

COMPORTAMIENTO A FRACTURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS UTILIZADOS COMO MATERIAL DE REFUERZO EN HORMIGÓN ARMADO

H. Castro, C. Rodríguez, F.J. Belzunce*

Universidad de Oviedo

Depart. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, * Depart. de Ciencia de Materiales
Edificio Departamental Oeste, Bloque 7
Campus Universitario, 33203 Gijón

Resumen. Recientemente se han empezado a utilizar aceros inoxidable austeníticos como elementos de refuerzo de hormigón en construcciones civiles especiales con el fin de garantizar una larga vida frente a la corrosión. En este trabajo se ha realizado la caracterización mecánica completa de barras corrugadas de dos aceros inoxidable austeníticos, grados 304LN y 316LN, obtenidas tras procesos de conformado tanto en caliente como en frío. Se han obtenido sus propiedades mecánicas convencionales, se ha determinado la influencia de la presencia de la región corrugada sobre las mismas y también se ha caracterizado el comportamiento a fractura de estas barras a partir de la determinación de sus curvas J-R. Finalmente se explican los problemas que aparecen en el curso de la realización de estos últimos ensayos en virtud de la alta tenacidad típica de estos materiales (barras laminadas en caliente) y se justifican los resultados obtenidos teniendo en cuenta el proceso de fabricación utilizado en cada caso.

Abstract. Austenitic stainless steels are been recently used as reinforcing bars in concrete in especial civil constructions in order to increase their expected life in corrosion environments. The whole mechanical characterization of two kinds of austenitic stainless steel rebars, 304LN and 316LN grades, obtained after hot and cold rolling schedules, was performed. Their mechanical properties and the influence on them of the rib region were obtained and, also, the fracture behaviour of these bars was determined by means of their J-R curves. Finally, all the problems encountered during the performance of these last experiments, which are mainly due to the very high toughness typical of these materials (hot rolling bars) were described. All the results have been justified taking into account the fabrication method employed in each case.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de acero inoxidable en construcción ha venido ganando relevancia como sustituto del acero al carbono convencional en el armado de hormigón, en aquellos casos en que las condiciones de servicio presentan un riesgo de corrosión elevado [1], riesgo que se acentúa si el material ha de trabajar en presencia de altas concentraciones de ion cloruro (ambientes marinos, sales utilizadas para el deshielo, etc.).

Demostrado el hecho de que el aumento de coste inicial de la estructura debido al empleo de acero inoxidable se ve ampliamente compensado, a largo plazo, por el ahorro que supone la disminución de operaciones de

control y reparación de la estructura a lo largo de su vida [2], en la pasada década ha comenzado a ser habitual el uso de barras corrugadas de acero inoxidable como refuerzo de las estructuras de hormigón expuestas a altas concentraciones de ion cloruro [3,4,5].

Dentro de los diferentes tipos de inoxidable, los más utilizados en el armado de hormigón son los inoxidable austeníticos, que combinan una excelente resistencia a la corrosión con unas adecuadas propiedades mecánicas, sobre todo si se utilizan los grados LN, que se caracterizan por poseer un contenido en carbono muy bajo (lo que previene la corrosión intergranular y mejora la soldabilidad) y por estar aleados con

nitrógeno, elemento que aumenta su resistencia mecánica.

No obstante, y aunque el empleo de estos materiales comienza a ser cada vez más frecuente, son pocos los países que tienen una normativa específica completamente desarrollada para armaduras de acero inoxidable [6,7,8], lo que motiva una cierta reticencia a su uso por parte de los técnicos, que se encuentran con un material prácticamente desconocido en este tipo de aplicaciones, apoyado por una normativa poco desarrollada y a veces inexistente, y al que en muchas ocasiones no saben que propiedades exigir.

En un intento de clarificar la situación anteriormente expuesta, en este trabajo se ha realizado un amplio trabajo experimental conducente al análisis del comportamiento mecánico a fractura de los dos tipos de acero inoxidable austenítico (AISI 304LN y AISI 316LN) utilizados con más frecuencia en el armado de hormigón.

