

EFFECTO DEL SHOT PEENING EN EL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

P. Sanjurjo, C. Rodríguez, I. F. Pariente, F. J. Belzunce

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, Universidad de Oviedo, Campus de Viesques, 33203 Gijón, España
e-mail: ppsanjurjo@uniovi.es
Tfno: 985181951. Fax 985182055

RESUMEN

Para la realización de este trabajo, se seleccionó un acero inoxidable austeno-ferrítico tipo AISI 2205, utilizado para la fabricación de armaduras de refuerzo, y se sometió a distintos tratamientos de shot peening, con el fin de estudiar el efecto de dichos tratamientos sobre el comportamiento a fatiga del material. Para ello, se controlaron minuciosamente parámetros tales como la intensidad Almen, el grado de cobertura o el tipo de proyectil utilizado. A continuación, se utilizó la técnica de difracción de rayos X para caracterizar el campo de tensiones residuales de compresión generado tras cada tratamiento. Por último, se determinaron experimentalmente las curvas de Wöhler correspondientes a los distintos tratamientos realizados, y se compararon con las curvas obtenidas para el material sin tratar.

ABSTRACT

In this work an AISI 2205 duplex stainless steel, already largely used to make reinforcing bars, was the material choice. The bars were manufactured using both hot and cold rolled processes, and afterwards different shot peening treatments were used, which were fully characterised by means of the Almen intensity, the coverage ratio and the type of shot used in each case. Residual stresses were also measured by means of X-ray diffraction. The S-N fatigue curves of the bars submitted to the different shot peening treatments were determined and the improvement due to shot peening explained taking into account the shot peening effects on the surface of the bars.

PALABRAS CLAVE: acero inoxidable dúplex, shot peening, intensidad Almen, tensiones residuales

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de mejorar el comportamiento en servicio de las estructuras, el acero inoxidable está siendo cada vez más utilizado para el armado de grandes estructuras de hormigón sometidas a ambientes salinos. Además, es habitual que dichas estructuras se encuentren sometidas a la acción de cargas cíclicas, por lo que se debe garantizar también un buen comportamiento a fatiga [1].

Uno de los procesos más utilizados industrialmente para mejorar el comportamiento a fatiga de los componentes metálicos es el shot peening [2]. En este tratamiento, la deformación plástica producida por el impacto de gran cantidad de pequeños proyectiles esféricos sobre la superficie de un elemento metálico, genera un campo de tensiones residuales de compresión que resulta beneficioso desde el punto de vista del comportamiento a fatiga. Otra consecuencia directa del tratamiento es la modificación del acabado superficial [3], hasta el punto de que, en ocasiones, la rugosidad superficial generada puede afectar negativamente al comportamiento a fatiga.

En este trabajo se analiza cómo el efecto adverso producido por la rugosidad superficial generada tras realizar un tratamiento de shot peening, puede llegar a

contrarrestar el efecto positivo producido por el campo de tensiones residuales de compresión que se genera tras dicho tratamiento.

Para ello en primer lugar, se sometieron las barras corrugadas a un tratamiento de shot peening industrial. A continuación, se mecanizaron probetas con un buen acabado superficial, con el fin de eliminar el efecto de las corrugas y defectos iniciales. Dichas probetas se sometieron a un tratamiento de shot peening más controlado y de mayor intensidad. El campo de tensiones residuales de compresión generado tras cada tratamiento, se caracterizó mediante la técnica de difracción de rayos X. Por último, se determinaron experimentalmente las curvas S-N correspondientes a los distintos tratamientos de shot peening realizados, y se compararon con las curvas obtenidas con el material sin tratar. De este modo, se obtuvo información sobre la influencia del shot peening sobre el comportamiento a fatiga de las barras de refuerzo de acero inoxidable dúplex.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la realización de este trabajo, se utilizó un acero inoxidable austeno-ferrítico tipo AISI 2205. Este material nos fue suministrado en forma de barras corrugadas que habían sido fabricadas tanto por laminación en caliente como por deformación en frío. Este acero se emplea habitualmente en la fabricación de armaduras de refuerzo en casos en los que la estructura se encuentra expuesta a ambientes salinos, y se caracteriza por su microestructura dúplex que le confiere unas elevadas propiedades mecánicas junto con una alta resistencia a la corrosión [4]. Dado que el proceso de fabricación propio de cada tipo de armadura les confiere unas propiedades características, hablaremos de dos tipos de materiales distintos, que se designarán como D2205c (dúplex laminado en caliente) y D2205f (dúplex deformado en frío) [5]. En la tabla 1 se recogen los valores medios de las propiedades mecánicas a tracción de las barras.

