

COMPORTAMIENTO A FATIGA DE ARMADURAS DE REFUERZO DE ACERO INOXIDABLE DÚPLEX SOMETIDAS A SHOT-PEENING

E. Real, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, A.F. Canteli

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, Universidad de Oviedo, Campus de Viesques, 33203Gijón, España

e-mail: cristina@uniovi.es

Tfno: 985181951. Fax 985182055

RESUMEN

En este trabajo se analiza la influencia del shot peening en el comportamiento a fatiga de barras corrugadas de acero inoxidable dúplex fabricadas tanto por laminación en caliente como por deformación en frío. Mediante la determinación experimental de las curvas S-N de las barras antes y después del shot peening se ha comprobado una importante mejora de su respuesta a fatiga debida fundamentalmente, a la inducción de un campo de tensiones residuales de compresión, pero también a la suavización de los defectos superficiales generados en el proceso de fabricación. Esta mejoría es sensiblemente mayor en los corrugados en caliente, en virtud de su mayor capacidad de deformación plástica, frente a los corrugados en frío que se encuentran fuertemente endurecidos. La obtención de un mejor comportamiento a fatiga de las barras deformadas en frío pasaría por la modificación del proceso de shot peening, de modo que éste indujese una mayor deformación plástica y, consecuentemente, unas mayores tensiones residuales superficiales de compresión.

ABSTRACT

The influence of shot peening on the fatigue properties of duplex stainless steel reinforcing bars manufactured using both hot and cold rolled processes was studied. From determination of the S-N curves of the bars before and after the process of shot peening, the experimental results show that shot peening improves the fatigue behaviour of the re-bars, due essentially to the induction of a compressive residual stress field in their surface, but also to the smoothing of the superficial flaws generated in the manufacture process. This improvement is much greater for the hot rolled bars had mainly to the greater capacity of plastic deformation of these against the deformed ones in cold that are hard strongly. A more severe peening action capable of promoting greater plastic deformation of the bar surface needs to be used to improve the fatigue resistance of cold rolled corrugated bars.

PALABRAS CLAVE: Fatiga, curvas S-N, shot peening, armaduras corrugadas, acero inoxidable dúplex.

1. INTRODUCCIÓN

Las armaduras de refuerzo de acero inoxidable dúplex son cada vez más utilizadas en el armado de estructuras de hormigón que deban soportar ambientes con fuertes concentraciones de ión cloruro (ambientes salinos) [1]. Dado que además dichas estructuras se encuentran habitualmente sometidas a cargas cíclicas, las armaduras de refuerzo deben mostrar un buen comportamiento a fatiga, lo que en muchos casos no es fácil, debido tanto a su peculiar geometría como a otros factores, tales como la presencia de tensiones residuales generadas por los propios procesos de fabricación [2]. Teniendo en cuenta que el proceso de shot peening modifica tanto las tensiones residuales como el acabado superficial de los materiales [3], en este trabajo se

analiza la influencia de la utilización de este tipo de tratamiento superficial en el comportamiento a fatiga de barras corrugadas de acero inoxidable dúplex. Además se pretende evaluar cual ha sido la contribución individual de cada uno de estos factores (tensiones residuales y acabado superficial) en la mejora global inducida por el proceso.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el trabajo se utilizaron barras corrugadas de acero inoxidable dúplex (tipo AISI 2205) que habrían sido fabricadas tanto por laminación en caliente (D2205 c) con un diámetro nominal de 16mm, como por

deformación en frío (D2205 f) cuyo diámetro nominal era de 12mm.

Parte de las barras fueron sometidas a un proceso industrial de shot peening utilizando una máquina centrífuga de 8 turbinas de 320mm de diámetro que impulsan un caudal de 275kg/min. a una velocidad angular de 3220 rpm. La granalla proyectada eran bolas de acero S-230 de 0.6mm de diámetro y el tiempo de exposición fue de aproximadamente 1.6 minutos. Las barras así tratadas se designarán como D2205csp y D2205fsp, respectivamente. En la figura 1 muestra, esquemáticamente la geometría final de las barras.