2.MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales utilizados en este trabajo han sido dos aceros inoxidables austeníticos de los tipos AISI 304LN y AISI 316LN, suministrados en forma de barra corrugada por la empresa ROLDAN S.A.

La composición química de cada una de las dos coladas utilizadas se muestra en la tabla 1. Como puede observarse, ambos se caracterizan por un contenido en carbono muy bajo y la presencia de nitrógeno como aleante. Además, el efecto principal del molibdeno, que se adiciona al grado 316, es mejorar la resistencia a la corrosión por picaduras y en resquicios en contacto con medios que contienen cloruros.

Tabla 1. Composición química de los aceros

% Peso	C	Si	Mn	Cr	Ni
304LN	0.023	0.38	1.49	18.55	8.77
316LN	0.030	0.36	1.31	17.62	11.70
% Peso	Mo	N	Cu	S	P
304LN	0.21	0.18	0.18	0.022	0.027
316LN	2.87	0.20	0.10	0.004	0.023

Por su parte, las barras suministradas de cada uno de los dos tipos de acero, provenían de dos procesos de fabricación diferentes: barras de $\phi=12\text{mm}$ corrugadas en frío y barras de $\phi=16\text{ mm}$ corrugadas en caliente.

El proceso de corrugado en caliente parte de palanquilla de $165\times 165\text{ mm}$, que se calienta a una temperatura de unos 1250°C y seguidamente sigue un proceso de desbaste, para entrar en el tren continuo con una sección de $92\times 92\text{mm}$. En las dos últimas cajas del tren, el material sufre reducciones de 27.5% y 19% respectivamente, siendo en esta última pasada donde se imprime la corruga al redondo. El corrugado sale del tren a unos 975°C con un diámetro nominal de 16mm ,

tras lo cual se le somete a un proceso de hipertemple en agua, decapado, enderezado y corte.

Por su parte, el proceso de corrugado en frío que sufrieron las barras de $\phi=12\text{mm}$ se diferencia del anterior básicamente en los últimos estadios. Así, a partir del desbaste de $92\times 92\text{mm}$, se obtiene en el tren continuo alambión de $\phi=13\text{mm}$, que sale a una temperatura de unos 1100°C , tras sufrir en las dos últimas cajas unas reducciones de 17.2% y 15.5%, respectivamente. Seguidamente el alambión sufre un hipertemple hasta temperatura ambiente, para, tras un proceso de solubilización (1050°C), hipertemple y decapado ácido, someter al alambión a un proceso de deformación en frío que genera la corruga y el nervio en las barras, obteniéndose de este modo barras corrugadas con un diámetro nominal de 12 mm . La reducción final de área, realizada por deformación en frío resulta ser de aproximadamente el 15%.

El análisis metalográfico, realizado sobre secciones transversales y longitudinales de todos los redondos, mostró en todos ellos una microestructura totalmente austenítica, con un grano aproximadamente equiáxico y regular, e independiente de la dirección de extracción de la probeta.

Las barras laminadas en caliente presentan un grano totalmente recrystalizado, y solamente merece la pena destacar, la existencia de un grano apreciablemente más pequeño en las zonas más superficiales de la barra, especialmente en la región de la corruga, que se justifica por la mayor deformación sufrida por las citadas regiones.

En el caso de las barras corrugadas en frío, el proceso de recrystalización no ha tenido lugar y muchos granos muestran líneas de deformación, más abundantes en las regiones más superficiales (corruga). La figura 1 muestra el aspecto de la microestructura deformada en frío.