Tabla 1. Propiedades mecánicas a tracción

Material	E [GPa]	σ_{ys} [MPa]	σ_{us} [MPa]	A [%]
D2205c	166	630	793	51
D2205f	153	965	1103	16

El proceso de shot peening industrial, llevado a cabo por la empresa *Roldán S.A.*, se realiza bombardeando las barras corrugadas con bolas de acero fundido de tamaño S-230, utilizando una máquina centrífuga de 8 turbinas. Por su parte, en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón se diseñó un segundo tratamiento de shot peening, que fue realizado en laboratorio en condiciones controladas estrictamente. Para ello se utilizó una máquina neumática de proyección por presión directa, que puede operar con presiones de trabajo entre 1.5 y 6 bar. Con el fin de poder comparar resultados, también se utilizaron proyectiles de acero fundido tipo S-230, en conformidad con las especificaciones de SAE J444 [6]. Con el fin de obtener un tratamiento de shot peening de alta calidad, dichos proyectiles fueron minuciosamente caracterizados, en cuanto a su tamaño y forma, mediante análisis de imágenes.

En ambos tratamientos, la intensidad Almen se determinó siguiendo la regla del 10%, de acuerdo con las especificaciones SAE J442 [7] y SAE J443 [8]. Se utilizaron placas Almen tipo A, grado 2, firmemente sujetas a los correspondientes bloques Almen, así como un medidor Almen digital con una precisión de 0.001 mm y soporte de sujeción magnético.

Para obtener la intensidad Almen de cada tratamiento, se ajustaron los datos experimentales mediante una ecuación de 4 parámetros:

$$h = a \cdot (1 - e^{-b \cdot t^c}) + d \cdot t \quad (1)$$

siendo h la flecha medida en la placa Almen, t el tiempo de exposición a los proyectiles y a , b , c y d los cuatro parámetros de la curva, que se obtienen por iteración mediante métodos numéricos.

Por otro lado, también se comprobó experimentalmente que el grado de cobertura se ajustaba con gran exactitud a la siguiente ecuación (2), conocida como Ecuación de Avrami:

$$C = 100 \cdot (1 - e^{-A \cdot R \cdot t}) \quad (2)$$

donde C representa la cobertura (porcentaje de superficie que ha sido impactada al menos una vez), A el área de cada huella individual, R el ratio de flujo (número de huellas creadas por unidad de tiempo y unidad de superficie) y t el tiempo de exposición.

En todos los tratamientos de shot peening se alcanzó una cobertura teórica de 98%, lo que en la práctica se identifica con la cobertura total.

Mientras que el shot peening industrial se realizó sobre las propias barras corrugadas, esquematizadas en la figura 1, el shot peening controlado se llevó a cabo sobre probetas mecanizadas como la mostrada en la figura 2. En estas probetas, se eliminó totalmente la corruga, con el fin de apreciar el efecto que ésta tiene sobre el comportamiento a fatiga del material, al eliminar el efecto de la geometría y del tosco acabado superficial que presentan las barras.

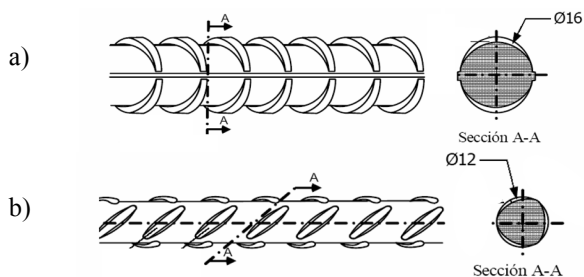


Figura 1. Esquema de las barras corrugadas: a) corrugadas en caliente, b) corrugadas en frío

A continuación, se utilizó la técnica de difracción de rayos X para caracterizar el campo de tensiones residuales de compresión generado tras cada tratamiento. Estas medidas se llevaron a cabo con el soporte técnico del Politécnico de Milán, Italia. Los ensayos se realizaron en modo ψ según la norma SAE HS-784 [9].