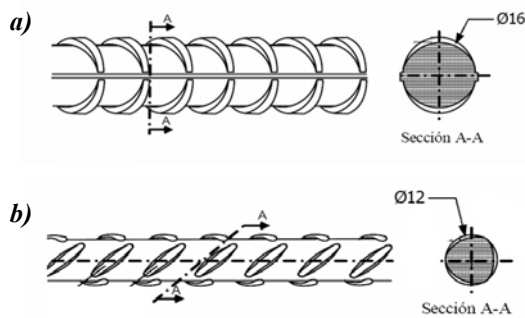


Figura 1. Geometría general de las barras: a) corrugadas en caliente, b) corrugadas en frío

La variación de la dureza a lo largo del diámetro de las barras se midió mediante ensayos Vickers con carga de 500g. Además, al objeto de discernir el tamaño de la zona superficial endurecida por el proceso de shot-peening, en dicha zona se realizaron medidas de microdureza Vickers utilizando una carga de 25g. Los ensayos de tracción se realizaron sobre trozos completos de corrugado de 200mm de longitud [4]. La caracterización a fatiga consistió en la determinación de las curvas S-N de las barras antes y después del proceso de shot peening. Para ello se realizaron ensayos de fatiga al aire, bajo una sollicitación axial de tracción y carga senoidal de amplitud constante. Se garantizó una longitud libre entre mordazas de 16 veces el diámetro nominal de la barra. Los diferentes valores de amplitud de tensiones ($\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$) se consiguieron manteniendo fija la tensión mínima en el 30% del límite elástico del material ($\sigma_{min} = 0.3 \cdot \sigma_{ys}$) y variando la tensión máxima. El ajuste de resultados y la obtención de las curvas de isoprobabilidad se realizaron utilizando el modelo de Castillo et al. [5].

La influencia del shot peening en el acabado superficial se determinó mediante el cálculo del factor de fatiga a la entalla de las barras K_f , antes y después del shot peening [6]. Para ello se llevó a cabo el recuento y medida de los defectos superficiales mediante microscopía óptica y electrónica de barrido y tras asimilar dichos defectos a grietas semi-elípticas se aplicaron los criterios de Neuber [7] y Ostash [8].

Destacar que el estudio se limitó a las regiones del acuerdo barra-corruga, por producirse en esta zona la práctica totalidad de las roturas por fatiga. La heterogeneidad y el carácter aleatorio de las poblaciones de defectos encontradas impusieron un tratamiento estadístico, por lo que se empleó una función de distribución triparamétrica de Weibull, tomando como valor para K_f el correspondiente a una probabilidad de fallo del 95%. Por su parte, la medida de tensiones residuales se realizó mediante difracción de rayos X, con radiación de Cu y conforme a la norma SAE HS-784 [9]. Dada la irregularidad de la geometría de las barras resultó imposible realizar medidas fiables en las zonas de acuerdo barra-corruga por lo que los resultados que se presentarán corresponden a la zona comprendida entre dos corrugas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los valores medios de las propiedades mecánicas a tracción de las barras. Nótese que el comportamiento mecánico a tracción de los corrugados apenas se ve alterado por el proceso de shot peening. Esto es debido a que sus efectos sobre el material son sólo a nivel superficial no afectando a las propiedades macroscópicas de las barras.

Tabla 1. Propiedades mecánicas a tracción

Material	E [GPa]	σ_{ys} [MPa]	σ_{us} [MPa]	A [%]
D2205 c	166	630	793	51
D2205 csp	165	640	798	42
D2205 f	153	965	1103	16
D2205 fsp	151	950	1111	15

Lo mismo ocurre con los valores macroscópicos de dureza en los que no se apreció diferencia entre las barras que han sido sometidas a shot-peening y las que no lo han sido. Sin embargo, y como puede observarse en la Figura 2, donde se representa la variación de la microdureza (HV25g) con la distancia a la superficie de las barras, el shot peening produce un endurecimiento superficial, que se extiende hasta una profundidad de unas 600 μm en el caso de las barras corrugadas en caliente mientras que en el caso de las corrugadas en frío el endurecimiento tan solo alcanza las 350 μm de profundidad. Este resultado se fundamenta en la mayor ductilidad y por tanto, mayor susceptibilidad a la deformación plástica, del material de las barras corrugadas en caliente frente al de sus homólogas corrugadas en frío que, de partida, se encuentra más endurecido.

