

Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

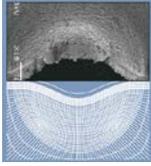
Título de trabajo: Tratamiento doble de shot peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Tutor académico: Javier Belzunce Varela

Departamento: Ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica

Universidad de Oviedo

Julio de 2014



Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Título de trabajo: *Tratamiento doble de shot peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros*

Firma

Javier Belzunce

Firma

Eduardo Rodríguez

Universidad de Oviedo

Julio de 2014

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Índice

1. Introducción: alcance del trabajo.	2
2. Tratamientos de Shot Peening.	3
2.1 Proceso de Shot Peening.....	3
2.2 Parámetros que influyen en el tratamiento de shot peening.....	6
2.3 Efectos del shot peening.....	14
3. Procedimiento experimental	19
3.1 Tratamiento de shot peening.....	20
3.2 Tratamiento de acabado por vibración.....	21
3.3 Medidas de rugosidad.....	24
3.4 Medida del perfil de la tensión residual.....	25
3.5 Ensayos de fatiga rotativa.....	29
4. Resultados.....	31
4.1 Rugosidad.....	31
4.2 Tensiones residuales.....	35
4.3 Examen topográfico de las superficies tratadas.....	43
4.4 Ensayos de fatiga.....	46
4.5 Examen fractográfico de las probetas rotas a fatiga.....	48
5. Conclusiones	50
6. Bibliografía.....	51

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

1. Introducción: alcance del trabajo.

El objetivo de este trabajo fin de máster es la recopilación y comparación de los datos recogidos de probetas del acero 41NiCrMo7, tras temple a 850 °C y revenido a 200 °C, antes y después del doble tratamiento de Shot Peening y del acabado por vibración (AV) (8h, 16h y 24h).

Sobre estas probetas se realizaron ensayos de fatiga rotativa, utilizando primero una tensión alterna de 1000 MPa y a continuación se aumentó la carga a 1100 MPa para estimar mejor las variaciones que producen los diferentes tratamientos.

También se realizaron medidas de rugosidad, se fotografiaron las superficies con un microscopio electrónico de barrido y con la lupa estereoscópica para realizar un primer estudio de la superficie tratada y después de los ensayos de fatiga rotativa se realizó un análisis fractográfico de las superficies de rotura.

Además se realizaron medidas de las tensiones residuales de las probetas sometidas a los distintos tratamientos.

2. Tratamientos de Shot Peening.

El Shot Peening es una tecnología especial de tratamiento superficial que consiste en inducir una cierta deformación plástica superficial. El objetivo principal de este tratamiento es incrementar la resistencia a fatiga de los componentes sometidos a fuertes cargas.

2.1 Proceso de Shot Peening.

El Shot Peening es un tratamiento superficial en frío en el que se genera una deformación plástica significativa en la superficie del material a tratar al ser bombardeada con pequeños proyectiles esféricos, proyectados a alta velocidad. Los proyectiles utilizados pueden ser de distintos materiales (acero, cerámica o vidrio) y tamaños, normalmente por debajo del milímetro de diámetro. En la figura 1 se puede observar un esquema del tratamiento de Shot Peening, además de otro que visualiza el efecto principal de dicho tratamiento.

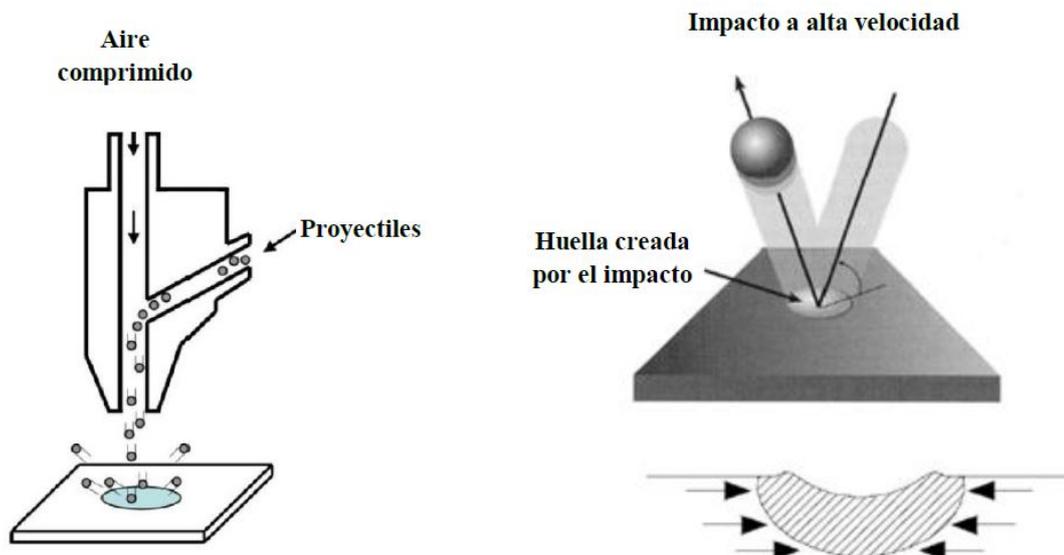


Figura 1. Esquema del tratamiento de shot peening y esquema del efecto principal de dicho tratamiento sobre la superficie tratada.

Cada impacto provocado por los proyectiles genera una deformación plástica en una zona muy localizada, que al encontrarse rodeada por material que solo

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

se deforma elásticamente, queda sometida a fuertes tensiones residuales de compresión, como se puede observar en la figura 1.

Bajo la superficie de la zona impactada, el material comprimido como resultado del impacto intenta volver a su estado inicial, como se ve en el esquema de la figura 2. Esta recuperación se ve impedida por las capas internas que no se han deformado plásticamente, lo que genera un campo de tensiones residuales de compresión de gran amplitud en la superficie de la pieza, que se equilibrará con tensiones de tracción que aparecerán en zonas más internas (las tensiones residuales están siempre autoequilibradas).

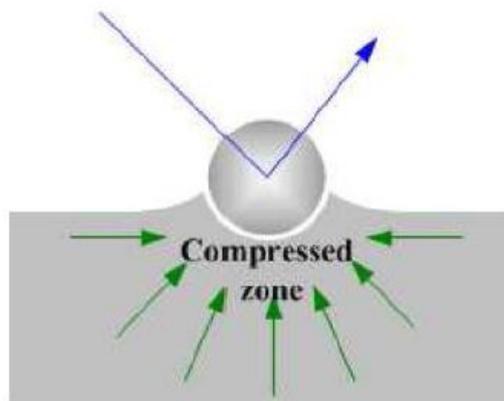


Figura 2. Esquema de la zona afectada por las tensiones residuales de compresión.

De este modo, si se bombardea la totalidad de la superficie del material, esto acaba provocando un perfil de tensiones residuales de compresión típico de este proceso, que mejora el comportamiento a fatiga del material tratado.

En la figura 3 se puede ver representado un perfil de tensiones residuales típico generado en un tratamiento de shot peening. El perfil de tensiones residuales queda definido por tres importantes valores que son, el valor de la tensión en la superficie del material, la tensión máxima de compresión generada, que normalmente se produce a una cierta profundidad y la extensión o profundidad de la capa comprimida, que es de 0.2 mm en la gráfica de la figura. Así, en

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

principio, cuanto mayores sean las tensiones residuales de compresión obtenidas y mayor sea la profundidad de la capa afectada por el proceso, mejor será la respuesta a la fatiga del material tratado.

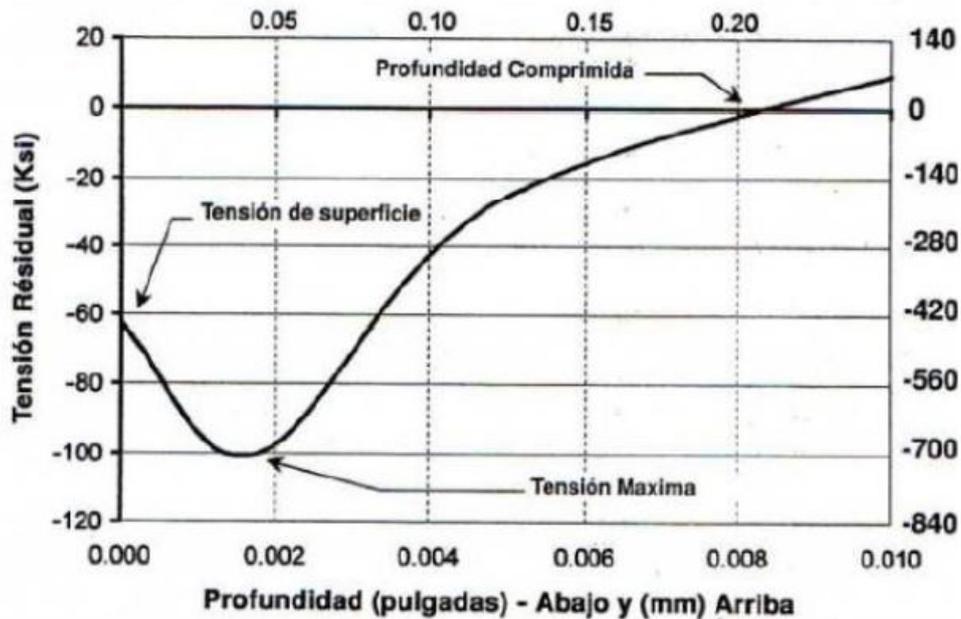


Figura 3. Representación del perfil de tensiones residuales tras un tratamiento SP.