Por último, con el fin de estudiar el efecto del shot peening sobre el comportamiento a fatiga del material, se determinaron experimentalmente las curvas S-N correspondientes a los dos tratamientos realizados, y se compararon con las curvas obtenidas para el material sin tratar. Puesto que el fenómeno de la fatiga tiene un gran componente aleatorio, para caracterizar el campo de Wöhler se utilizó un modelo matemático que incluye

información estadística acerca de la vida a fatiga (modelo de *Castillo et al*) [10].

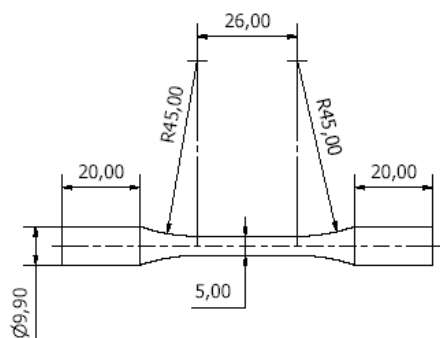


Figura 2. Esquema de las probetas mecanizadas sometidas a shot peening controlado

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Tratamientos de Shot Peening

En la figura 3 se muestra la curva de saturación obtenida para el tratamiento de shot peening industrial. Las medidas se llevaron a cabo en las instalaciones de la empresa fabricante de las barras *Roldán S. A.*, resultando una intensidad Almen de 0.13 mmA.

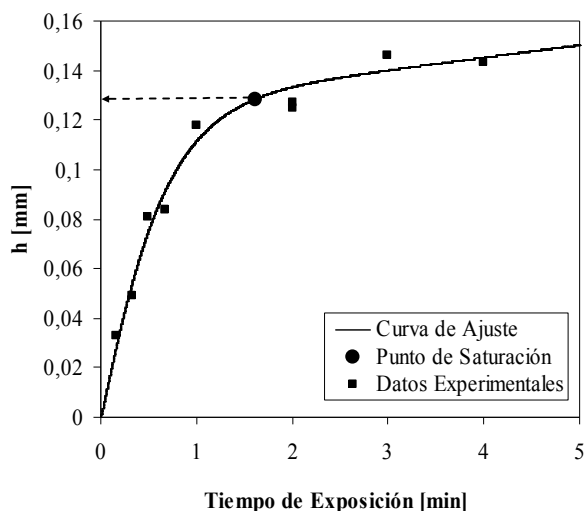


Figura 3. Curva de saturación del tratamiento de shot peening industrial (0.13 mmA)

Estudios anteriores [11] demostraron que el acero dúplex deformado en frío se ve muy poco afectado por los tratamientos de shot peening de baja intensidad, por lo que se optó por diseñar un nuevo tratamiento con una intensidad sensiblemente superior a la utilizada industrialmente. En la figura 4 se representa la curva de saturación para este nuevo tratamiento, diseñado en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón, con una intensidad de 0.33 mmA. Como se puede apreciar, en ambos casos el ajuste conseguido mediante la ecuación (1) es excelente.

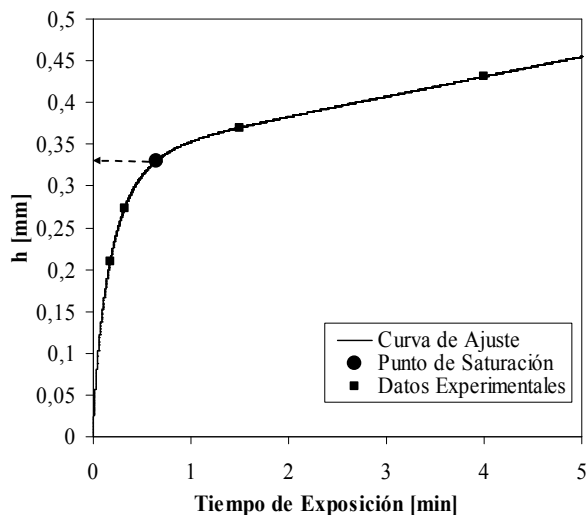


Figura 4. Curva de saturación del tratamiento de shot peening controlado (0.33 mmA)

3.2. Tensiones residuales

En la tabla 2 se recogen los resultados de las medidas de tensiones residuales realizadas sobre la superficie de las barras corrugadas antes de ser sometidas a shot peening. Aunque la mayor parte de las roturas durante el proceso de fatiga tienen lugar en la zona de acuerdo entre las corrugas y el cuerpo de la barra, las medidas de tensiones residuales tuvieron que ser realizadas en la zona de barra comprendida entre dos corrugas, ya que la complicada geometría de la zona del acuerdo entre la barra y la corruga hace prácticamente imposible la toma de resultados en esa zona. Los valores mostrados en la tabla 2, son los resultantes de aplicar la regla de las fases, pues, dado el carácter bifásico del acero inoxidable dúplex, las mediciones se llevaron a cabo tanto en la fase austenita como en la ferrita.

