

INFLUENCIA DEL PROCESO DE SHOT PEENING SOBRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

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

Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias (IUTA). Universidad de Oviedo. Ed. Dptal. Oeste, 7.1.17. Campus de Viesques. 33203 Gijón. España. Tfno 985181951 e-mail: ppsanjurjo@uniovi.es

Área Temática: Materiales y Metalurgia

RESUMEN

En los últimos años se han comenzado a utilizar barras de acero inoxidable como elementos de refuerzo en grandes estructuras de hormigón sometidas a ambientes salinos, con el fin de proporcionar una mayor durabilidad a estas estructuras aun cuando las condiciones ambientales supongan un alto riesgo de corrosión. Por otro lado, el uso de tratamientos de shot peening es práctica habitual en múltiples aplicaciones dentro de la industria aeronáutica o automovilística, pero no se tienen referencias de su utilización en el ámbito de la construcción civil. En este trabajo se han combinado ambos aspectos con la finalidad de aportar una visión doblemente innovadora. Para ello, se ha seleccionado el tipo de acero inoxidable más novedoso e interesante (acero inoxidable dúplex de segunda generación) y se ha sometido a dos tratamientos de shot peening diferentes, observando los efectos producidos en su comportamiento mecánico. Paralelamente, se ha simulado numéricamente el proceso mediante un modelo de elementos finitos.

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

INTRODUCCIÓN

Las armaduras 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. Puesto 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 [1].

El shot peening es uno de los tratamientos superficiales más utilizados industrialmente con el fin de mejorar el comportamiento a fatiga de los componentes metálicos. Consiste, básicamente, en un proceso de deformación plástica en frío que se genera al bombardear una superficie metálica con pequeños proyectiles esféricos que impactan a alta velocidad. El fin último del tratamiento es mejorar el comportamiento a fatiga del material tratado, mediante la introducción de un campo de tensiones residuales de compresión. Además, el tratamiento modifica el acabado superficial y genera una capa de material endurecido bajo la superficie [2, 3].

Cada impacto individual origina una pequeña huella, que produce el aplastamiento de los granos superficiales del material, que se deforman, comprimiéndose entre sí, y provocando la aparición de un campo de tensiones de compresión paralelo a la superficie de la pieza. Cuando la totalidad de la superficie esté cubierta por estos pequeños impactos, se creará un campo de compresión uniforme bajo la superficie, que contrarrestará las posibles tensiones residuales de tracción inducidas en procesos anteriores (mecanizados, tratamientos térmicos o deformaciones plásticas), por lo que, en cualquier caso, actuará de modo favorable, puesto que se opondrá a toda solicitación a tracción a la que sea sometida la pieza durante su vida en servicio.

Existen multitud de parámetros que influyen en un tratamiento de shot peening, que a su vez interaccionan entre sí (velocidad de proyección de la granalla, ángulo de impacto, flujo másico de granalla, etc.) [4], siendo la

intensidad Almen y la cobertura los más representativos. La intensidad Almen es una medida indirecta de la energía de un chorro de proyectiles que impacta contra una superficie. Se trata de un concepto que, aunque inicialmente resultó bastante confuso, hoy en día está perfectamente estandarizado y es reconocido y aceptado en todo el mundo. Por su parte, la cobertura de un tratamiento de shot peening se define como el porcentaje de superficie expuesta al tratamiento que ha sido impactada por los proyectiles al menos una vez.

En este trabajo se ha utilizado un acero inoxidable dúplex tipo AISI 2205 fabricado tanto por laminación en caliente como por deformación en frío, habitualmente empleado en la fabricación de armaduras de refuerzo, y se ha sometido a distintos tratamientos de shot peening, actuando sobre parámetros tales como la intensidad Almen o el grado de cobertura, con el fin de estudiar el efecto producido sobre el comportamiento mecánico de estos aceros.

Teniendo en cuenta que los tratamientos de shot peening ya han sido utilizados con éxito en múltiples aplicaciones con el fin de mejorar el comportamiento a fatiga de los metales, este trabajo supone una primera aproximación a su uso en el ámbito de la construcción, con la finalidad de obtener mayor fiabilidad y durabilidad en el diseño de grandes estructuras de hormigón armado.

MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo los tratamientos de shot peening se utilizó una máquina neumática de proyección por presión directa, compuesta por una cabina de chorreado modelo *GUYSON Euroblast 4 PF* con depósito tipo *G27*, ciclón motorizado tipo *75/16* y colector de polvo modelo *DC400*. Se utilizó granalla de acero fundido tipo *S-230*, de dureza comprendida entre 40 y 50 HRC, en conformidad con las especificaciones de SAE J444 [5]. Dicha granalla fue caracterizada en cuanto a su tamaño y su forma mediante el software de análisis de imágenes *Enterprise Omnimet*, de *Buheler*. Los ensayos para determinar la intensidad Almen se llevaron a cabo según las especificaciones SAE J442 [6] y SAE J443 [7]. Se utilizaron probetas Almen tipo A, grado 2. La medida de la intensidad Almen fue efectuada antes y después de cada serie de ensayos con el fin de detectar posibles variaciones en los parámetros físicos durante el proceso. Dicha verificación se realizó llevando a cabo un nuevo ensayo de intensidad completo, pues las comprobaciones utilizando una única placa Almen no suelen resultar fiables.

Con el fin de eliminar la dispersión en las medidas, se corrigió el arqueado inicial en cada placa Almen utilizada [8]. Además, se utilizaron tres placas Almen para cada tiempo de exposición, tomando como medida de la flecha el promedio de las tres. Por tanto, en cada ensayo de intensidad se utilizaron 12 placas Almen y se obtuvieron 4 puntos, a partir de los cuales se trazaron las correspondientes curvas de saturación. Dichas curvas se obtuvieron ajustando los 4 puntos experimentales mediante la Ec.(1), donde h es la flecha medida en la placa Almen, t el tiempo de exposición y a , b , c y d los cuatro parámetros de la curva, que se obtienen por iteración mediante métodos numéricos. Finalmente, para determinar la intensidad Almen se aplicó la *Regla del 10%*.

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

De este modo, ajustando la presión de trabajo de la máquina y la distancia boquilla-probeta, se obtuvieron los dos niveles de intensidad Almen utilizados en este trabajo. Los valores más representativos se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Niveles de intensidad Almen de trabajo y principales parámetros de shot peening utilizados

PUNTO DE SATURACIÓN		PARÁMETROS SHOT PEENING	
Intensidad	Tiempo Saturación	Presión	Distancia Boquilla-Probeta
0.28 mm A	1.29 min	1.5 bar	380 mm
0.33 mm A	0.64 min	3 bar	240 mm

Los tratamientos de shot peening se realizaron sobre probetas extraídas de barras corrugadas de acero inoxidable dúplex tipo AISI 2205 (W Nr.14462), suministradas por la empresa *Roldán S.A.* y fabricadas mediante dos procesos distintos: laminación en caliente y deformación en frío. Aunque en ambos casos se trata de aceros inoxidables dúplex de segunda generación, con un contenido en Nitrógeno comprendido entre 0.15 y 0.20 % y caracterizados por un bajo porcentaje en Carbono, los distintos procesos de fabricación les confieren distintas características mecánicas y distinta geometría, por lo que, en este trabajo, serán considerados como dos materiales diferentes, y en lo sucesivo se hará referencia a ellos como “*D2205c*” y “*D2205f*” respectivamente. Las probetas se

obtuvieron cortando transversalmente trozos de barra, con una longitud aproximada de 15 mm, y los tratamientos de shot peening se realizaron sobre la superficie transversal plana, como se muestra en la figura 1 a).