Sin embargo, aunque la mayor parte de la mejora a fatiga del material tratado se debe al perfil de tensiones residuales producido por el proceso, otro factor que influirá en dicha mejora es el endurecimiento por deformación que los impactos producen en el material superficial afectado por el tratamiento.

Cabe destacar que el proceso de shot peening también modifica el acabado superficial del material tratado, efecto que en unas ocasiones juega a favor y otras en contra del esperado aumento de la vida a fatiga. Normalmente, si el tratamiento de shot peening está bien diseñado son más las veces que juega a favor que en contra, ya que en situaciones prácticas cuando un componente falla debido a fatiga o a corrosión bajo tensión, la rotura suele tener su origen en la superficie o en sus cercanías (especialmente bajo cargas de flexión o torsión, donde la mayor tensión se induce justo en la superficie de la pieza). En

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

estos casos, las tensiones residuales de compresión producidas en el material por el tratamiento de shot peening alargarán notablemente la vida a fatiga de los componentes metálicos, ya que dificultan la propagación de las grietas, tal y como se puede ver en el esquema que recoge la figura 4.

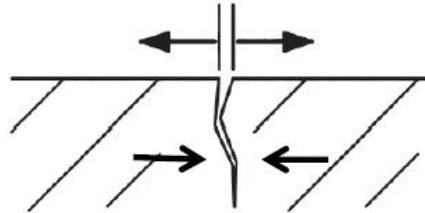


Figura 4. Efecto de las tensiones de compresión introducidas con el tratamiento de shot peening.

Dicho de otra manera, las cargas de tracción aplicadas externamente se suman a las de la compresión residual superficial, lo que hace disminuir el nivel de las cargas que realmente actúan sobre la pieza. Como las grietas de fatiga además solo pueden crecer bajo cargas de tracción, el componente durará más.

2.2 Parámetros que influyen en el tratamiento de shot peening.

Las características del material de la pieza a tratar influyen de manera considerable a la hora de elegir los parámetros del tratamiento, por lo que el resultado de este tratamiento depende tanto de las características de la máquina y de los proyectiles seleccionados, así como del comportamiento mecánico del material tratado.

Los tres parámetros fundamentales que se utilizan para caracterizar los tratamientos de shot peening son el tipo de proyectiles que se van a disparar (geometría, dimensiones, naturaleza y dureza), la intensidad con la que se va a llevar a cabo el tratamiento y la cobertura del mismo.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

La eficacia del tratamiento radicar  entonces en la correcta elecci3n de cada uno de los tres parámetros anteriormente mencionados y que serán desarrollados más ampliamente a continuaci3n.

2.2.1 El tipo de proyectiles.

El proyectil utilizado en el tratamiento de shot peening suele mostrar la forma de esferas, que pueden ser de acero, cerámica o incluso vidrio. Normalmente se suele usar proyectiles lo más esféricos posible, ya que de otro modo (por ejemplo las formas angulares) al impactar con la superficie a tratar podrían arrancar fragmentos de material que podrían incluso disminuir la vida a fatiga.

a) Naturaleza del proyectil

- Proyectiles de acero esféricos.

Este tipo de proyectil es el más utilizado en el tratamiento de shot peening y, con el uso, se va fracturando, dejando así de ser aceptable para el proceso. Por ello, es importante disponer de un separador que saque fuera de la máquina de proyecci3n los proyectiles deteriorados.



Figura 5. Proyectiles de acero esféricos.

- Proyectiles de acero obtenidos a partir de alambre cortado (cut wire)

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Este tipo de proyectiles consiste en trozos de alambre que se lanzan sucesivamente sobre placas muy duras de manera que se “acondiciona” y se redondea. Este tipo de proyectil es más resistente a los impactos que el anterior pero, de cualquier manera, su tamaño va disminuyendo con el tiempo, por lo que es importante también separar continuamente los proyectiles deteriorados.



Figura 6. Proyectiles de acero de alambre cortado (cut wire).

- Microesferas de vidrio/ Microesferas cerámicas.

Cuando el tratamiento de shot peening se va a aplicar a bajas intensidades, se pueden utilizar microesferas de vidrio o cerámicas (normalmente de óxido de circonio).

También resulta adecuado su uso en aquellos casos donde sea importante no introducir ningún tipo de contaminación férrica.

El inconveniente que presenta este tipo de proyectil es que se hace más crítico el control de su distribución granulométrica y de su forma, ya que son materiales bastante frágiles que se rompen con mucha más facilidad.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Figura 7. Izda.: Microesferas de vidrio. Dcha.: Microesferas cerámicas.

b) Tamaño y forma de los proyectiles

Los proyectiles para shot peening deben tener formas lo más esféricas posible. Las formas aceptadas por la normativa en vigor, SAE J444, SFSA 20-66 ó MIL-S-13165-C, se pueden observar en la figura 8.

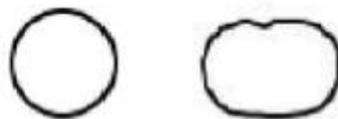


Figura 8. Formas de proyectiles aceptados por normativa.

También están definidas las formas que no son aceptadas para llevar a cabo el tratamiento de shot peening. Estas se pueden ver en la figura 9.



Figura 9. Formas de proyectiles no aceptados por normativa.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

De este modo, los proyectiles rotos o con formas angulosas, no son válidos para llevar a cabo el tratamiento de shot peening y la propia máquina se encargará de eliminar dichos proyectiles: al recircular las bolas utilizadas a lo largo del ensayo, la máquina de shot peening clasifica las bolas, por diferencia de masa, desechando las que se hayan roto.

Es importante que cuando se lleve a cabo el ensayo, todas las bolas sean del mismo tamaño y que tengan la misma forma. Es decir, no se deben mezclar distintos tipos de proyectiles porque la energía con la que impactan es distinta, ya que depende de la masa del proyectil. La energía del proyectil en el momento del impacto es energía cinética ($E=1/2mv^2$, siendo m la masa del proyectil y v su velocidad). Esto quiere decir, que a mayor masa (mayor diámetro de la bola), mayor será la energía del impacto, e igualmente la energía aumentará con la velocidad que alcanza en la proyección (aumentará con la presión del aire de arrastre de los proyectiles, en las máquinas de presión directa).

c) Dureza y densidad de los proyectiles

En cuanto a la dureza de los proyectiles, ésta debe ser superior a la del material que va a recibir el tratamiento con dichos proyectiles.

Normalmente, en el caso de las piezas de acero y de otras aleaciones no férreas, se utilizan bolas de acero con una dureza entre 45 y 52 HRC.

Además de la dureza, también es importante su densidad, ya que a mayor densidad, normalmente presentan una mayor vida útil y una mayor resistencia a la fractura.

2.2.2 Intensidad Almen

La intensidad Almen es una medida indirecta de la energía del chorro de proyectiles, que se obtiene mediante el análisis de la deformación inducida en

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

placas Almen (láminas de acero SAE 1070 de espesor controlado) para diferentes tiempos de tratamiento. La figura 10 muestra la flecha generada en una placa Almen por el impacto de los proyectiles durante un cierto tiempo.

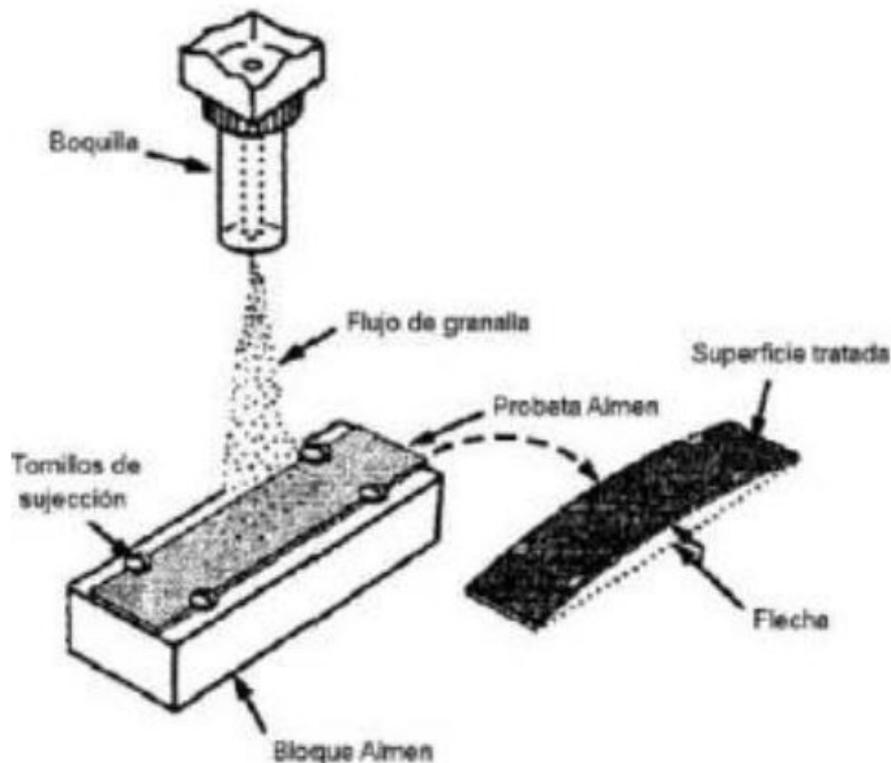


Figura 10. Esquema de la deformación generada sobre una placa Almen.