Tabla 2. Valores de tensión residual axial medidos sobre las barras corrugadas de acero inoxidable dúplex

	Tensión residual axial [MPa]	
	Sin tratar	Shot peening industrial
D2205c	155±14	-336±18
D2205f	-149±22	-465±14

Como se puede apreciar, mientras que las barras corrugadas en caliente (D2205c) presentan tensiones residuales de tracción de unos 155 MPa, sus homólogas corrugadas en frío muestran valores muy similares, pero de compresión (-149 MPa). De todos modos, dada la gran dificultad técnica encontrada para llevar a cabo estas mediciones, estos valores deben ser admitidos con cierta cautela.

De manera análoga, se midieron las tensiones residuales generadas sobre la superficie de las barras tras ser sometidas al tratamiento de shot peening industrial. Las medidas también se realizaron en la zona comprendida entre dos corrugas, y los resultados también se recogen

en la tabla 2. Como puede observarse, tanto en el caso de los corrugados en caliente como en frío, el proceso de shot-peening induce unas fuertes tensiones residuales de compresión. De este modo, las barras corrugadas en caliente alcanzan valores de -336 MPa, y de -465 MPa las corrugadas en frío. Comparando estos valores con los que presentaban estas mismas barras antes del tratamiento, se obtiene el incremento de tensiones residuales debido al shot peening industrial en torno a -481 MPa para el caso de las barras corrugadas en caliente y de -316 MPa para las deformadas en frío.

En definitiva, el efecto del tratamiento de shot peening industrial es más acusado en el acero corrugado en caliente, lo que parece razonable, por tratarse de un material de menor dureza y mayor ductilidad que su homólogo deformado en frío. Conviene insistir, una vez más, en que la dificultad de las mediciones hace que todos estos valores correspondan a una zona muy concreta de la superficie de las barras (zona entre corrugas), con las limitaciones que esto supone.

A la vista de los resultados obtenidos, y dada la complejidad que envuelve este tipo de medidas, se optó por eliminar el problema de la geometría y realizar, tanto el tratamiento de shot peening controlado como las medidas de las tensiones residuales, sobre superficies planas obtenidas tras cortar transversalmente las barras. De este modo, para el corrugado en caliente se midió el gradiente de tensiones residuales hasta una profundidad de 350 μm , mientras que para el corrugado en frío la profundidad alcanzada fue de 160 μm . Para verificar la isotropía del tratamiento, todas las medidas se realizaron en tres direcciones (0° , 45° y 90°) y sobre las dos fases (ferrita y austenita). En la figura 5 se muestra el perfil de tensiones residuales obtenido.

Como puede observarse, el perfil de tensiones residuales es el típico de estos tratamientos, alcanzándose, para ambos materiales, una tensión máxima de compresión a una profundidad aproximada de 0.04 mm, si bien en el caso del corrugado en caliente el valor máximo obtenido (-740 MPa) es ligeramente superior al obtenido para el corrugado en frío (-685 MPa). Conviene tener presente de nuevo, la mayor dureza y la menor capacidad de deformación de los corrugados en frío. Por otro lado, el perfil de los gradientes indican que la zona superficial de material sometida a tensiones residuales de compresión es mucho mayor (prácticamente el doble) en el corrugado en caliente.

Por otro lado, como información adicional a la medida de tensiones residuales, se obtuvieron medidas del parámetro FWHM. Este valor está relacionado con la distorsión de los granos, con la densidad de dislocación y con las microtensiones residuales. Se suele considerar que este parámetro es un índice del endurecimiento del material, de modo que cuanto mayor es el parámetro FWHM, mayor es el endurecimiento de la superficie [12].