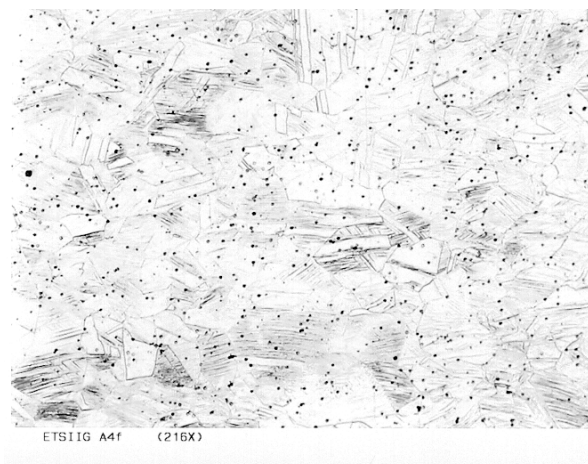


Fig. 1. Microestructura del acero AISI 304LN deformado en frío.

Por su parte, comparados los dos tipos de acero, el 304LN mostraba, tanto corrugado en frío como en caliente, un tamaño de grano ligeramente inferior al 316LN corrugado en las mismas condiciones.

3. PROPIEDADES MECÁNICAS CONVENCIONALES

Con objeto de obtener la dureza de estos materiales, se han realizado líneas de microdureza Vickers, con carga de 500g, a lo largo de varios diámetros en los diferentes tipos de corrugado. La figura 2 muestra los resultados obtenidos.

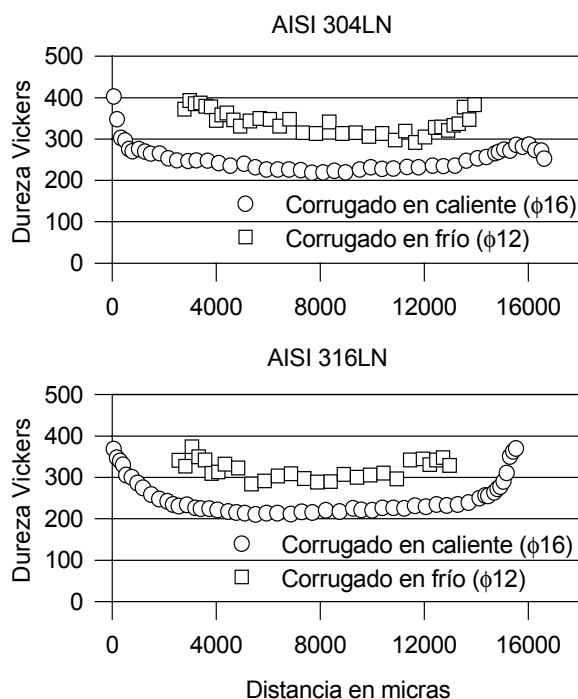


Fig.2. Líneas de microdureza Vickers de cada uno de los aceros, corrugados en caliente y en frío

En ambos aceros, y sobre todo en el caso de las barras corrugadas en caliente, se aprecia un notorio endurecimiento superficial (especialmente en la zona de la corruga), que corresponde a la zona de grano más fino que se había descrito en el comentario microestructural. De cualquier manera, la zona endurecida tiene una profundidad de tan sólo 1-2 mm. A excepción de estas regiones, la dureza de todas las barras corrugadas analizadas se mantiene aproximadamente constante a lo largo del diámetro de la misma.

Destacamos también la clara diferencia de dureza existente entre ambos aceros como consecuencia del proceso de fabricación. Como puede apreciarse en la figura 2, las barras laminadas en frío muestran una dureza casi 100 unidades Vickers mayor que las mismas barras corrugadas en caliente.

Por su parte, las propiedades mecánicas a tracción se han obtenido, para cada tipo de acero y corrugado, mediante ensayos de tracción realizados tanto sobre trozos de barra corrugada de 200 mm de longitud, como sobre probetas cilíndricas extraídas de las barras en dirección longitudinal, siendo su longitud entre referencias, para la medida del alargamiento, de 12mm (corrugado en caliente) y 8 mm (corrugado en frío).

Aunque la normativa aplicable a este tipo de elementos estructurales [6,7,8] señala que los ensayos de tracción deben realizarse sobre la probeta con corruga, el objeto del análisis del material sin corruga, es obtener las propiedades mecánicas a tracción de la zona de la barra más homogénea, sobre la que posteriormente se realizarían los ensayos de fractura, y evaluar además, el efecto de la corruga sobre las propiedades mecánicas a tracción. La tabla 2 recoge los resultados obtenidos en estos ensayos.