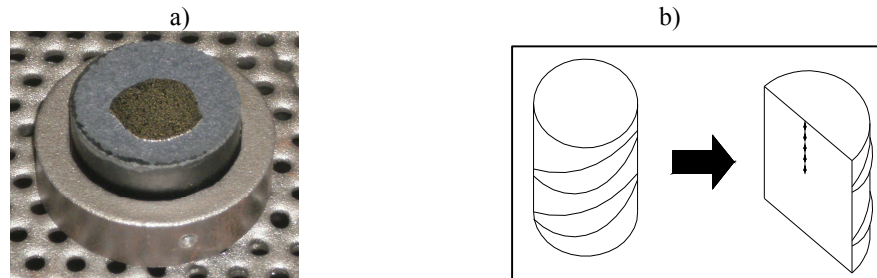


Fig. 1. a) Probetas sobre las que se realizaron los tratamientos de shot peening; b) Esquema de las medidas de microdureza realizadas

El grado de cobertura alcanzado en cada probeta se evaluó mediante análisis de imágenes y se supuso que dicha cobertura evoluciona según la Ec. (2), conocida como *Ecuación de Avrami*, siendo C la cobertura, A el área de cada huella creada ($A=\pi r^2$), R el ratio de flujo (número de huellas generadas por unidad de superficie y de tiempo) y t el tiempo de exposición.

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

El efecto del shot peening sobre el acabado superficial, se analizó realizando medidas de rugosidad sobre la superficie tratada, mediante un rugosímetro modelo *Tesa Rugosurf 10*. Cada medida fue realizada a lo largo de 0.8 mm de longitud, de acuerdo a la norma ISO 4287:1997 [9]. Posteriormente, con el fin de estudiar el endurecimiento producido en la capa sub-superficial de las superficies tratadas, se cortaron longitudinalmente las probetas y se midió la variación de la dureza Vickers con la distancia a la superficie tratada, según se muestra de manera esquemática en la figura 1.b), empleando una carga de 200g aplicada durante 10 s, y dejando una distancia mínima de 100 μm entre huellas consecutivas, según las recomendaciones de la norma ASTM E-92 [10]. También se estudiaron los posibles cambios microestructurales producidos por los tratamientos. Para ello, se cortaron longitudinalmente las probetas y, con el fin de revelar su microestructura, se sometieron a un ataque electrofítico con una solución de 56 g de hidróxido de potasio en 100 ml de agua destilada, aplicando una diferencia de potencial de 3 voltios durante 2 segundos. Mediante la técnica de difracción de rayos X, se midieron las tensiones residuales generadas bajo la superficie sometida a shot peening, utilizando un difractómetro modelo *AST X-Stress 3000* (radiación: Cr $K\alpha$, área irradiada: 1 mm², método de $\text{sen}^2\psi$, ángulos de difracción entre -45° y 45°). Por último, mediante el software *Abaqus Explicit 6.7-1*, se llevó a cabo una simulación numérica del proceso de shot peening aplicado al acero dúplex laminado en caliente, según se muestra en la figura 2.

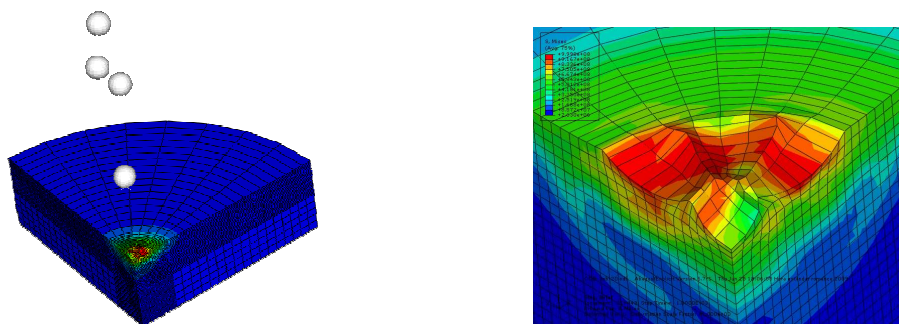


Fig. 2. Simulación numérica del proceso de shot peening mediante el uso de elementos finitos