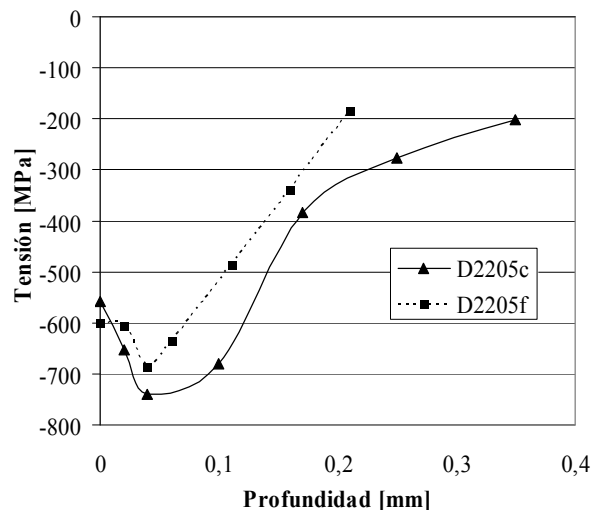


Figura 5. Perfil de tensiones residuales obtenido sobre probetas mecanizadas sometidas a un tratamiento de shot peening controlado de 0.33 mmA

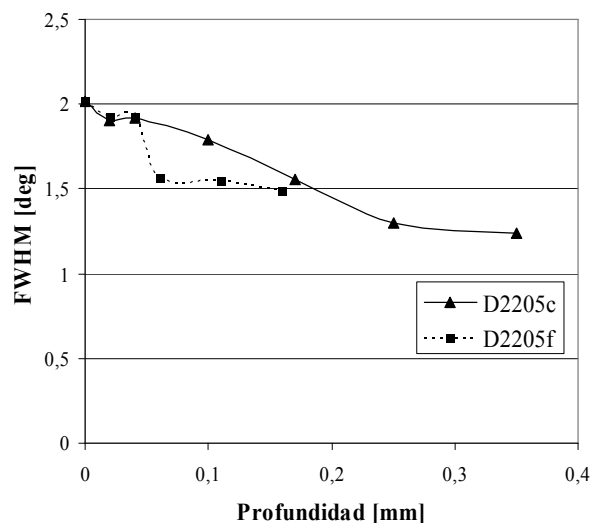


Figura 6. Evolución del parámetro FWHM sobre probetas mecanizadas sometidas a un tratamiento de shot peening controlado de 0.33 mmA

La figura 6 muestra cómo, en el dúplex laminado en caliente, el parámetro FWHM se estabiliza en torno a una profundidad de 400 μm , lo que indica que el tratamiento de shot peening ha producido una capa deformada plásticamente de un espesor de 400 μm . Sin embargo, en el dúplex deformado en frío, dicho parámetro se estabiliza en valores próximos a las 50 μm , lo que hace pensar que en este caso, el espesor de la capa endurecida por deformación plástica es de aproximadamente 50 μm .

3.3. Comportamiento a Fatiga

Tanto sobre las barras como sobre las probetas mecanizadas, se llevaron a cabo ensayos de fatiga bajo una sollicitación axial de tracción y carga senoidal de amplitud constante. Los distintos valores de la amplitud

de tensiones se obtuvieron manteniendo fija la tensión mínima y variando la tensión máxima. Para corregir el efecto de la tensión media se tuvo en cuenta la Ley de Walker:

$$\Delta\sigma_{eq} = \sigma_{\max} (1 - R)^{A_3} \quad (3)$$

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 de 0.4 para el material laminado en caliente y 0.44 para el deformado en frío [13].

En la figura 7 se representan las curvas S-N, corregidas según la ecuación (3), para una probabilidad de fallo del 50% correspondientes a la barra corrugada en caliente antes de ser sometida a shot peening (D2205c), la barra corrugada sometida a shot peening industrial de 0.13 mmA (D2205c + SP industrial), la probeta mecanizada antes de ser sometida a shot peening (D2205 Sin Corruga) y la misma probeta tras ser sometida a shot peening controlado de intensidad 0.33 mmA. De manera análoga, la misma información se recoge en la figura 8 para el material deformado en frío.

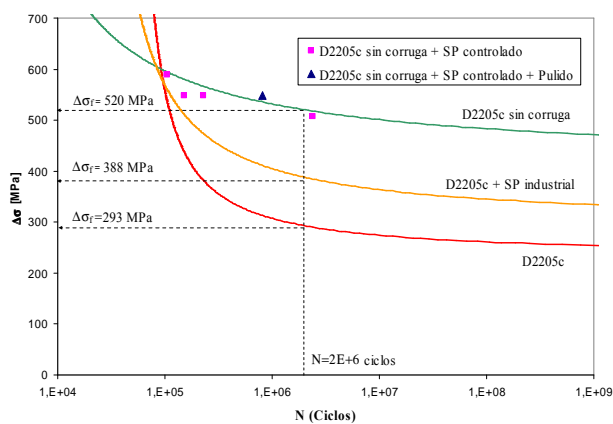


Figura 7. Curvas S-N correspondientes al acero D2205c para una probabilidad de fallo del 50%