Como se puede observar en la figura 10, las placas Almen se sujetan firmemente a un bloque de acero, también conocido como bloque Almen. Una vez sujetas, se expone la placa al chorro de proyectiles durante un determinado tiempo, provocando que la placa se curve. Esta curvatura, que no se apreciará hasta que no se suelte la placa Almen del bloque, es debida a las tensiones residuales generadas a consecuencia de los impactos de los proyectiles sobre la placa Almen, haciendo que la placa adopte una curvatura convexa.

La curvatura que se produce en la placa permite determinar la energía suministrada en los tratamientos de shot peening. Es importante mencionar que no solo existe un único tipo de placa Almen, sino que existen tres tipos

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

diferentes que quedan recogidos en la siguiente tabla, junto con sus características diferenciadoras.

Placa Almen	Espesor (mm)	Flecha (mm)
N	0.79	<0.10
A	1.29	0.10-0.61
C	2.39	>0.61

Para obtener la intensidad Almen de un tratamiento de shot peening es necesario ensayar un mínimo de cuatro placas, sometiéndolas a tiempos de exposición sucesivamente mayores. Si se representa gráficamente la flecha de las placas frente al tiempo de exposición, se obtiene la curva de ajuste denominada “curva de saturación” que aparece representada en la figura 11.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Es muy importante alcanzar siempre una cobertura, al menos igual, si no superior al 100%, con objeto de asegurar que toda la superficie de la pieza ha quedado bajo el campo de tensiones residuales de compresión. De este modo se garantiza que no puedan desarrollarse grietas de corrosión bajo tensión ni de fatiga en una zona que no hubiera sido afectada por el tratamiento.

2.3 Efectos del shot peening

2.3.1 Tensiones residuales

Como ya se mencionó en apartados anteriores, el objetivo que se persigue a la hora de tratar una superficie con shot peening, es la introducción de tensiones superficiales de compresión.

Mediante la ayuda de un equipo de difracción de rayos X, como el que se puede ver en la figura 12, y utilizando la técnica de electropulido para la eliminación de material superficial, se pueden medir las tensiones que se han introducido con el tratamiento de shot peening, obteniendo así un perfil de tensiones residuales. Este perfil de tensiones tiene tres parámetros característicos que se definen a continuación y que aparecen representados en la figura 13.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Figura 12. Fotografía del equipo de Difracción de Rayos X.

- a) Tensión en la superficie: la tensión de compresión residual generada en la superficie de la muestra; no suele ser nunca la tensión máxima generada, que suele aparecer a una cierta distancia de la superficie.
- b) Tensión de compresión máxima: es el valor absoluto máximo que alcanza la tensión residual de compresión. Suele aparecer a solo unos pocos micrómetros de la superficie.
- c) Profundidad de la capa comprimida: es la profundidad de la capa que ha quedado sometida a tensiones residuales de compresión. Más allá de este punto aparecerán tensiones de tracción, que equilibrarán a las anteriores. La profundidad de esta capa aumenta al hacerlo la energía de los proyectiles en el momento del impacto. Cuanto mayores sean las tensiones de compresión y más profunda sea la capa citada, mayor será la resistencia a la propagación de grietas de fatiga.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

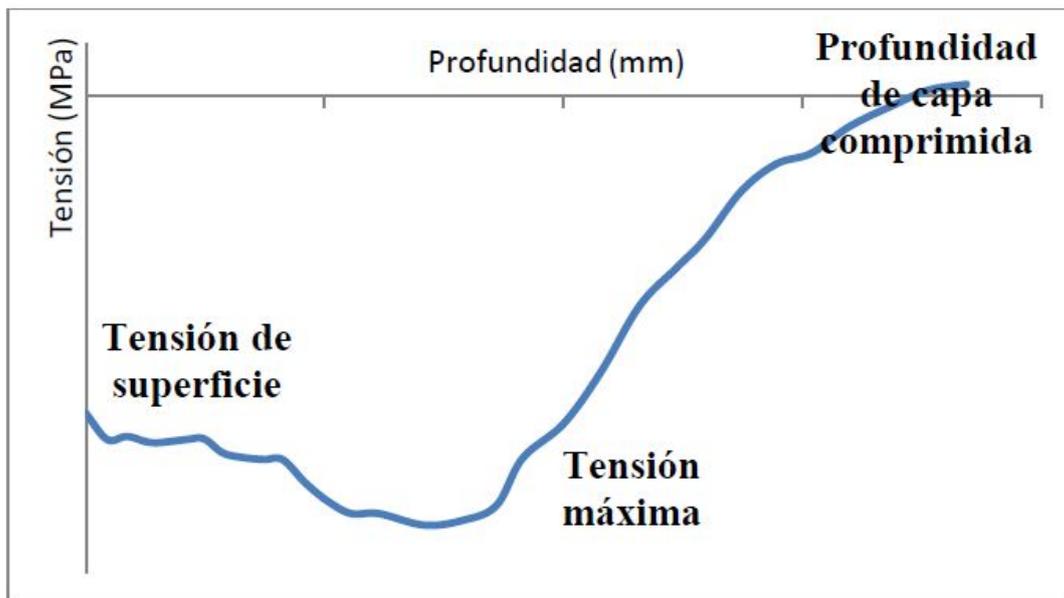


Figura 13. Perfil de tensiones residuales.

La dureza del material influye tanto en las tensiones máximas de compresión generadas como en la profundidad que alcanzan las mismas.

Debe tenerse siempre en cuenta que tras la aplicación de un tratamiento de shot peening sobre una superficie, la tensión resultante que actuará sobre la misma durante su servicio bajo cargas mecánicas será la suma de la tensión aplicada y la tensión residual generada en el shot peening. En la figura 14 se ha representado una barra sometida a flexión en tres puntos, donde la tensión máxima se localiza en la superficie de la barra. Por otro lado, la curva que se marca en trazo discontinuo, representa la tensión residual que se ha introducido en un tratamiento de shot peening. Finalmente, la curva mostrada en trazo continuo representa la tensión resultante de sumar ambas.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

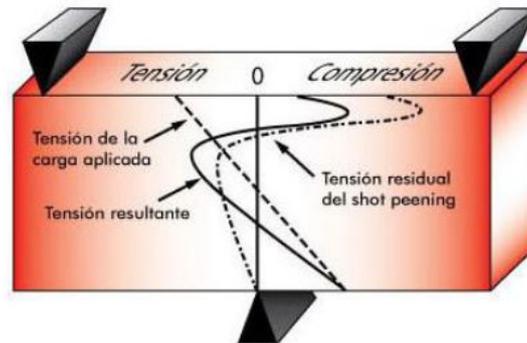


Figura 14. Representación de la tensión aplicada (flexión) junto a la tensión residual de shot peening.

Viendo el esquema de tensiones, se puede observar que el tratamiento de shot peening se encarga de introducir una tensión de compresión localizada en la región superficial de la barra de gran amplitud. Los tratamientos de shot peening son especialmente efectivos, por un lado, ante cargas de flexión y torsión, ya que éstas dan lugar a tensiones locales máximas en la superficie de los componentes y, por otro, cuando en la superficie de los componentes existen concentradores de tensión de tipo geométrico, como pueden ser agujeros, radio de acuerdo, estriados, entallas, etc., que pueden dar lugar a fuertes aumentos locales de la tensión actuante.

Por otro lado, se puede decir que el tratamiento de shot peening es especialmente adecuado para tratar materiales de altas características mecánicas, ya que la tensión de compresión generada aumenta al hacerlo la resistencia mecánica del material y además son estos materiales de alta resistencia los más susceptibles a las acciones de fatiga.

2.3.2 Rugosidad

Uno de los efectos más visibles de un tratamiento de shot peening es la modificación del acabado superficial del material tratado en virtud de las huellas generadas por cada uno de los impactos.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

La rugosidad de la superficie tratada por shot peening se puede definir como el conjunto de irregularidades o imperfecciones de la superficie real, definidas en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados.



Figura 15. Diferenciación entre ondulación y rugosidad.

Aunque existen diversos parámetros para describir la rugosidad superficial de los materiales, el más utilizado es la rugosidad media o R_a , es decir, la media aritmética de las desviaciones del perfil. Este valor lo proporciona directamente el rugosímetro una vez registrado el perfil de rugosidad en una cierta distancia.

2.3.3 Dureza superficial

Antes de explicar cómo afecta el shot peening a la dureza de un material, hay que recordar que el shot peening genera una deformación plástica en la región superficial de la pieza tratada. Esto es importante recordarlo, ya que el endurecimiento se produce por deformación plástica en frío. De este modo, se puede deducir que las capas superficiales afectadas por el tratamiento de shot peening verán incrementada su dureza, ya que es la región de la pieza que sufre una deformación importante debida al impacto de los proyectiles en el shot peening.