Por aplicación de simetrías, se simuló únicamente la cuarta parte de una placa circular de altura 3 mm y radio 8 mm, encastrada en su superficie inferior. Se utilizaron elementos tipo C3D8R, mallándose la zona de impacto con un tamaño de elemento de 0.5 mm^3 . De este modo, se simuló el impacto solapado de nueve proyectiles esféricos, modelados como sólidos rígidos, e impulsados sobre la superficie con una velocidad de 20 m/s. El comportamiento elastoplástico del material se modeló a partir de un ensayo estático de tracción, caracterizándose la zona plástica mediante una ley de Hollomon.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 3 se muestra gráficamente la evolución de la cobertura para los dos tipos de material y las dos intensidades Almen utilizadas. Se observa que, manteniendo fijos el resto de parámetros, el grado de cobertura evoluciona mucho más rápidamente cuando se trabaja con una mayor intensidad Almen. Así, el tiempo necesario para alcanzar la cobertura total, definida como un 98% de cobertura teórica, es del orden de 10 s cuando se trabaja a 0.28 mmA, mientras que trabajando a 0.33 mmA se requieren tiempos de exposición en torno a los 60 s. En cualquier caso, conviene tener presente que, en la práctica, una evolución demasiado rápida de la cobertura dificulta el control del proceso, pues al trabajar con tiempos de exposición demasiado pequeños, los errores cometidos podrían no ser despreciables. Por otro lado, tiempos de exposición demasiado grandes, podrían no resultar viables económicamente.

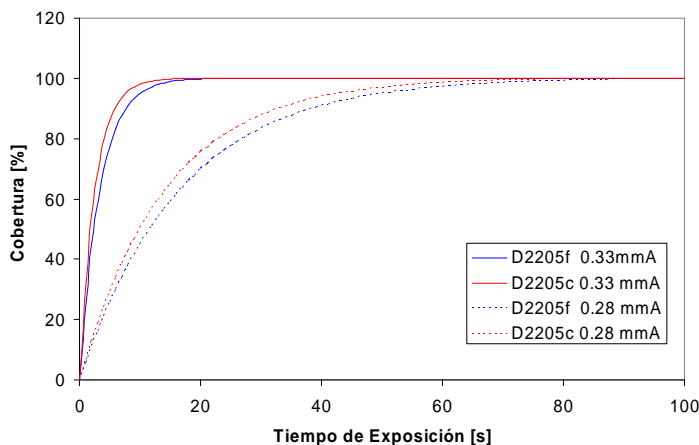


Fig. 3. Evolución del grado de cobertura en función de la intensidad Almen aplicada y del tipo de material

Respecto a la rugosidad superficial, los resultados obtenidos se recogen en la figura 4.a). Como se puede apreciar, para ambos materiales y fijados el resto de parámetros, a mayor intensidad Almen se obtienen mayores valores de rugosidad. Esta observación es lógica, ya que cuanto mayor es la intensidad Almen aplicada, mayores son las huellas inducidas por los impactos, lo que acrecienta la rugosidad.

En el dúplex laminado en caliente la rugosidad sigue una tendencia decreciente al aumentar el grado de cobertura. Como los ensayos se realizaron utilizando probetas pulidas, inicialmente la rugosidad debe aumentar necesariamente y posteriormente parece evidente que los sucesivos impactos ayudan a alisar las irregularidades superficiales inducidas para coberturas inferiores al 100%. Sin embargo, en el dúplex deformado en frío se observa la tendencia contraria. Esto se podría explicar en base a la mayor dureza del corrugado en frío, que necesitaría mayores tiempos de exposición para reducir sus niveles de rugosidad superficial. En cualquier caso, si se desea obtener unos menores niveles de rugosidad, suele ser práctica habitual la realización de un segundo tratamiento de shot peening sobre la misma superficie, utilizando proyectiles de menor tamaño. También es interesante destacar que, en ambos casos, aunque especialmente en el dúplex laminado en caliente, cuando se trabaja a 0.28 mmA de intensidad, la rugosidad se mantiene aproximadamente constante por encima de un 200% de cobertura, lo que indicaría que a cada tratamiento le corresponde una rugosidad límite que se alcanzaría tras una exposición aplicada durante un tiempo suficientemente alto. Por otro lado, a igualdad de intensidad Almen, los valores de rugosidad obtenidos son siempre mayores en el corrugado en caliente, lo cual parece lógico, al tratarse de un material más blando que el corrugado en frío, de manera que las huellas superficiales introducidas en el tratamiento serán mayores.