Tabla 2. Propiedades mecánicas a tracción

TIPO	E (MPa)	σ_E (MPa)	σ_R (MPa)	n	A (%)	Z (%)
CORRUGADOS EN CALIENTE ($\varnothing 16$)						
316LN	170867	413	738.8	---	47.4	62.8
304LN	172733	442	745.5	---	47.7	64.2
CORRUGADOS EN CALIENTE ($\varnothing 16$) SIN CORRUGA						
316LN	155335	398	720.2	0.22	50.2	77.7
304LN	155302	408	722.3	0.22	56.1	76.8
CORRUGADOS EN FRÍO ($\varnothing 12$)						
316LN	196816	711	884.4	---	24.4	44.9
304LN	178400	765	931.4	---	22.9	44.7
CORRUGADOS EN FRÍO ($\varnothing 12$) SIN CORRUGA						
316LN	155384	678	815	0.088	23.3	71.3
304LN	182777	724	880.9	0.074	22.6	66.9

Si comparamos los dos tipos de acero cuando son corrugados en caliente, puede observarse que el 316LN muestra unas propiedades mecánicas resistentes ligeramente inferiores al 304LN, diferencia que se atenúa si eliminamos la corruga, mostrando el material sin corruga una resistencia inferior al corrugado, tal como era de esperar, dado el perfil de dureza mostrado en la figura 2.

Lo mismo cabría decir respecto a los materiales corrugados en frío, siendo ahora las diferencias entre los dos tipos de acero mucho más notables, tanto cuando son ensayados con corruga como sin ella. De nuevo el 304LN muestra unas mayores propiedades resistentes, sin merma apreciable de ductilidad, en relación al 316LN, lo que podría ser debido a la mayor capacidad de endurecimiento en frío del primero [9].

Por su parte, si comparamos las propiedades de los aceros corrugados en caliente con respecto a los corrugados en frío, se observa que, como era de esperar, estos últimos muestran un importante incremento de resistencia en relación a los primeros, que es

especialmente notable en el límite elástico, valor que resulta ser un 70% superior en frío que en caliente para el acero 316LN y hasta un 77% para el 304LN en probeta sin corruga.

Destacar por último, que las propiedades resistentes de estas barras son apreciablemente superiores a las nominales de estas calidades de acero ($\sigma_R = 620\text{MPa}$ y $HV=170$, para el acero 304LN en estado de recocido) [9].

4. COMPORTAMIENTO A FRACTURA

4.1 Procedimiento experimental

El análisis del comportamiento mecánico a fractura de los materiales objeto de estudio (AISI 304LN y AISI 316LN, corrugados en frío y en caliente), se ha realizado a través de las curvas J-R representativas de cada tipo de material. Los ensayos han sido realizados sobre probetas tipo SENB obtenidas a partir de las barras corrugadas, tal como se refleja en la figura 3. Las dimensiones de las probetas ($W \times B \times L$) fueron de $10 \times 10 \times 55\text{ mm}$. en el caso de las obtenidas de barras de $\phi 16$ (corrugado en caliente) y de $8 \times 8 \times 55\text{ mm}$. para las obtenidas de barras corrugadas en frío ($\phi 12$).

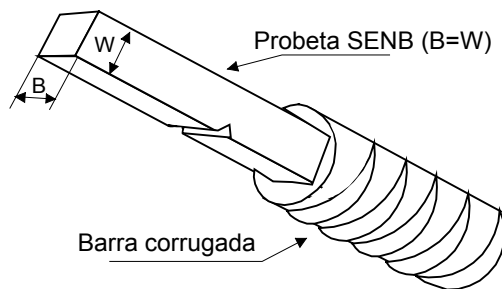


Fig. 3. Obtención de probetas para los ensayos de fractura a partir de las barras corrugadas

Como paso previo a la realización de los ensayos J-R, en cada probeta se generó una grieta por fatiga, de longitud $a/W=0.5$, en una máquina dinámica MTS de 100kN de capacidad de carga, tras lo cual se mecanizaron entallas laterales para asegurar un alto grado de triaxialidad de tensiones en el frente de la fisura.