El incremento de la dureza de las capas superficiales se traduce en una mejora del comportamiento a fatiga (aumento local del límite elástico) y al desgaste de los componentes tratados.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

3. Procedimiento experimental

El material de partida proporcionado por el proveedor fueron aproximadamente 40 metros de barra de 16 mm de diámetro de acero 41NiCrMo7-3-2 (F1272). Según el fabricante el material había sido sometido a un tratamiento térmico industrial que no se ha tenido en cuenta ya que en el laboratorio de Materiales se le aplicó un tratamiento de temple consistente en una austenización a 850°C, durante 45 minutos, seguido de un enfriamiento en agua y luego un revenido a 200°C durante 150 minutos, enfriándose finalmente el material al aire.

En la tabla siguiente se muestra la composición química del acero F1272 en % en peso.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
0,410	0,710	0,260	0,013	0,024	0,870	1,920	0,235	0,005	0,210
Al	Sn	Ti	Nb						
0,016	0,040	0,008	0,010						

En cuanto a las propiedades mecánicas, los datos de referencia que se han utilizado son los obtenidos en estudios anteriores. El cuadro siguiente muestra los valores del módulo elástico (E), el límite elástico (σ_y), la resistencia a la tracción (σ_r), el alargamiento (A), la estricción (Z) y las constantes k y n de la ley de endurecimiento plástico ($\sigma = K\varepsilon^n$).

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_r (MPa)	A (%)	Z (%)	n	K (MPa)
200.249	1.596	2.000	11	50	0,24	5.029

Se realizó el tratamiento térmico a varias barras de acero de aproximadamente 300 mm de largo. De estas barras se extrajeron dos tipos distintos de probetas: (a) unas planas, obtenidas mediante cortes radiales de la barra, con un espesor aproximado de 10 mm, sobre las que se realizaron medidas de rugosidad y los perfiles de la tensión residual, y (b) otras probetas normalizadas sobre las que se realizaron los ensayos de fatiga.

3.1 Tratamiento de shot peening

Sobre las probetas se realizó un tratamiento de shot peening, utilizando una máquina constituida por una cabina modelo GUYSON Euroblast 4 PF, un depósito tipo G27, un ciclón motorizado tipo 75/16 y un colector de polvo modelo DC400.

Este tratamiento se realizó con bolas de alambre cortado redondeado CW0,7 y una intensidad de 19A al 100% de cobertura. En primer lugar se hizo el estudio de la curva de Avrami con el fin de obtener el tiempo necesario para asegurar el 100% de cobertura, concluyendo que las probetas planas tenían que dispararse durante 22 s con una presión de 3 bares y un paso de llave de dos vueltas. Para las probetas de fatiga se disparó en las mismas condiciones durante 80 vueltas a razón de una vuelta por segundo para asegurar la cobertura del 100% de las probetas de fatiga.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Una vez realizado este tratamiento a todas las probetas, se hicieron las medidas de rugosidad y en algunas de ellas se hicieron segundos tratamientos.

3.2 Tratamiento de acabado por vibración

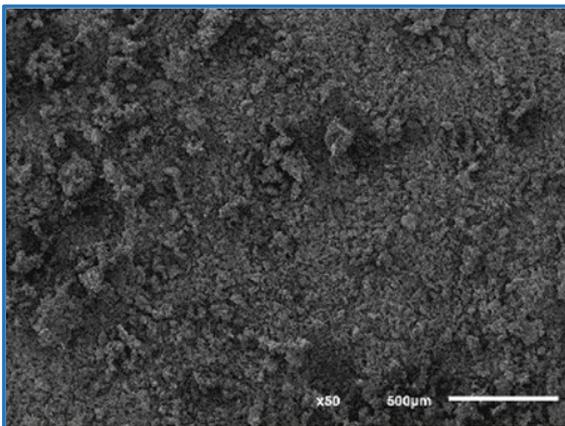
Estos tratamientos se incluyen dentro de los procesos de arranque de material con una base químico-mecánica. El objetivo principal de estos tratamientos es la mejora de la calidad superficial, tanto el suavizado del perfil de rugosidad, eliminando una mínima cantidad de material, como la eliminación de los defectos superficiales. Se reduce principalmente la rugosidad media y máxima, gracias a lo cual se consigue disminuir el posible daño superficial que podría haber sido generado en el tratamiento de shot peening previo, para de este modo ralentizar la nucleación y el crecimiento de las grietas superficiales derivadas de las cargas de fatiga.

Dentro de las tecnologías existentes para llevar a cabo estos procesos, destacan los tratamientos de acabado por vibración. Existen en el mercado equipos de diferentes tamaños, adecuados a las distintas piezas, manteniendo todos los estándares de calidad en el acabado. Los parámetros característicos de estos tratamientos son: la amplitud de la vibración aplicada, el medio abrasivo empleado, la pasta abrasiva utilizada, las revoluciones por minuto aplicadas y, sobre todo, el tiempo de duración del tratamiento.

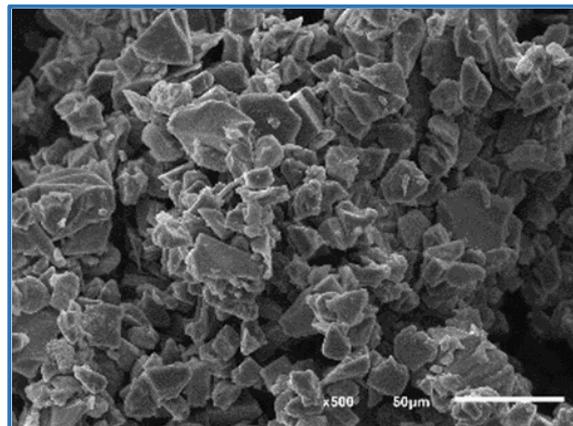
En nuestro caso los ensayos de acabado por vibración se han realizado en una máquina vibratoria de la casa Rösler, modelo Mini 30. Es una máquina que incorpora un motor eléctrico que provoca la vibración de una cubeta, en la que se encuentran las piezas a tratar. La máquina se gobierna a través de un cuadro eléctrico que permite regular la velocidad de giro del motor y programar la duración del tratamiento. El tratamiento que se realizó en el laboratorio consistió en añadir a la cubeta de la máquina las piezas a tratar junto con 25 kg de abrasivo cerámico de forma cilíndrica biselada, de 10 mm de longitud y 3

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

mm de diámetro (referencia RP 03/10 ZS), junto con 300 g de una pasta abrasiva de SiC, cuya referencia es RSP 508 S. El abrasivo cerámico es reutilizable, por lo que se puede volver a utilizar en posteriores tratamientos. En cambio, la pasta pulidora tiene una vida útil de 10 horas, lo que significa que si un ensayo dura más de 10 horas, se debe eliminar la pasta inicial y añadir una nueva. Una foto de esta pasta realizada en el microscopio electrónico a 2.000 aumentos se muestra a continuación. Se pone de manifiesto que se trata de partículas angulosas, con cantos vivos y con un tamaño de partícula en torno a los 10 micrómetros.



Pasta abrasiva RSP 508 S x50



Pasta abrasiva RSP 508 S x500

El tratamiento por vibración se inicia añadiendo los 25 kg de los cilindros cerámicos abrasivos a la cubeta de la máquina vibradora. Posteriormente han de humedecerse estos abrasivos para luego poder realizar la mezcla con la pasta pulidora. Para ello, después de encender la máquina y hacerla girar a 1500 rpm, se abre el grifo del agua y se llena hasta que el agua cubre por completo el abrasivo, luego se abre el desagüe y se deja que el agua salga por el sumidero de la máquina. Tras cerrar el grifo del agua y el desagüe, se añade la pasta pulidora a la cubeta y se espera a que se homogenice la mezcla: la humedad óptima de la mezcla será cuando ésta alcance la textura de una crema hidratante normal. Una vez completo el paso anterior, se añaden las

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

probetas a tratar a la mezcla dejándola actuar durante el tiempo adecuado manteniendo siempre las 1500 rpm.

En los tratamientos llevados a cabo en el laboratorio la duración de esta fase ha sido de 8 horas. La segunda fase del tratamiento consiste en el lavado de la mezcla, lo que se realiza abriendo al máximo el grifo del agua (el fabricante de la máquina recomienda 100 litros por hora) y se abre también el sumidero de la cubeta, para poder evacuar la pasta pulidora. Se mantiene esta etapa hasta que en la salida ya no se aprecien restos de pasta pulidora, lo que ocurre al cabo de unos 15 minutos desde el inicio de esta segunda fase. Por último se realiza la limpieza del conjunto (probetas y abrasivo). Para ello, se abre el grifo del agua al mínimo (20 litros por hora) y se le añade un jabón de referencia FC 120, utilizando una bomba dosificadora que permite un caudal de 50 mililitros por hora y que aporta el jabón al agua, antes de la entrada a la cubeta. De este modo se procede a la eliminación definitiva de los restos de pasta que pudieran haber permanecido en la superficie de las probetas y en los cilindros cerámicos. Este jabón tiene además un efecto anticorrosivo y también mejora la textura superficial en las probetas tratadas.

También se realizaron tratamientos de 16h y 24h, para lo cual se repitió el proceso dos y tres veces. Ya que al tener la pasta pulidora una vida útil de diez horas, habría que eliminarla y añadir una nueva al menos dos veces para 16h y 3 veces para 24h, por lo que se decidió hacer los tratamientos de 8h en 8h.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

3.3 Medidas de rugosidad

Tanto los procesos de shot peening como los de acabado por vibración y granallado provocan una modificación significativa de la topografía superficial de las probetas. Por ello se realizaron medidas de la rugosidad en las superficies afectadas por el tratamiento. Las medidas de rugosidad se han realizado con un rugosímetro que consta de una unidad de evaluación Mahr Marsurf M300 y una unidad de medida Mahr Marsurf RD18.