En la figura 4.b) se muestran los resultados de las medidas de microdureza realizadas hasta una profundidad de 1 mm en probetas tratadas a los dos niveles de intensidad Almen utilizados. En el dúplex laminado en caliente se aprecia una zona endurecida de aproximadamente 400 μm de profundidad, alcanzándose valores en torno a 360 HV200g en las zonas más próximas a la superficie, frente a los 295 HV200g del material sin tratar. Sin embargo, en el dúplex deformado en frío, no se aprecia ninguna variación aparente en la microdureza, manteniéndose ésta en valores constantes en torno a los 400 HV200g independientemente de la profundidad, lo que hace pensar que los tratamientos de shot peening utilizados no han afectado la dureza inicial de este material, o si lo han hecho, el espesor de la capa superficial endurecida es menor de 100 μm . Parece lógico pensar que, realizando idénticos tratamientos, la zona endurecida por deformación sea de menor espesor en el dúplex deformado en frío, material que tiene una mayor dureza de partida. Si se comparan los resultados de dureza por grado de intensidad Almen utilizado, en el material laminado en caliente se observa un mayor incremento de dureza cuando se trabaja a mayor intensidad Almen, si bien esta diferencia es muy pequeña, lo que hace pensar que una variación de 0.05 mmA en la intensidad del tratamiento no es suficiente si se quieren obtener perfiles de microdureza en profundidad significativamente diferentes en estos dos materiales.

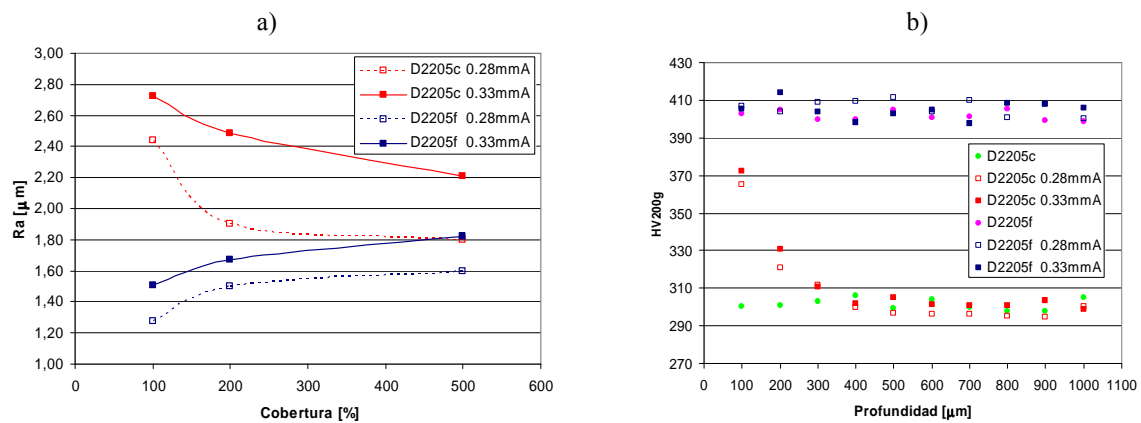


Fig. 4. a) Variación de la rugosidad superficial en función del grado de cobertura; b) Variación de la microdureza Vickers (HV200g) en función de la distancia a la superficie

En lo referente a la microestructura, hay que señalar que los ataques electroquímicos llevados a cabo no revelan daños en la superficie ni signos aparentes de deformación, incluso si ambos materiales se someten a tiempos de exposición excesivos, muy superiores al tiempo necesario para alcanzar la cobertura total. A modo de ejemplo, en la figura 5 se muestra la microestructura del dúplex laminado en caliente sometido a un tratamiento de 0.33 mmA, con un grado de cobertura de 200%. Como se puede observar, su microestructura de partida, formada por bandas de ferrita y austenita orientadas dirección longitudinal, no muestra signos de ningún tipo de deformación causada por el tratamiento de shot peening, al menos tras su observación mediante el uso de microscopio óptico.