Los ensayos J-R se realizaron de acuerdo con la Norma ESIS [10] utilizando el método uniprobeta pero complementado con el método de “tintado progresivo del frente de grieta” [11]. Mediante este método, utilizando tan sólo tres probetas se puede conseguir una curva J-R de fiabilidad equivalente a las curvas elaboradas utilizando el método multiprobeta. Para ello se realizan ensayos del tipo uniprobeta, siguiendo el procedimiento descrito por la norma ESIS [10], midiendo mediante descargas sucesivas las variaciones de flexibilidad de la probeta con ayuda de un extensómetro tipo COD, colocado en la boca de la

entalla. De este modo se puede estimar en una primera aproximación el crecimiento de la grieta a lo largo del ensayo. Además, se procede al tintado del frente de grieta en dos momentos concretos del ensayo, obteniéndose adicionalmente valores reales del crecimiento de grieta, que permiten corregir la curva obtenida por el método de la flexibilidad. Los valores reales del crecimiento de grieta se miden sobre la superficie de fractura de la probeta, una vez finalizado el ensayo, con la ayuda de un proyector de perfiles. La figura 4 muestra la superficie de fractura de una probeta tras el ensayo, pudiendo apreciarse los sucesivos frentes de grieta revelados por el proceso de tintado.



Fig. 4. Aspecto de la superficie de fractura tras un ensayo J elaborado por el método del tintado progresivo del frente de grieta.

El método de tintado progresivo del frente de grieta, resulta especialmente útil en los ensayos realizados sobre probetas tipo SENB, en los que habitualmente se observa una notoria diferencia entre el tamaño real de la grieta y el obtenido a través de la variación de flexibilidad experimentada por la probeta, diferencia que crece con la ductilidad del material.

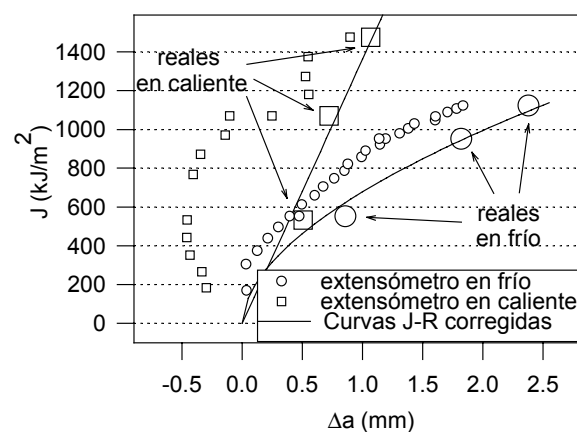


Fig. 5. Comparación de las curvas J-R obtenidas por el método de la flexibilidad y tras la corrección efectuada con el método de tintado progresivo del frente de grieta.

Así, en el caso de los materiales objeto de estudio, aunque todas las curvas obtenidas mostraban el desajuste anteriormente comentado, como puede observarse en la figura 5, éste era especialmente notorio

en el caso de las correspondientes a las probetas obtenidas de las barras corrugadas en caliente, en las que debido a su muy alta tenacidad, las curvas obtenidas por el método de la flexibilidad para las distintas probetas ensayadas eran tan dispares, que habría sido imposible definir las curvas características de estos materiales sin la medida directa de la posición del frente de grieta que permite el método de tinto progresivo.

4.2. Resultados y discusión

A partir de los ensayos anteriormente comentados se han obtenido las curvas J-R para cada tipo de acero y corrugado. Cada una de las curvas surge como resultado del ajuste del conjunto de crecimientos de grieta reales medidos en tres probetas idénticas ensayadas por el método del “tinto progresivo del frente de grieta”, es decir, con los valores de tamaño de grieta obtenidos por el método de la flexibilidad corregidos, por tramos, a los valores reales. Por tanto, se han elaborado cuatro curvas. En la figura 6 se comparan las curvas J-R correspondientes a las barras corrugadas en frío y en caliente para cada uno de los aceros.