Los parámetros a configurar en el rugosímetro son la longitud total de palpado (Lt), la longitud de medida y el número de tramos iguales a considerar (N), teniendo en cuenta que se miden dos tramos adicionales, uno al inicio y otro al final, que son posteriormente desestimados. Para las medidas realizadas sobre las probetas la configuración ha sido la siguiente: $L_t = 5,60$ mm y $N = 5$, luego la zona final de muestreo fue $L_m = 4$ mm con $L_c = 0.8$. Siendo el cutoff (L_c) el filtro aplicado por la electrónica del equipo para minimizar el efecto de las ondulaciones de la pieza medida.

En las diferentes probetas, se ha medido la rugosidad en 2 ocasiones, tras el primer tratamiento de SP (19A) y después de los segundos tratamientos. Se realizaron 5 perfiles de rugosidad en cada probeta.

Los parámetros más significativos que se pueden obtener para definir un acabado superficial son los parámetros R_a y R_{max} . La rugosidad media (R_a) que representa la media aritmética de las desviaciones del perfil de rugosidad, es decir, la media de las distancias del perfil respecto a la línea media del mismo y el parámetro (R_{max}), rugosidad máxima, que el mayor valor de la diferencia entre el pico más alto y el valle más profundo medido en cada uno de los 5 tramos en los que se ha subdividido la longitud total evaluada.

Estos son los dos parámetros que se utilizarán en el resto del trabajo, R_a y R_{max} .

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

3.4 Medida del perfil de la tensión residual

Se midieron las tensiones residuales generadas en el tratamiento de SP 19A, SP 19A+8h AV, SP19A+16h AV, SP19A+24hAV.

Para poder determinar las tensiones residuales en profundidad y conocer el perfil de la tensión residual de una muestra que ha sido sometida a distintos tratamientos, se ha de eliminar material de la probeta sin generar estados tensionales adicionales. Para ello, no se pueden utilizar métodos abrasivos y se recurre al electropulido. Esta técnica elimina material de una pieza introduciendo una corriente eléctrica en la pieza a través de un electrolito de composición específica. Operando de este modo, se realizaron medidas sucesivas de la tensión residual superficial tras la aplicación del electropulido apropiado, con objeto de definir el perfil de la tensión residual.

Al eliminar material mediante electropulido es necesario considerar la redistribución o relajación de tensiones que tiene lugar como consecuencia de la eliminación de la capa superficial. Sirkarskie [x], basado en una solución de Moore y Evans[x], propone una solución generalizada en una serie de Taylor (ec. 1), que se puede simplificar tomando solo el primer término (ec. 2).

$$\sigma(z_1) = \sigma_m(z_1) + 2 \int_{z_1}^H \frac{\sigma_m(z)}{z} dz - 6z_1 \int_{z_1}^H \frac{\sigma_m(z)}{z^2} dz \dots \quad (\text{ec. 1})$$

$$\sigma(z_1) = \sigma_m(z_1) + \left(-4\sigma_m(H) \left(\frac{\Delta z_1}{H} \right) \right) \dots \quad (\text{ec.2})$$

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Siendo:

H : altura de referencia (dimensión inicial de la pieza)

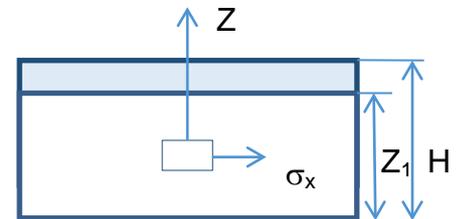
z_1 : altura de la pieza tras el electropulido

$\Delta z_1 = H - z_1$: profundidad eliminada

$\sigma(z_1)$: tensión residual corregida en la cota z_1

$\sigma_m(z_1)$: tensión residual medida en z_1

$\sigma_m(H)$: Tensión residual en la superficie



El porcentaje de error inducido por el procedimiento de electropulido se puede determinar mediante la ecuación 3.

$$\%e_{\sigma} = \frac{(\sigma_m(z_1) - \sigma(z_1))}{\sigma_m(z_1)} \times 100\% \dots \quad (\text{ec.3})$$

El electropulido se realizó con un equipo compuesto de una fuente de alimentación y una celda electrolítica. El electrolito utilizado consistió en una disolución de ácido acético 94% y perclórico 6%. Las probetas planas se colocan sobre la celda electrolítica con la superficie a electropulir situada sobre el agujero de la misma, de modo que se permite el contacto con el electrolito. Luego se fija la varilla metálica que cierra el circuito eléctrico. El tiempo de tratamiento será mayor o menor según el espesor que se quiera eliminar, que se varió entre 15 y 40 μm . Con la fuente de alimentación se regula el voltaje, la agitación y el tiempo de tratamiento. El voltaje se ha fijado en el rango 40-50V, la agitación se mantuvo en 8 en una escala de 1 a 10 y el tiempo es el parámetro con el que se juega para conseguir eliminar la cantidad de material deseado.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

En este proceso existe una relación directa entre el tiempo y el espesor arrancado, que permite eliminar exactamente la cantidad de material deseado. De este modo el proceso de electropulido se ha realizado en etapas de 20 s y se ha comprobado el espesor eliminado mediante un palpador de precisión.

Para medir la tensión residual generada en los distintos tratamientos se utilizó la técnica de difracción de rayos X, midiéndose simultáneamente con la misma técnica el parámetro FWHM (ancho de pico de difracción en la mitad de su altura), que es un índice del endurecimiento inducido. El equipo empleado fue el difractómetro de rayos X de la marca XSTRESS 3000G3. El equipo se completa con un software asociado que facilita al usuario la realización de todas las medidas.

Para medir correctamente con el dispositivo es necesario realizar previamente una correcta calibración. El dispositivo se calibra con un patrón de polvos del componente puro del material que se va a medir. En nuestro caso, como el material utilizado fue un acero F1272 (AISI 4340) templado y revenido, se ha empleado un patrón de ferrita. A continuación se muestran los parámetros idóneos de calibración y trabajo que se han empleado.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Radiación	Cr Kα	E/(1+v) (MPa)	168.900
Plano de medida	(211)	K$_{45^\circ}$ (MPa)	627
Ángulo de difracción (2θ) (°)	156.0	Coefficiente lineal de absorción (μ) (cm$^{-1}$)	909
Longitud de onda Kα_1 (nm)	0,2291	I trabajo (mA)	7
Potencial trabajo (kV)	30		

El colimador utilizado también influye en la calibración. En las medidas realizadas se utilizó un colimador de 2 mm de diámetro por ser el más funcional y adaptarse perfectamente a las medidas de las probetas planas y las de fatiga.

Una vez calibrado el equipo ya se pueden realizar las mediciones requeridas.

Tal y como se indicó anteriormente, se trabajó con dos tipos distintos de probetas: probetas planas y probetas de fatiga. Los parámetros indicados anteriormente se mantuvieron constantes para todas las medidas realizadas.

Sobre las probetas planas se determinó el perfil de la tensión residual inducido para cada uno de los distintos tratamientos. El procedimiento comenzó siempre con una medida superficial, para posteriormente eliminar una capa de material de unos 20 μm y realizar la siguiente medida. Este proceso se repitió cuantas veces fue necesario hasta que se alcanzó una profundidad en la que se obtuvo una tensión residual de tracción. La medida de la tensión residual se realizó

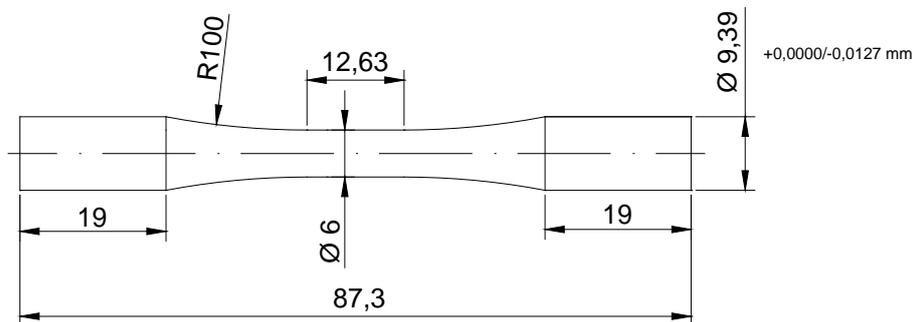
Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

siempre sobre el mismo punto central de la probeta, que fue marcado previamente con un rotulador permanente.

3.5 Ensayos de fatiga rotativa

El equipo utilizado para realizar los ensayos de fatiga fue la máquina de ensayo de fatiga de viga rotativa de alta velocidad, modelo R.R. Moore de la casa Instron (ensayo de flexión en cuatro puntos).