Además, el endurecimiento provocado por el shot-peening en cada tipo de barra no es el mismo en todas las zonas. Nótese que los valores recogidos en la Figura 2 corresponden a medidas realizadas en la zona comprendida entre dos corrugas. Si estas medidas se realizan en otra zona los resultados son sensiblemente distintos. Así y como puede observarse en la Figura 3,

si las medidas de microdureza se realizan en la zona de la corruga, tanto la profundidad de la zona endurecida como el incremento de dureza provocado por el shot peening son sensiblemente inferiores en ambos tipos de barra, pero sobre todo en las corrugadas en frío. La explicación a este hecho se base en dos factores: el material de la zona de la corruga se muestra de partida, más endurecido y el efecto de la granalla siempre será más efectivo en la zona entre corrugas, al ser una zona más diáfana y plana.

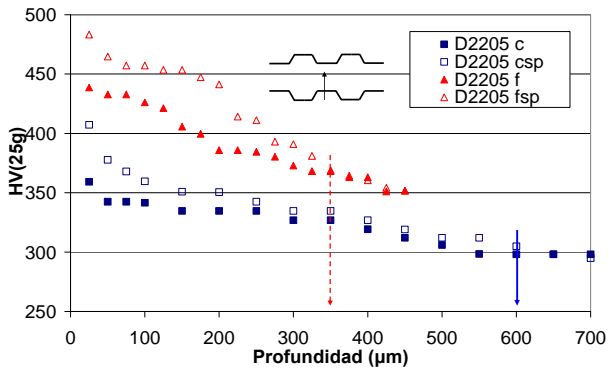


Figura 2. Variación de la microdureza Vickers (HV25g) con la distancia a la superficie de las barras en la zona entre corrugas

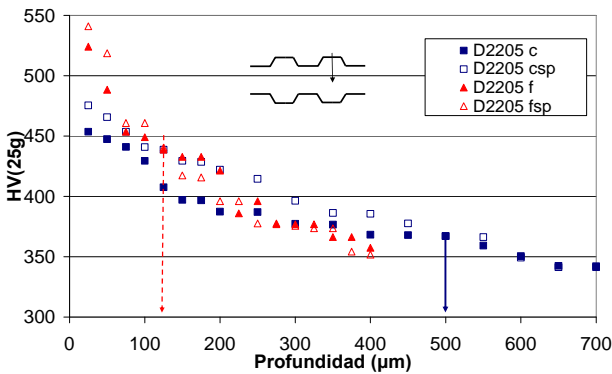


Figura 3. Variación de la microdureza Vickers (HV25g) con la distancia a la superficie de las barras en la zona de las corrugas

Por su parte, las figuras 4 y 5 muestran, respectivamente, en escala doblemente logarítmica, las curvas S-N obtenidas para las barras corrugadas en caliente antes y después del proceso de shot-peening.

Las Figura 6 y 7 recogen estos mismos resultados en el caso de las barras corrugadas en frío.

