 6744. "British standard specification for austenitic stainless steel bars for the reinforcement of concrete", British Standards, Reino Unido, 1986.

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03