Los ensayos a fatiga rotativa se realizaron sobre probetas mecanizadas con las dimensiones siguientes:



Tras la mecanización de las probetas, éstas fueron tratadas superficialmente para ser posteriormente ensayadas a fatiga, bajo una tensión alterna de 1000 MPa o 1100 MPa ($R=-1$). Se llevaron a cabo los ensayos siguientes:

- Tres probetas sin tratamiento (1100 MPa)

Probetas tratadas mediante SP

- Dos probetas tras SP19A. (1000 MPa)
- Tres probetas tras SP19A (1100 MPa)

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Probetas con doble tratamiento: SP+AV

- Tres probetas con SP19A más tratamiento de acabado por vibración durante 8 horas. (SP19A+8hAV) (1000 MPa)
- Seis probetas con SP19A más tratamiento de acabado por vibración durante 8 horas. (SP19A+8hAV) (1100 MPa)
- Seis probetas con SP19A más tratamiento de acabado por vibración durante 16 horas. (SP19A+16hAV) (1100 MPa)

Tres probetas con SP19A más tratamiento de acabado por vibración durante 24 horas. (SP19A+24hAV) (1100 MPa)

La ecuación que relaciona la carga aplicada en la máquina con la tensión alterna máxima en la superficie es:

$$S = \frac{16 * P * L}{\pi * D^3}$$

Donde, S es la tensión que actúa en la fibra externa, P es la carga aplicada sobre la probeta, L es la longitud del momento aplicado (distancia del soporte al punto de carga), 101.6 mm, D es el diámetro de la probeta en su zona calibrada, que siendo nominalmente de 6 mm, varía ligeramente en función de la mecanización y los tratamientos aplicados.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

4. Resultados

Después de aplicar los segundos tratamientos de acabado por vibración obtenemos los siguientes resultados.

4.1 Rugosidad

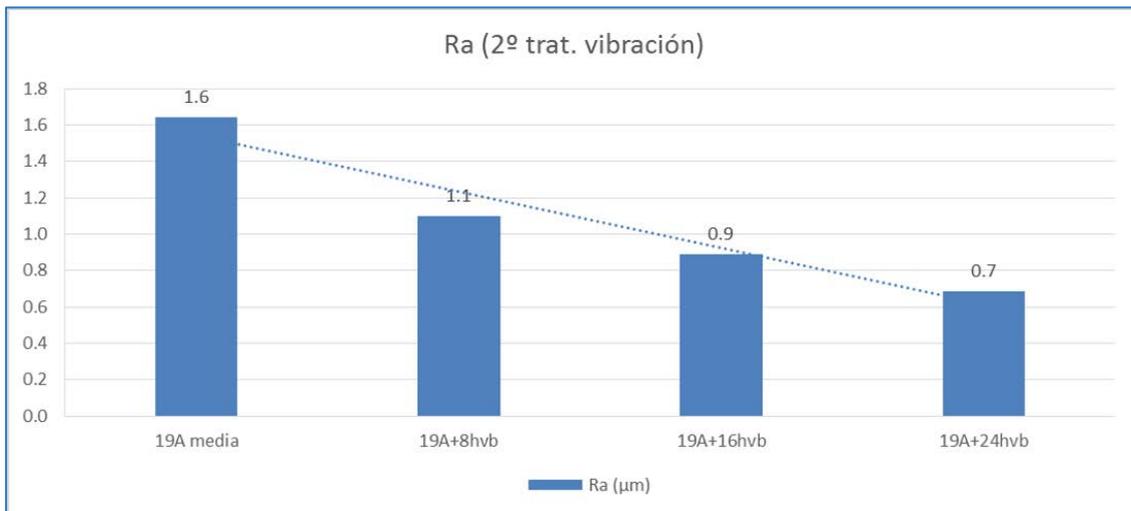
Las variaciones de rugosidad en las probetas planas para los distintos tratamientos realizados, se resumen en las siguientes tablas y en los siguientes gráficos.

Tratamiento P. Planas	Media Ra (μm)	Media Rmax (μm)
19A	1.6	10.8
(19A+8hAV)	1.1	7.4
%reducción	32.45%	31.72%

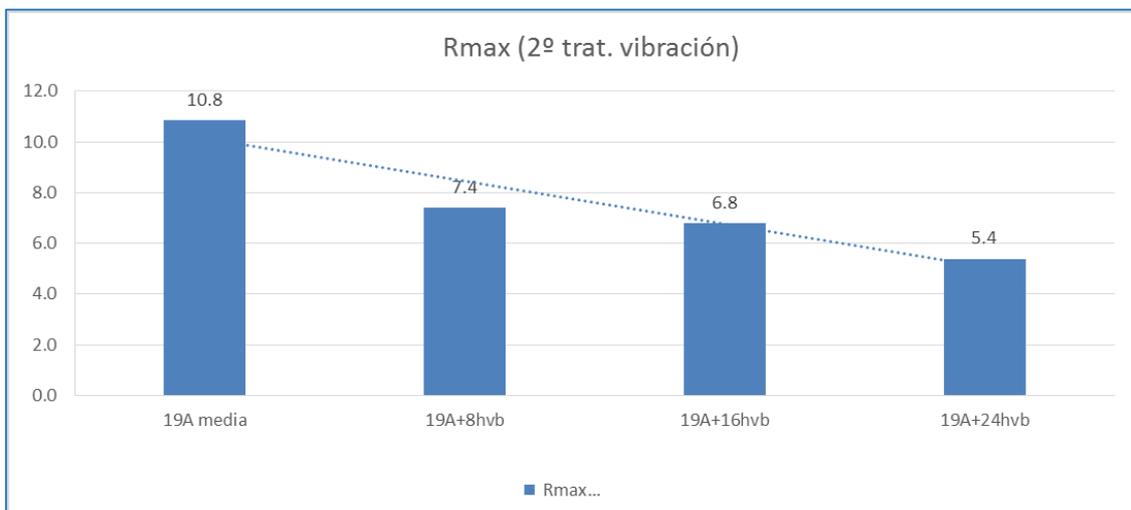
Tratamiento P. Planas	Media Ra (μm)	Media Rmax (μm)
19A	1.6	10.8
(19A+16hAV)	0.9	6.8
%reducción	42.28%	37.43%

Tratamiento P. Planas	Media Ra (μm)	Media Rmax (μm)
19A	1.6	10.8
(19A+24hAV)	0.7	5.4
%reducción	58.28%	50.34%

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Evolución de Ra de PP sometidas a SP19A y 2º Tratamiento de vibración a distintos tiempos



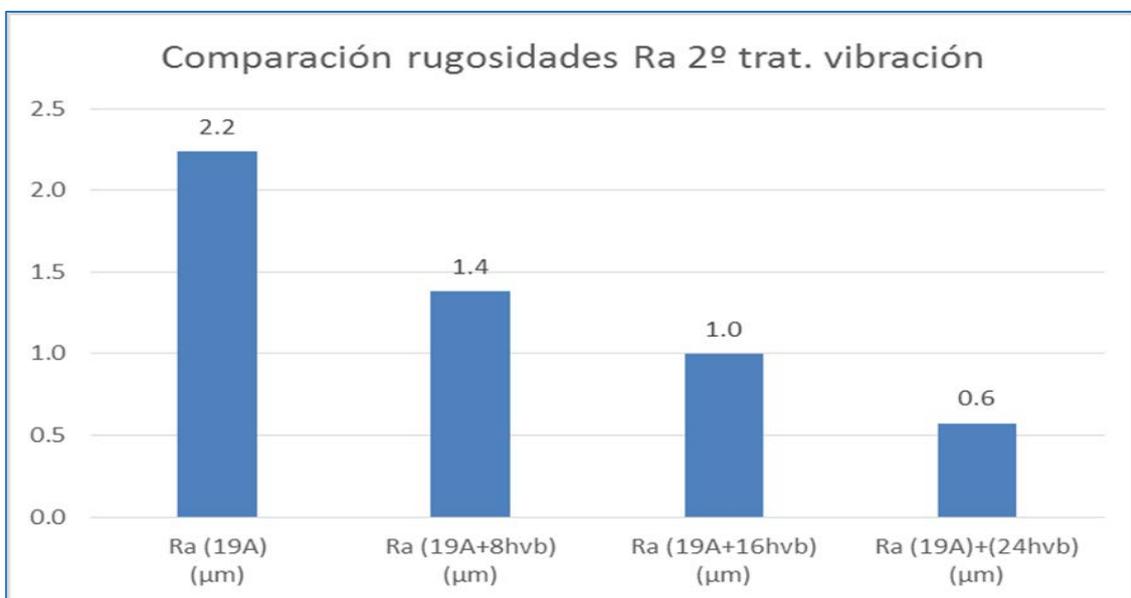
Evolución de Rmax de PP sometidas a SP19A y 2º Tratamiento de vibración a distintos tiempos

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Observamos claramente que existe una disminución de los parámetros de rugosidad con el tiempo del tratamiento. A mayor tiempo de exposición de la muestra al tratamiento, mayor es la disminución de la rugosidad.