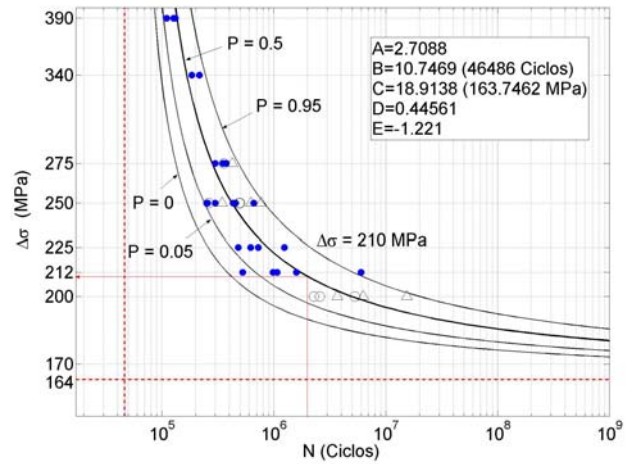


Figura 4. Curvas S-N de las barras corrugadas en caliente antes del shot peening

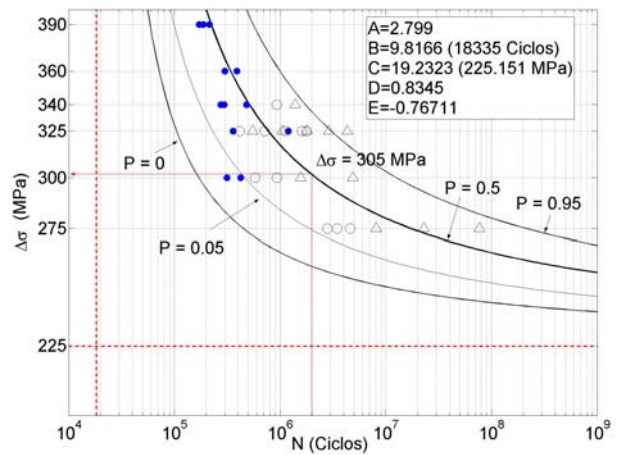


Figura 5. Curvas S-N de las barras corrugadas en caliente tras el shot peening

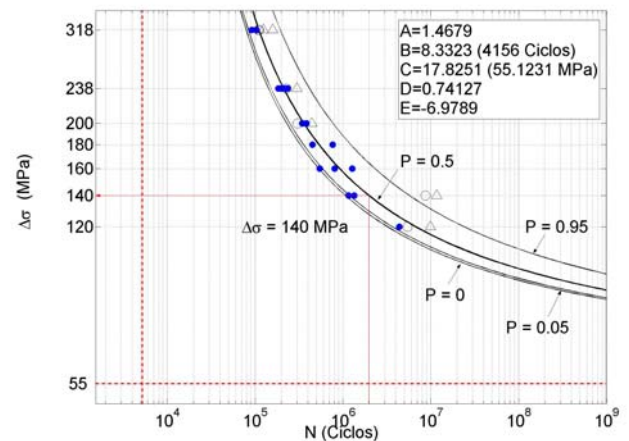


Figura 6. Curvas S-N de las barras corrugadas en frío antes del shot peening

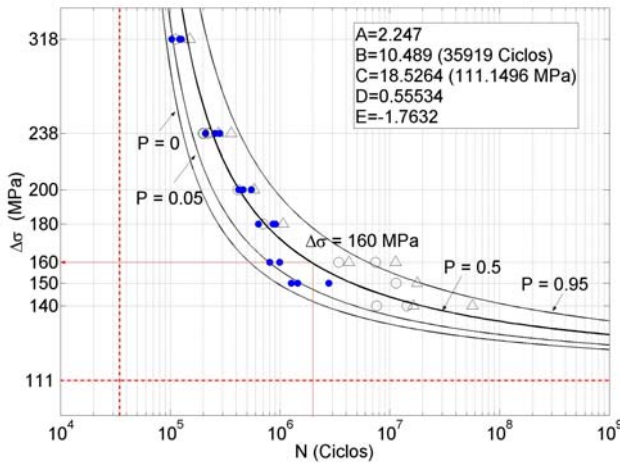


Figura 7. Curvas S-N de las barras corrugadas en frío tras el shot peening

Ambas figuras también muestran los valores de los cinco parámetros del modelo de ajuste utilizado [5] y el límite de fatiga de las barras, tanto para una vida infinita (parámetro C del modelo) como para una vida de $2 \cdot 10^6$ ciclos, $\Delta\sigma_0$ (resistencia a la fatiga). Conviene señalar que, independientemente del nivel de tensión aplicado, todas las roturas tuvieron lugar en la zona de acuerdo entre la barra y la corruga.

A la vista de estas figuras se puede concluir que el proceso de shot peening mejora el comportamiento a fatiga de ambos tipos de corrugado elevando la vida a fatiga no sólo en la zona de bajas amplitudes sino también en la de elevadas sollicitaciones.

Sin embargo, los beneficios del proceso de shot peening son mucho más notables en el caso de los corrugados en caliente (el límite de fatiga sufre un incremento de un 37 % para una vida infinita y de un 45 % para una vida de $2 \cdot 10^6$ ciclos) que para los corrugados en frío (la resistencia a la fatiga para una vida de $2 \cdot 10^6$ ciclos sufre un aumento de tan solo el 14%). Los diferentes resultados en un caso o en otro vuelven a estar fundamentados en la mayor dureza y menor susceptibilidad a la deformación plástica de las barras corrugadas en frío.