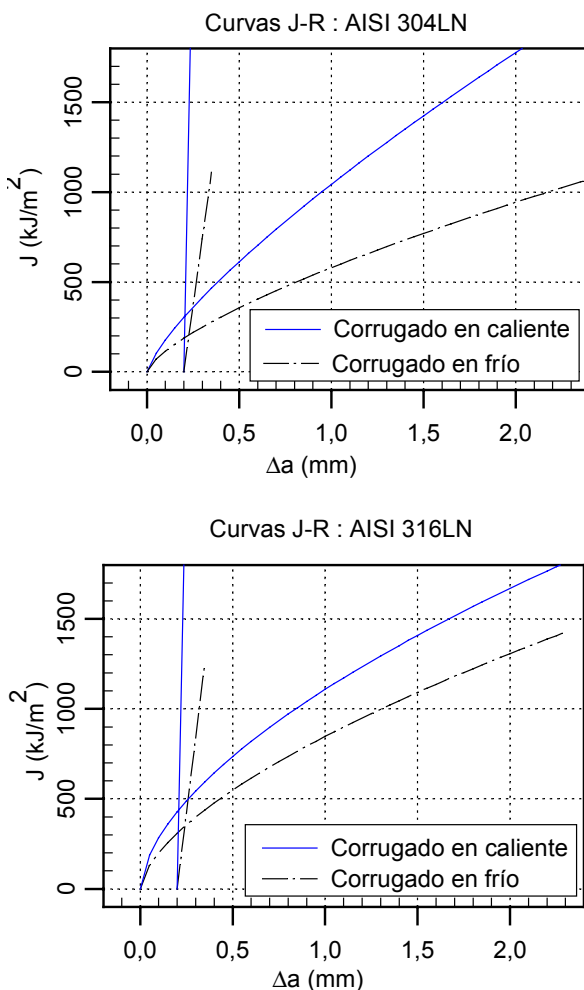


Fig. 6. Curvas J-R de los diferentes tipos de acero inoxidable analizados

En estas curvas se puede observar como la tenacidad obtenida mediante el proceso de corrugado en caliente es claramente superior a la correspondiente al corrugado en frío en ambos aceros, aunque de cualquier manera las barras corrugadas en frío también muestran una tenacidad elevada. En el caso de las barras corrugadas en caliente, de igual modo que ambos tipos de acero presentaban propiedades a tracción no muy diferentes, las curvas J-R son prácticamente idénticas. Sin embargo, en las barras corrugadas en frío, se observan apreciables diferencias entre las curvas de uno y otro acero, de modo que el AISI 316LN presenta un mejor comportamiento a fractura. Este mejor comportamiento del AISI 316LN puede justificarse tanto en función de la mayor deformabilidad (alargamiento a tracción) que se había observado en este acero, como a su menor contenido en inclusiones, como consecuencia de un menor contenido en azufre (véase Tabla 1).

Los valores críticos de J, que aparecen en la tabla 3, han sido obtenidos para una línea de enroscamiento calculada según el método propuesto en la norma ESIS P2-92 a partir del coeficiente de endurecimiento por deformación plástica (n) obtenido de los ensayos de tracción sobre probetas sin corruga. De nuevo se puede apreciar la mayor tenacidad del acero 316LN y de los corrugados en caliente frente a los corrugados en frío.