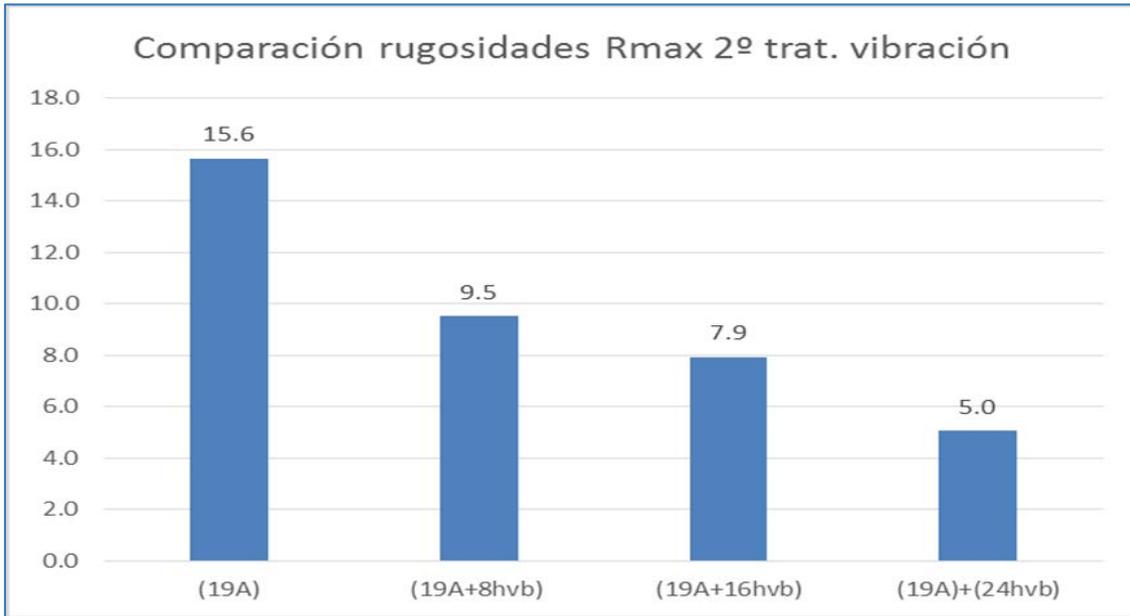
A continuación se presentan los mismos parámetros, gráficos y tablas obtenidos con las probetas de fatiga (PF).

Así comparando estos parámetros a lo largo del tiempo de duración de los acabados por vibración se han obtenido los siguientes gráficos:



Evolución de Ra de PF sometidas a SP19A y 2º Tratamiento de vibración a distintos tiempos

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Evolución de Ra de PF sometidas a SP19A y 2º Tratamiento de vibración a distintos tiempos

Las variaciones de rugosidad en las probetas de fatiga para los distintos tratamientos secundarios de vibración realizados, se resumen en la tabla siguiente.

	Valor Medio Ra (µm)	Reducción %	Valor Medio Rmax (µm)	Reducción %
(19A)	2.2		15.6	
(19A+8hAV)	1.4	38.15%	9.5	39.23%
(19A+16hAV)	1.0	55.41%	7.9	49.32%
(19A)+(24hAV)	0.6	74.37%	5.0	67.77%

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

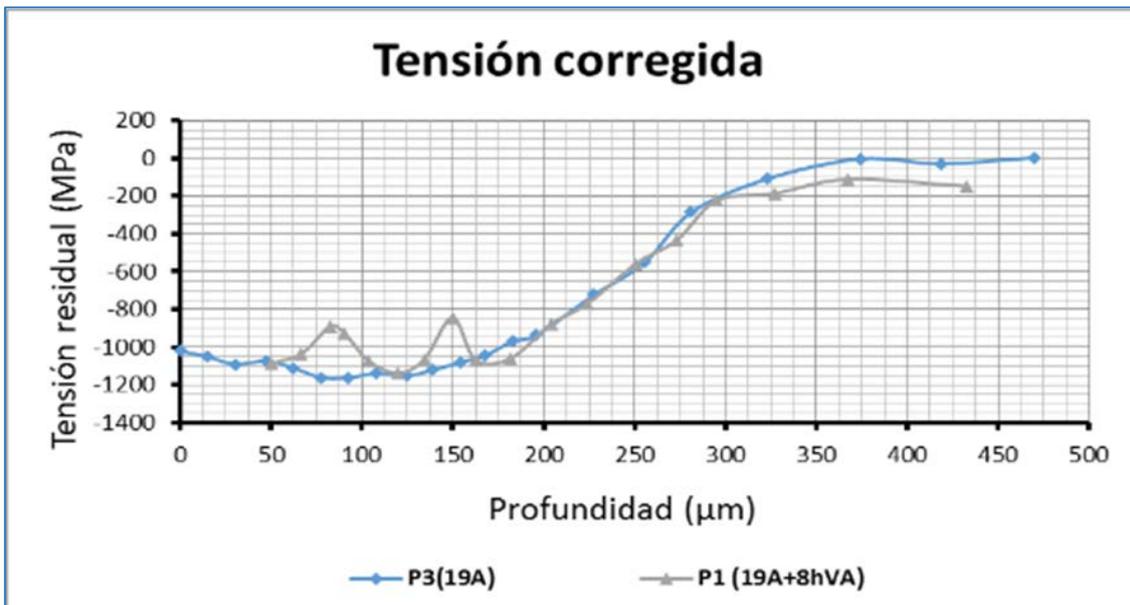
4.2 Tensiones residuales

A continuación se muestran los perfiles de tensiones residuales medidos tras los distintos tratamientos superficiales y se puso de manifiesto el efecto producido al aplicar los segundos tratamientos.

Igualmente se procedió con el parámetro FWHM (Full Width at Half Maximun) o ancho del pico de difracción en la mitad de su altura. Este parámetro es un índice del endurecimiento sufrido por el material, de modo que cuanto mayor es el parámetro FWHM, mayor es el endurecimiento inducido.

En la figura siguiente se muestran los perfiles de tensiones residuales obtenidos en una muestra sometida solo al tratamiento SP 19A frente a otra a la que además del tratamiento SP 19A se le practicó un segundo tratamiento de acabado por vibración de 8 horas de duración. Para facilitar la comparación entre ambos perfiles hemos aproximado la zona de caída de la tensión residual de ambas curvas y de este modo se puede apreciar nítidamente que el tratamiento de acabado vibratorio prolongado durante 8 horas ha eliminado una capa superficial aproximadamente igual a 50 μm . Podemos observar que la tensión residual superficial de compresión tras el segundo tratamiento coincide perfectamente con el valor de la tensión existente en ese mismo punto tras el primer tratamiento de SP 19A. También vemos que tras el segundo tratamiento de acabado por vibración, en la región más superficial (hasta una profundidad de unos 100 μm) se observa una cierta fluctuación de la tensión residual, que pudiera ser producida por el golpeo repetido de las piezas abrasivas durante las ocho horas del tratamiento.

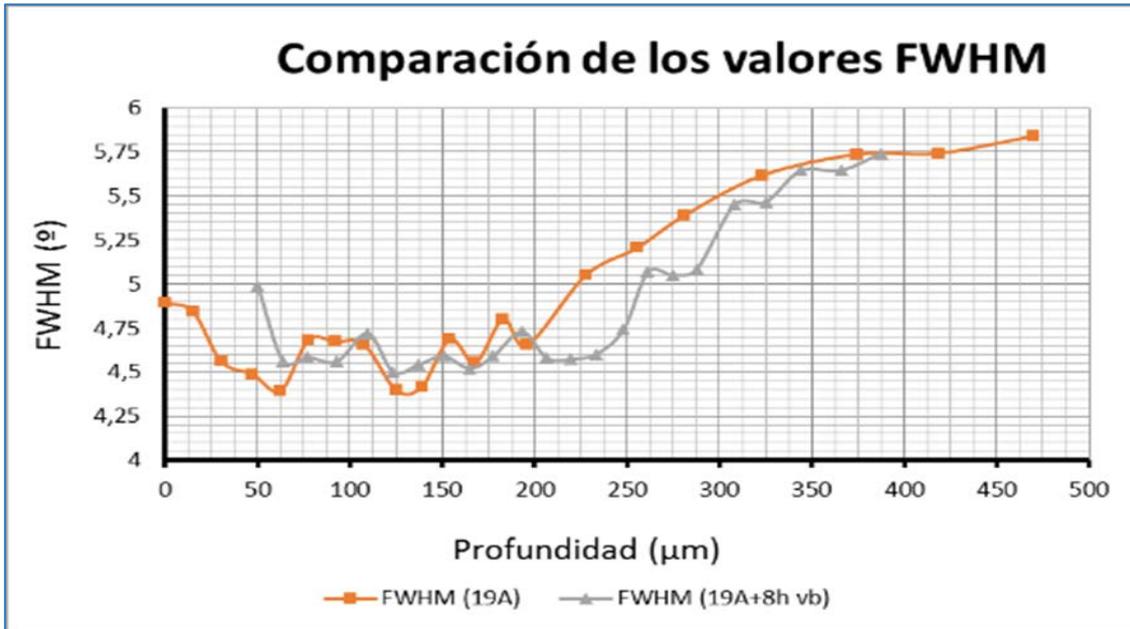
Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Comparación de tensiones (19A) – (19A+8hAV)

En la figura siguiente se muestran los perfiles del parámetro FWHM tras el tratamiento superficial SP 19A y tras este mismo tratamiento seguido del acabado por vibración de 8 horas. Se han superpuesto los dos perfiles trasladando al segundo la profundidad eliminada en el acabado por vibración, que recordemos era de 50 μm. Aparte del ligero endurecimiento registrado en la primera medida (superficie) tras el doble tratamiento, el resto del perfil es ya bastante parecido, por lo que el efecto del acabado por vibración parece que se traduce en un leve endurecimiento en la región más superficial, que sería debido a los repetidos choques de la superficie de la muestra contra las piezas abrasivas cerámicas.