De todos modos, e independientemente del tipo de barra analizado, se puede suponer que la mejora en cuanto a comportamiento a fatiga será atribuible a los dos efectos fundamentales que produce el proceso de shot-peening sobre el material de la superficie de las barras: por un lado la modificación del acabado superficial y por otro el campo de tensiones residuales inducido en la zona superficial de las mismas.

Al objeto de discernir y cuantificar el efecto individual de cada uno de estos factores a continuación analizaremos el debido exclusivamente a la modificación del acabado superficial para

posteriormente analizar el debido a las tensiones residuales.

En la Tabla 2 se muestran los valores del factor de reducción de la vida a fatiga, K_f , calculados tanto por el criterio de Neuber como de Ostash a partir del análisis de los defectos superficiales de cada tipo de barra. Como puede observarse, tanto en el caso de las barras corrugadas en caliente como en frío, el shot peening mejora sensiblemente el acabado superficial de las barras, obteniéndose menores valores de K_f tras dicho proceso. El efecto beneficioso del shot peening en cuanto al acabado superficial de las barras puede observarse claramente en la figura 8, donde se muestran el aspecto superficial de las barras corrugadas en frío antes (a) y después (b) del proceso de shot peening. En la figura correspondiente a la barra sin granallar (figura 8.a) se pueden apreciar las estrías o defectos que presenta la barra en la dirección de laminación y que tras el proceso de shot-peening (figura 8.b) han disminuido considerablemente, mostrando la superficie una apariencia más uniforme donde quedan patentes además las huellas de los impactos de la granalla.

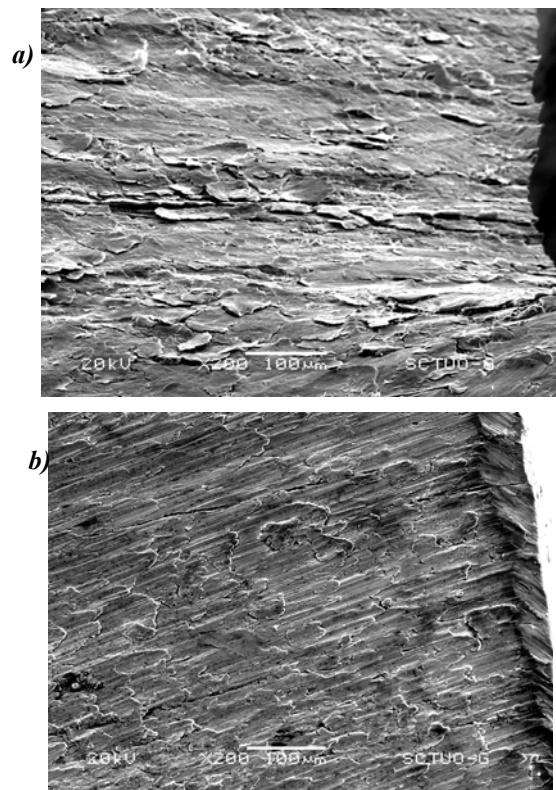


Figura 8. Aspecto superficial de las barras corrugadas en frío: a) antes del shot peening, b) tras el shot peening

Aplicando estos coeficientes a los límites de fatiga obtenidos experimentalmente para cada tipo de barra ($\Delta\sigma_0$), podemos obtener los límites de fatiga ($\Delta\sigma_L$) que teóricamente presentaría una barra lisa (sin defectos superficiales) del mismo material, pero sometida, no

obstante, tanto al efecto de la tensión media que se le haya aplicado al corrugado en cuestión, como a las posibles tensiones residuales presentes en el mismo. La expresión que representaría esta relación sería:

$$\Delta\sigma_L = K_f \cdot \Delta\sigma_0 \quad (1)$$

La Tabla 2 recoge los resultados obtenidos. Obviamente el límite de fatiga de una barra sin defectos ($\Delta\sigma_L$) debe ser superior al mostrado por una barra que los posea.