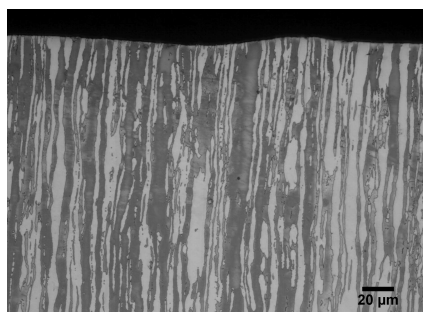


Fig. 5. Microestructura del acero inoxidable dúplex laminado en caliente tras ser sometido a un tratamiento de shot peening de intensidad 0.33 mmA y con una grado de cobertura de 200%

En cuanto a las tensiones residuales, se realizaron medidas bajo la superficie, para el tratamiento de intensidad 0.33 mmA, hasta una profundidad máxima de 0.35 mm. Como se aprecia en la figura 6.a), para ambos materiales la tensión máxima de compresión se alcanza a una profundidad aproximada de 0.04 mm, si bien en el caso del corrugado en caliente (-740 MPa) el valor es ligeramente superior al obtenido para el corrugado en frío (-685 MPa). Una vez más, conviene tener presente la menor capacidad de deformación de los corrugados en frío. Además, la tendencia de las medidas indica que la profundidad de la zona sometida a tensiones residuales de compresión también es mayor en el corrugado en caliente.

Por otro lado, las medidas realizadas por el método de difracción de rayos X permiten obtener otra importante información acerca del estado superficial del material: La anchura del pico de difracción a la mitad del valor de difracción máximo (parámetro *FWHM*: *Full Width at Half Maximum*). Esta cantidad está relacionada 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 [11]. En este caso, en la figura 6.b) se observa que 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 ese espesor aproximadamente. Este resultado concuerda con los valores de microdureza obtenidos para este tratamiento y recogidos en la *Figura 4.b)*. Sin embargo, en el dúplex deformado en frío, dicha 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 . Esta conclusión es coherente con los valores de dureza exhibidos por este material y mostrados también en la *Figura 4.b)*, en virtud de los cuales se había deducido que la capa sub-superficial afectada por el tratamiento de shot peening debía ser de espesor inferior a 100 μm . En cualquier caso, este valor, sensiblemente inferior al obtenido para el dúplex caliente, se justifica en base a la mayor dureza inicial del dúplex deformado en frío, por lo que, si se desea obtener una capa deformada plásticamente de igual espesor que la generada en el dúplex caliente, los parámetros del tratamiento de shot peening deberían ser más severos en el caso del acero dúplex obtenido por deformación en frío.