Tabla 3. Valores de J_{IC} de los diferentes materiales

J_{IC} (kJ/m ²)	316LN	304LN
CORRUGADOS EN CALIENTE (Ø16)	438	312
CORRUGADOS EN FRÍO (Ø12)	348	203

Queremos destacar finalmente que los valores de J_{IC} de las barras de acero inoxidable corrugadas en frío (304LN y 316LN) son muy superiores a los de las barras de armar convencionales de acero al carbono, que se sitúan en valores inferiores a 100 kJ/m², siendo incluso superiores a los de los aceros microaleados de bajo contenido en carbono utilizados en la fabricación de gaseoductos (J_{IC} inferiores a 200 kJ/m²), a pesar de que los valores del límite elástico de estos últimos aceros (en torno a 450-500 MPa) son también apreciablemente inferiores a los obtenidos en las barras inoxidables corrugadas en frío utilizadas en este trabajo.

5. CONCLUSIONES

Se destacan, finalmente, las siguientes conclusiones:

El proceso de conformado en frío de la corruga permite aumentar las propiedades resistentes de estos aceros, especialmente, el límite elástico (que crece entre un 70% y un 80%) y la dureza (en torno al 50%), en relación a las barras corrugadas en caliente, manteniendo al mismo tiempo una tenacidad excelente.

Este aumento de propiedades mecánicas mediante deformación en frío, es especialmente notorio en el acero 304LN, debido a la mayor capacidad de

endurecimiento por deformación de este acero, lo que ya ha sido observado por otros investigadores [9].

En el caso de aceros muy tenaces, la determinación de la curva J-R por el método uniprobeta, a partir de medidas indirectas del tamaño de la grieta en base a las variaciones de flexibilidad experimentadas por la probeta no es apropiado, siendo necesario realizar medidas directas de la situación del frente de grieta. En estos casos el tintado progresivo del frente de grieta se revela como una técnica muy útil, en virtud del ahorro económico que supone su uso frente al método multiprobeta.

6. REFERENCIAS

- [1] McGURN, J.M. "*Stainless Steels Reinforcing Bars in Concrete*" Proceedings of the Intern. Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Orlando, Dec.1998.
- [2] Knudsen, A. "*Cost effective enhancement of durability of concrete structures by intelligent use of stainless steels reinforcement*" Proceedings of the Intern. Conf. on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Orlando, Dec.1998
- [3] Bertolini, L.; Pedferri, P.; Pastore, T. "*Stainless Steel in Reinforced concrete structures*" Concrete Under Severe Condition 2, Proceedings of the 2nd Intern. Conf. on Concrete under Severe Conditions, Vol.1, Tromso, Norway, June 21-24, 1998 (publicado por E&FN Spon).
- [4] THE CONCRETE SOCIETY (UK): Concrete Society Technical Report 51, "*Guidance on the Use of Stainless Steel Reinforcement*", Report of a Concrete Society Steering Committee,1998.
- [5] IP, A.K.C.; Pianca, F.; Hope, B.B. "*Application of stainless steel reinforcement for highway bridges in Ontario*" Nickel-Cobalt 97, Vol. IV: Applications and Materials Performance, pp 227-284. Editors F.N. Smith, J.F. McGurn, G.Y.Lai and V.S.Sastri, The Metallurgical Society, CIM, 1997, Montreal.
- [6] BS 6744:1986 "*British Standard Specification for Austenitic stainless steel bars for the reinforcement of concrete*", 1986
- [7] UNE-EN 10088 "*Aceros inoxidables*", 1995
- [8] prEN 10080:1999 "*Betonbewehrungsstahl-Schweissgeeigneter Betonstahl*" CEN, Bruselas, 1999.

[9] Lula, R.A. "*Stainless Steels*", American Society for Metals, USA, 1986.

[10] ESIS 92:P2, European Structural Integrity Society, Delft, Holland, 1992.

[11] Tosal, L.; Rodríguez,C.; Betegón,C.; Belzunce,F.J. "*Procedimiento experimental para la determinación de curvas J-R mediante el tintado progresivo del frente de grieta*" . VI Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas en Sólidos, Badajoz, Junio 1998, pp. 403-408.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la DGICYT por la financiación recibida a través del Proyecto FEDER 1FD97-1525. Igualmente agradecen a la empresa ROLDAN S.A. las facilidades concedidas tanto en el suministro de material como de información relativa al mismo.