Tabla 2. Valores de K_f , $\Delta\sigma_0$ y $\Delta\sigma_L$

Material	K_f		$\Delta\sigma_0$ (MPa)	$\Delta\sigma_L$ (MPa)	
	Neuber	Ostash		Neuber	Ostash
D2205 c	1.47	1.82	210	309	383
D2205 csp	1.39	1.69	305	424	515
D2205 f	1.91	1.95	140	267	273
D2205 fsp	1.67	1.81	160	267	290

Nótese, sin embargo, que una vez efectuada esta corrección, las barras corrugadas en caliente siguen mostrando diferentes límites de fatiga antes y después del shot peening, mientras que sus homólogas corrugadas en frío ya muestran prácticamente el mismo comportamiento antes que después de ser granalladas.

Una vez corregido el efecto del acabado superficial, el diferente comportamiento a fatiga de las barras sería únicamente atribuible a la modificación del campo de tensiones residuales provocado por el shot peening.

Esta diferencia entre las tensiones residuales de las barras antes y después del proceso, se traduce, en cuanto a la caracterización experimental a fatiga se refiere, en que las barras sometidas a shot peening han soportado un nivel de tensión media (y obviamente máxima) diferente al de las barras que no han sufrido dicho proceso. Dado que existen expresiones que permiten corregir el efecto de la tensión media [10], podríamos hacer uso de dichas correcciones para evaluar el incremento de tensiones residuales que teóricamente induciría el proceso de shot peening.

En el caso de los materiales aquí empleados, la corrección más adecuada es la Ley de Walker [11] que relaciona los límites de fatiga de un determinado material, cuando han sido obtenidos a diferentes niveles de tensión media y con diferentes relaciones de tensiones mediante el cálculo de una tensión equivalente:

$$\Delta\sigma_{eq} = \sigma_{max} (1-R)^{A_3} \quad (2)$$

Donde R es la relación de tensiones y A_3 es una constante que depende del tipo de material y que en nuestro caso toma los valores recogidos en la Tabla 3.

Haciendo uso de la ecuación (2) podríamos relacionar la tensión máxima a la que estuvieron sometidas las barras durante los ensayos (y que teóricamente únicamente sería cierta para las barras sin granallar) con la que correspondería realmente a las barras granalladas que estarán afectadas por un incremento de tensiones residuales ΔTR . De este modo la ecuación (2) podría reescribirse como:

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \left(\sigma_{max}^{sp} + \Delta TR_{S-N} \right) (1-R)^{A_3} = \\ &= \left(\sigma_{max}^{sp} + \Delta TR_{S-N} \right) \left(1 - \frac{\sigma_{min}^{sp} + \Delta TR_{S-N}}{\sigma_{max}^{sp} + \Delta TR_{S-N}} \right)^{A_3} \quad (3) \end{aligned}$$

donde, σ_{max} , y σ_{max}^{sp} son las tensiones máximas aplicadas a las barras originales y a las sometidas a shot peening y ΔTR_{S-N} , simboliza el incremento de tensión residual debido a dicho proceso.

Despejando ΔTR_{S-N} de la ecuación (3) se obtiene el incremento de tensiones residuales que teóricamente induciría el proceso de shot-peening en cada tipo de barra. Los valores obtenidos en función de los criterios empleados para corregir el efecto del acabado superficial (Neuber u Ostash) se recogen en la tabla 3. En esa misma tabla se recogen, asimismo, las medidas de tensiones residuales obtenidas experimentalmente mediante difracción de rayos X.

Tabla 3. Incremento de tensiones residuales debido al proceso de shot peening

Material	ΔTR_{S-N} (MPa)		A_3	ΔTR_{DRX} (MPa)
	Neuber	Ostash		
D2205 c D2205 csp	-204	-208	0.4	-491±16
D2205 f D2205 fsp	1	-53	0.44	-316±18

Como puede observarse el incremento de tensión residual producido por el shot-peening y calculado a través de las curvas S-N es negativo o nulo en todos los casos. El proceso de shot peening induce en los corrugados tensiones residuales de compresión, que mientras que en el caso de los corrugados en caliente llegan a superar los 200MPa, en el caso de las barras corrugadas en frío apenas son perceptibles.