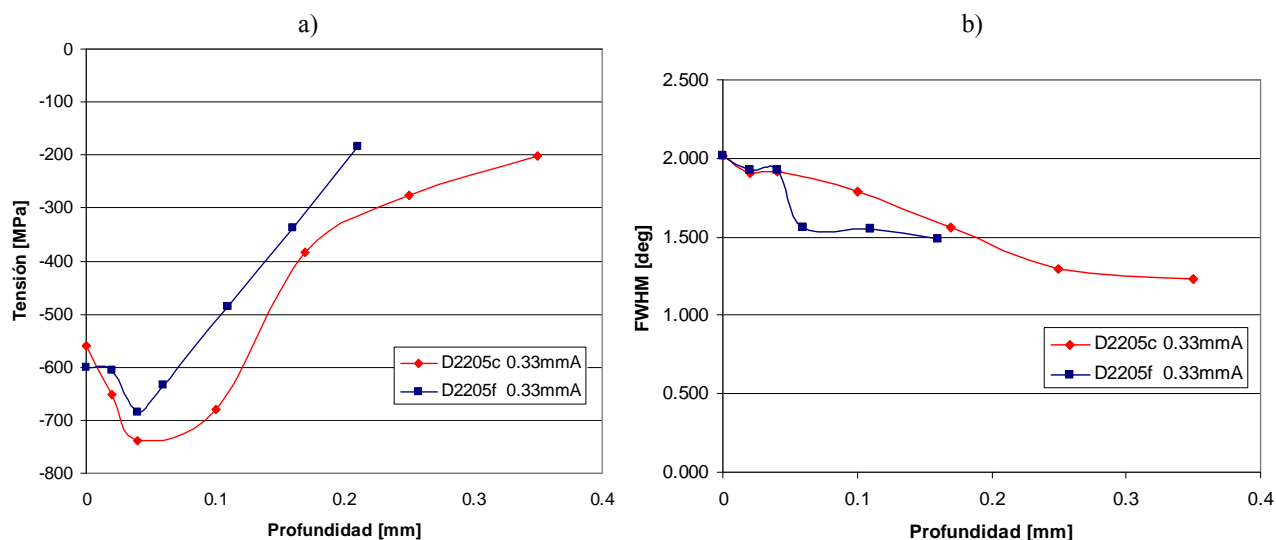


Fig.6. a) Perfil de tensiones residuales obtenido a 0.33 mmA y $C=100\%$; b) Evolución del parámetro *FWHM* con la profundidad

Finalmente, en la figura 7 se compara el perfil del campo de tensiones residuales obtenido experimentalmente para el tratamiento de intensidad 0.33 mmA sobre el acero dúplex laminado en caliente, con el resultado obtenido mediante la simulación numérica del mismo tratamiento. Se observa que ambos resultados siguen la misma tendencia, obteniéndose valores similares para la tensión máxima de compresión. Sin embargo, se considera que un modelo de material basado en ensayos de fatiga oligocíclica sería más apropiado que aquél basado en ensayos de tracción.

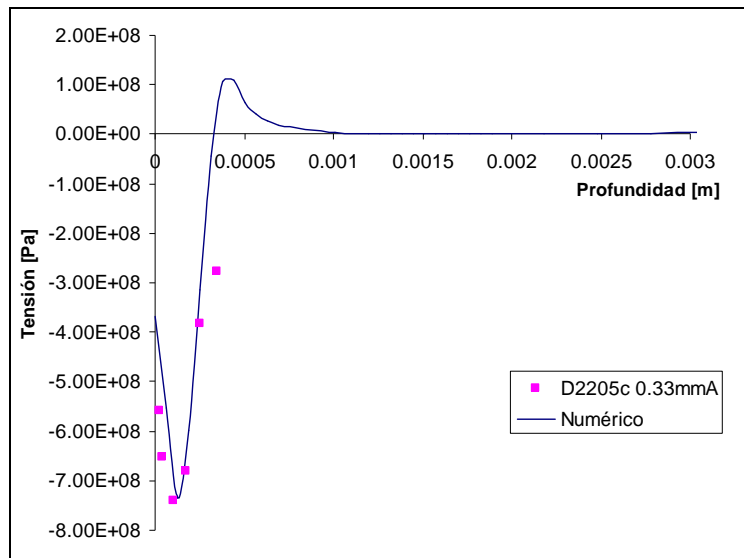


Fig.7. Comparación entre el perfil de tensiones residuales obtenido de manera numérica y experimental, para un tratamiento de shot peening de intensidad 0.33 mmA sobre acero dúplex laminado en caliente

CONCLUSIONES

Una vez presentados y discutidos los resultados de este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Para determinar la intensidad Almen de un proceso de shot peening mediante la adecuada curva de saturación, la ecuación que mejor se ajusta a las medidas experimentales es una ecuación de 4 parámetros. El proceso de cobertura, por su parte, evoluciona ajustándose fielmente a la ecuación de Avrami.

El análisis de imágenes ha demostrado ser una herramienta eficaz tanto para la caracterización de la granalla como para la determinación del grado de cobertura, siendo más exacto y objetivo que los métodos tradicionales. Además, proporciona, de manera rápida y fiable, gran cantidad de información adicional de tipo estadístico.

Respecto a los efectos producidos por los tratamientos de shot peening realizados, puede afirmarse que para ambos materiales, cuanto mayor es la intensidad Almen de trabajo, más rápido se alcanza la cobertura total y mayor es la rugosidad superficial obtenida. La dureza, sin embargo apenas muestra variación con la intensidad Almen utilizada. Tampoco se han observado daños ni cambios microestructurales en la zona afectada por los tratamientos de shot peening, en ninguno de los dos materiales, incluso aplicando niveles de cobertura de 200% o 500%.