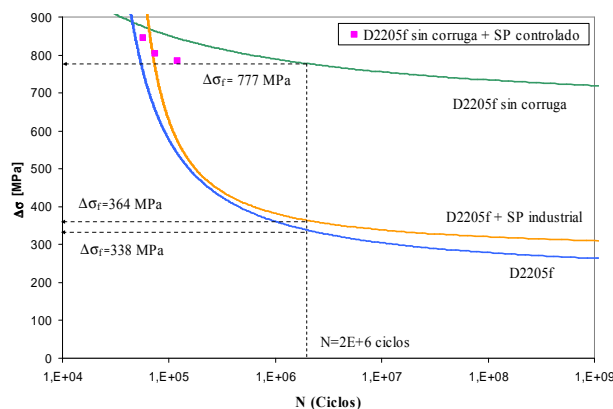


Figura 8. Curvas S-N correspondientes al acero D2205f para una probabilidad de fallo del 50%

Como se puede apreciar, el tratamiento de shot peening industrial produce una mejora en el comportamiento a fatiga de ambos tipos de corrugado, elevando la vida a

fatiga, no sólo en la zona de bajas amplitudes de tensión, sino también en la de elevadas solicitaciones. Esta mejora es debida, por un lado al campo de tensiones residuales de compresión generado, y por otro lado, al hecho de que, en este caso, el shot peening ha mejorado el acabado superficial de la barra, pues ésta, inicialmente, presentaba un acabado muy tosco e irregular.

En la figura 9 puede observarse cómo el aspecto superficial que mostraban las barras antes del tratamiento de shot peening (Fig.9.a) en la que se aprecian perfectamente las estrías en dirección de laminación, ha mejorado notablemente tras la realización de dicho tratamiento (Fig.9.b). No obstante, mientras que el incremento es notable en el caso de las barras corrugadas en caliente, las barras deformadas en frío muestran una mejora mucho más reducida. Este hecho se debe a la menor capacidad de deformación que tiene el material deformado en frío, lo que le hace ser menos sensible a los tratamientos de shot peening.

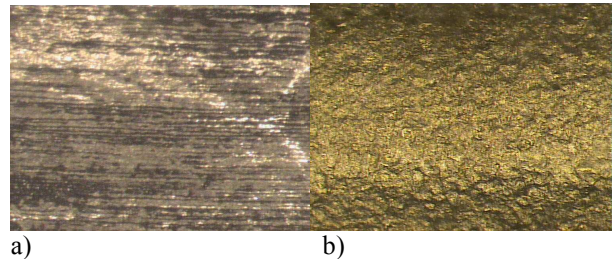


Figura 9. Aspecto superficial de las barras a) antes, b) después del tratamiento de shot peening

Por otro lado, se observa claramente cómo el efecto de las corrugas es determinante en el comportamiento a fatiga de las barras corrugadas de acero inoxidable dúplex, de modo que, mientras la barra corrugada en caliente presenta una vida a fatiga ($\Delta\sigma_f$, $2 \cdot 10^6$ ciclos) de 293 MPa, al eliminar las corrugas, la vida a fatiga asciende hasta los 520 MPa. En el caso del material deformado en frío, la mejora de la vida a fatiga es aún más notoria, pasando de 338 MPa a 777 MPa con el simple hecho de eliminar las corrugas.

Sin embargo, cuando se realiza un tratamiento de shot peening más severo y minuciosamente controlado sobre las probetas mecanizadas, el comportamiento a fatiga empeora ligeramente respecto al observado en las mismas probetas que no fueron sometidas a dicho proceso (puntos representados mediante cuadrados). El motivo de este empeoramiento se debe a que, en esta ocasión, al partir de una superficie inicial exenta de defectos, el shot peening empeora el acabado superficial, generando unos niveles de rugosidad que contrarrestan el efecto beneficioso de las tensiones residuales de compresión que se han obtenido, lo que parece estar de acuerdo con las observaciones de varios autores [14, 15].

La figura 10 ilustra este efecto. En la imagen, tomada mediante microscopio electrónico de barrido, se aprecia

claramente el daño generado por el tratamiento de shot peening sobre una probeta de material laminado en caliente a la que se le eliminaron las corrugas (figura 2).