No obstante, el incremento de tensiones residuales así obtenido es notablemente inferior al obtenido mediante la utilización de técnicas difractométricas, TR_{DRX} , las cuales preveían un incremento de la tensión residual de

casi -500MPa para las barras corrugadas en caliente y de unos -300MPa para las deformadas en frío.

La explicación a este hecho podría fundamentarse en que las tensiones residuales obtenidas en uno u otro caso corresponden a diferentes zonas de las barras. Así, mientras que los valores obtenidos a partir de las curvas S-N corresponden a las tensiones residuales de la zona de acuerdo barra-corruga en la que se produce la práctica totalidad de las roturas por fatiga, las medidas realizadas por difracción de rayos X, fueron realizadas en una zona totalmente diferente (entre corrugas). Como ya se había advertido en la medida de microdureza (Figuras 1 y 2) el material de la corruga se encontraba, de partida, más endurecido y por lo tanto será menos sensible al efecto del tratamiento de shot-peening que el resto, lo que unido a que la zona del acuerdo, geoméricamente muy compleja, va a ser mucho menos accesible a la granalla que la zona entre corrugas (más diáfana y plana), explicaría la diferencia de medidas.

4. CONCLUSIONES

El proceso de shot peening mejora el comportamiento a fatiga de las barras corrugadas de acero inoxidable dúplex debido tanto a la inducción de un campo de tensiones residuales de compresión como a la mejora del grosero acabado superficial de las barras que inducen los procesos de fabricación convencionales.

Se ha desarrollado una metodología experimental que permite cuantificar la influencia individual de cada uno de estos dos factores en la mejora inducida por el shot peening.

La mejoría en cuanto a comportamiento a fatiga inducida por el shot peening es claramente superior en el caso de las barras corrugadas en caliente, debido a la mayor capacidad de deformación plástica de éstas frente a las deformadas en frío que se encuentran fuertemente endurecidas. Así la resistencia a la fatiga de las barras corrugadas en caliente se incrementó en un 45% mientras que en las deformadas en frío el incremento fue de tan sólo el 14%.

La mejora del comportamiento a fatiga de las barras corrugadas en frío a través de la utilización de shot peening pasaría por la optimización de este proceso de modo que indujera una mayor deformación plástica en las barras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Fomento por la financiación recibida a través del proyecto C60/06, así como a la empresa ROLDAN S.A. por el suministro del material utilizado en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Tilly G.P. *Fatigue of steel reinforcement bars in concrete: a review*. Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol2: 251-268 (1979).
- [2] J. Ruiz, J.M. Atienza, M. Elices. *Residual stresses in wires: influence of wire length*. Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 12(4), pp. 480-489, (2003)
- [3] Gao Y., Lu F., Yin F. and Yao. *Effects of shot peening on fatigue properties of 0Cr13Ni8Mo2Al steel*. Materials science and technology Vol. 19, 372-374 (2003)
- [4] ISO/CD 15630-1. 2 (1998): *Steel for the reinforcement and prestressing of concrete –Test methods- Part 1: Reinforcing bars and wires*.
- [5]Castillo E, F.Canteli, A, Esslinger, V, Thürlimann, B. *Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires, Strands and Cables Zürich*, IABSE Proceedings 82/8 (1985).
- [6] Real E. *Influencia de la tensión media y del proceso de fabricación en el comportamiento a fatiga de barras corrugadas de acero inoxidable dúplex*. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. (2007)
- [7] Neuber, H. *Theory of notch stress*. J.W. Edwards, Publisher, Inc., Ann Arbor, Michigan (1946)
- [8] Ostash, O.P.; Panasyuk, V.V. *Fatigue process zone at notches*. International Journal of Fatigue 23, pp. 627-636 (2001)
- [9] SAE HS-784 *Residual stress measurement by X-ray diffraction*. (2003).
- [10] Bannantine J, Comer J, Handrock J. *Fundamentals of metal fatigue analysis*. Prentice Hall (1990)
- [11] Walker, K. Subcommittee E-9V Winter Meeting (1969).
- [12] E. Real, C. Rodríguez, A. Canteli, J. Belzunce, M. Aenlle. *Efecto de la tensión media en el comportamiento a fatiga de barras corrugadas de acero inoxidable dúplex*. Anales de Mecánica de Fractura, Vol. (22), 353-359 (2005)