Para los dos grados de intensidad Almen utilizados, el acero dúplex laminado en caliente alcanza antes la cobertura total y muestra una mayor rugosidad superficial que su homólogo deformado en frío. El incremento de dureza superficial también es notable en el corrugado en caliente hasta una profundidad de 400 μ m. Sin embargo, el dúplex deformado en frío no muestra ningún tipo de endurecimiento, al menos para profundidades superiores a 100 μ m. Este efecto también se deja notar en las tensiones residuales generadas por el proceso de shot peening: tanto la tensión residual máxima como la extensión de la capa afectada por tensiones residuales de compresión son mayores en el caso del material laminado en caliente. Estas diferencias se explican en virtud del mayor grado de dureza y la menor propensión a la deformación en frío que muestra el D2205f que ya había sido deformado en frío antes de sufrir el tratamiento de shot peening.

Las diferencias entre los dos tipos de aceros también son patentes en la evolución de la rugosidad con el grado de cobertura: mientras que el laminado en caliente la rugosidad aumenta con la cobertura, el deformado en frío muestra una rugosidad decreciente. No obstante, la rugosidad de ambos materiales muestra una tendencia asintótica hacia un valor constante, que mientras el material laminado en caliente ya alcanza para una cobertura del 200% el deformado en frío no ha llegado a alcanzar con un 500% de cobertura, lo que parece indicar que este último material, más endurecido de partida, necesitaría mayores valores de intensidad para verse afectado por el tratamiento de shot peening.

En cualquier caso y para ambos materiales, no existe una diferencia significativa entre los efectos producidos por los dos niveles de intensidad Almen utilizados en este trabajo (0.28 mmA y 0.33 mmA), por lo que se recomienda manejar dos rangos de intensidades más dispares si se desea una mayor diferencia en las propiedades mecánicas afectadas por los procesos de shot peening.

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.

REFERENCIAS

1. 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.
2. 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.
3. Niku-Lari A., “*Shot peening*” Proceedings of the 1st International Conference on Shot Peening, Paris, France, 1981, pp. 1-21.
4. Hozapfel H., Wick A., Vöhringer “*Effect of Shot Peening Parameters on the Properties of Surface Layers in AISI 4140 in Different Heat Treatment Conditions*” The Shot Peener, Vol. 10, Issue 1, March 1996.
5. SAE J444 “*Cast shot and grit size specifications for peening and cleaning*” Society of Automotive Engineers, May 1993.
6. SAE J442 “*Test strip, holder and gage for shot peening*” Society of Automotive Engineers, January 1995.
7. SAE J443 “*Procedures for using standard shot peening test strip*” Society of Automotive Engineers, January 1984.
8. Bailey P. “*Almen Strip reliability*” The Shot Peener, Vol.04, Issue 4, Winter 1991.
9. ISO 4287:1997 “*Geometrical product specification (GPS). Surface texture: Profile method: Terms, definitions and surface texture parameters*” 1997.
10. ASTM E92-82 “*Standard test method for Vickers hardness of metallic materials*” 2003.
11. 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.

NOMENCLATURA

<i>h</i>	Flecha de la placa Almen (mm)
<i>t</i>	Tiempo de exposición (min)
<i>a</i>	Primer parámetro de la ecuación de la curva de saturación
<i>b</i>	Segundo parámetro de la ecuación de la curva de saturación
<i>c</i>	Tercer parámetro de la ecuación de la curva de saturación
<i>d</i>	Cuarto parámetro de la ecuación de la curva de saturación
<i>C</i>	Cobertura (%)
<i>A</i>	Área de cada impacto individual (mm ²)
<i>r</i>	Radio de cada huella individual (mm)
<i>R</i>	Ratio de flujo de granalla (número de huellas creadas/mm ² min)
<i>R_a</i>	Media aritmética de las desviaciones del perfil de rugosidad superficial (µm)
<i>HV200g</i>	Dureza Vickers obtenida aplicando una carga de 200 gramos
<i>FWHM</i>	Parámetro “Full Width at Half Maximum” (°)