Figura 10. Daño superficial generado sobre la probeta mecanizada sometida a shot peening

Por último, a modo de comprobación, se realizó un ensayo de fatiga sobre una probeta que había sido sometida al tratamiento de shot peening controlado pero cuya superficie había sido pulida posteriormente hasta alcanzar los niveles iniciales de rugosidad (punto representado en la figura 7 por un triángulo). De este modo, se consiguió aislar el efecto de la rugosidad superficial sobre el comportamiento a fatiga. Como era de esperar, mediante este procedimiento se produce una ligera mejora en la vida a fatiga, si bien este escaso incremento hace pensar que los tratamientos de shot peening son más efectivos cuando se llevan a cabo sobre superficies que no presentan un buen acabado superficial.

4. CONCLUSIONES

Los tratamientos de shot peening generan un campo de tensiones residuales de compresión bajo la superficie del elemento tratado, a la vez que modifican su acabado superficial. Dependiendo del acabado superficial inicial, el shot peening puede mejorar o empeorar el comportamiento a fatiga del elemento. Así, en el caso de las barras corrugadas de acero inoxidable dúplex, un tratamiento de shot peening de baja intensidad es suficiente para mejorar el comportamiento a fatiga en un 45% (para los corrugados en caliente) o un 14% (para los corrugados en frío).

Sin embargo, si se eliminan las corrugas y se proporciona al material un buen acabado superficial, un tratamiento de shot peening optimizado, que genera un fuerte campo de tensiones residuales de compresión, no sólo no mejora el comportamiento a fatiga del material, sino que lo empeora ligeramente. Esto es debido a que, en este caso, el efecto adverso del incremento de rugosidad generado por el tratamiento, prevalece sobre el efecto favorable originado por las tensiones residuales de compresión.

5. REFERENCIAS

- [1] H. Castro, C. Rodríguez, F.J. Belzunce "Mechanical behaviour and corrosion resistance of stainless steel cold rolled reinforcing bars" Materials Science Forum (Trans Tech Publications LTD), 1542, 1541-1546 (2003).
- [2] Niku-Lari A., "Shot peening" Proceedings of the 1st International Conference on Shot Peening, Paris, France, 1981, pp. 1-21.
- [3] Clausen R., Stangenberg J. "Roughness of shot peened surfaces-Definition and measurement" Proceedings of the 7th International Conference on Shot Peening, Warsaw, Poland, 1999, pp. 69-77.
- [4] Belzunce F.J. "Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones y aplicaciones" Universidad de Oviedo, 2001.
- [5] 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. Junio 2007.
- [6] SAE J444 "Cast shot and grit size specifications for peening and cleaning", May 1993.
- [7] SAE J442 "Test strip, holder and gage for shot peening", January 1995.
- [8] SAE J443 "Procedures for using standard shot peening test strip", January 1984.
- [9] SAE HS-784-03 "Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction", February 2003
- [10] Castillo, E., Fernández Canteli, A. Esslinger, V.Thürlimann, B. "Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires, Strands and Cables" Zürich, May, 1985.
- [11] Sanjurjo P., Rodríguez C., Belzunce J., Pariente I., Montero R. "Influencia del proceso de shot peening sobre el comportamiento mecánico de aceros inoxidables dúplex" CIBIM09, Las Palmas de Gran Canaria, 2009.
- [12] Fernández Pariente I., Gaugliano M. "About the role of residual stresses and surface work hardening on fatigue ΔK_{th} of a nitrided and shot peened low-alloy steel" Surface and Coatings Technology, 202, pp. 3072-3080, 2008.
- [13] Real E., Rodríguez C., Belzunce F.J., Sanjurjo P., Canteli A.F., Pariente I.F. "Fatigue behaviour of duplex stainless steel reinforcing bars subjected to shot peening" Fatigue and Fracture of engineering materials and structures, Vol. 32, 567-572
- [14] Bannantiene J.A. "Fundamentals of metal fatigue analysis" Prentice-Hall, 1990.
- [15] Forrest P. G. "Fatigue of metals" Pergamon Press Ltd., London 1962.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Fomento por la financiación recibida a través del proyecto C60/06. Asimismo, P. Sanjurjo agradece al Gobierno del Principado de Asturias la ayuda recibida a través del proyecto COF07-23, sin la cual no habría podido realizar este trabajo.