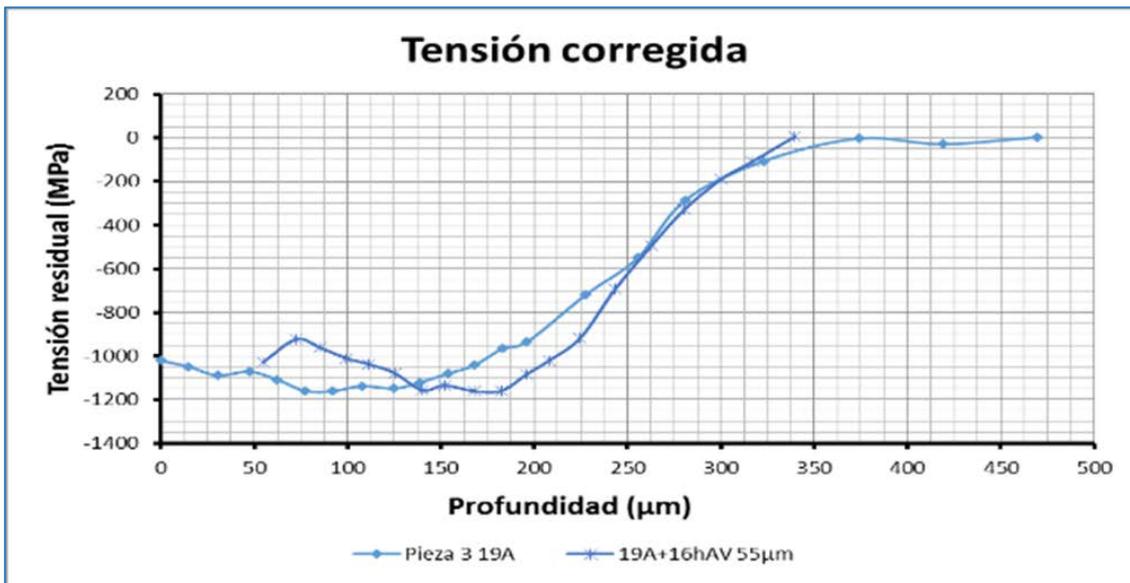
Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Comparación de FWHM (19A) – (19A+8hAV)

En la figura siguiente se muestran los perfiles de tensiones residuales obtenidos en una muestra sometida solo al tratamiento SP 19A frente a otra a la que además del tratamiento SP 19A se le practicó un segundo tratamiento de acabado por vibración de 16 horas de duración. Al igual que en el caso anterior, para facilitar la comparación entre ambos perfiles hemos aproximado la zona de caída de la tensión residual de ambas curvas y de este modo se puede apreciar nítidamente que el tratamiento de acabado vibratorio prolongado durante 16 horas ha eliminado una capa superficial aproximadamente igual a 55 µm. Por otro lado podemos observar que la tensión residual superficial de compresión tras el segundo tratamiento se aproxima bastante al valor de la tensión existente en ese mismo punto tras el primer tratamiento de SP 19A.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



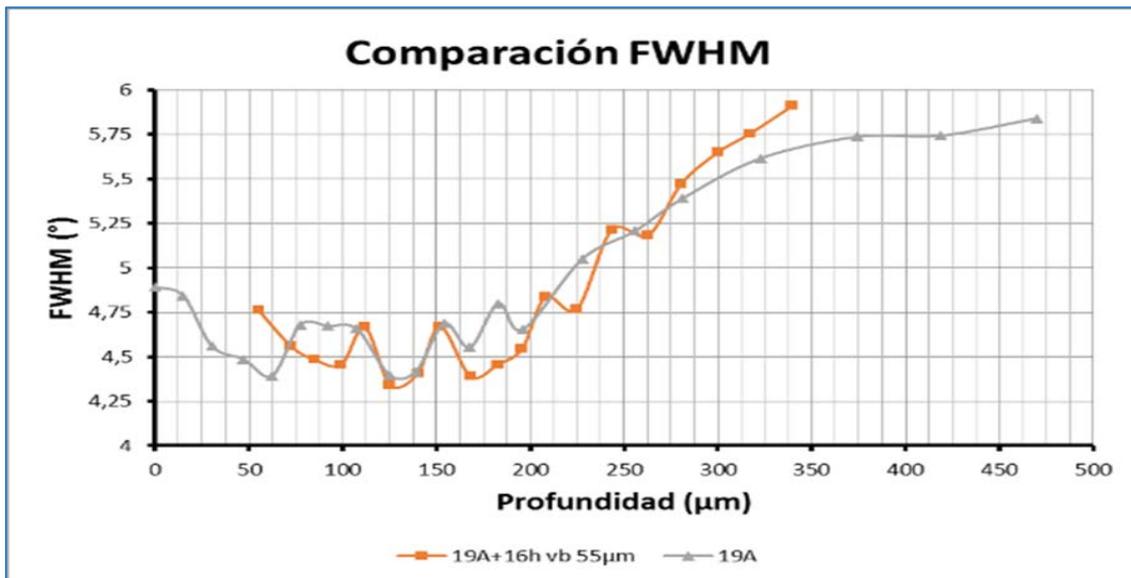
Comparación de tensiones (19A) – (19A+16hAV)

En la figura siguiente se muestran los perfiles del parámetro FWHM tras el tratamiento superficial SP 19A y tras este mismo tratamiento seguido del acabado por vibración de 16 horas.

Se han superpuesto los dos perfiles trasladando al segundo la profundidad eliminada en el acabado por vibración que recordemos era de 55 µm.

Aparte del ligero endurecimiento registrado en la primera medida (superficie) tras el doble tratamiento, el resto del perfil es ya bastante parecido, por lo que el efecto del acabado por vibración parece que se traduce en un leve endurecimiento en la región más superficial, que sería debido a los repetidos choques de la superficie de la muestra contra las piezas abrasivas cerámicas.

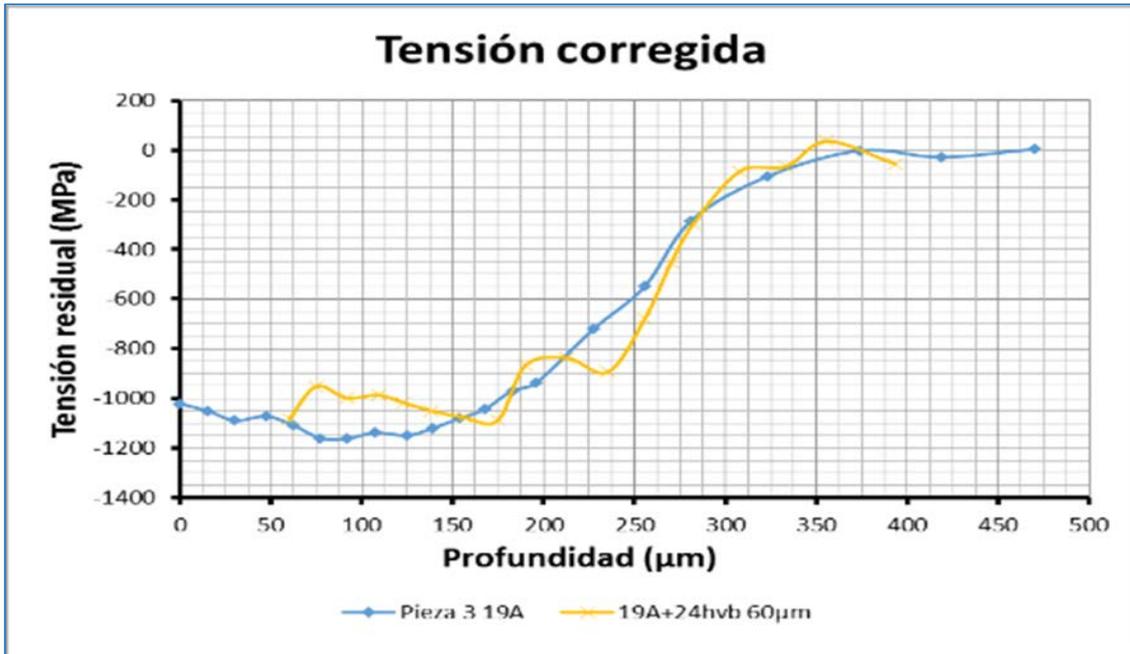
Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Comparación de FWHM (19A) – (19A+16hAV)

A continuación se muestran los perfiles de la tensión residual obtenidos en una muestra sometida solo al tratamiento SP 19A frente a otra a la que además del tratamiento SP 19A se le practicó un segundo tratamiento de acabado por vibración de 24 horas de duración. Al igual que en el caso anterior, para facilitar la comparación entre ambos perfiles hemos aproximado la zona de caída de la tensión residual de ambas curvas y de este modo se puede apreciar que el tratamiento de acabado vibratorio prolongado durante 16 horas ha eliminado una capa superficial aproximadamente igual a 60 µm. Por otro lado podemos observar que la tensión residual superficial de compresión tras el segundo tratamiento se aproxima bastante al valor de la tensión existente en ese mismo punto tras el primer tratamiento de SP 19A. También vemos, al igual que en los casos anteriores, que tras el segundo tratamiento de acabado por vibración, se observa una cierta fluctuación de la tensión residual en la región más superficial (hasta unos 100 µm), que se atribuye al golpeo repetido de las piezas abrasivas durante las dieciséis horas del tratamiento.

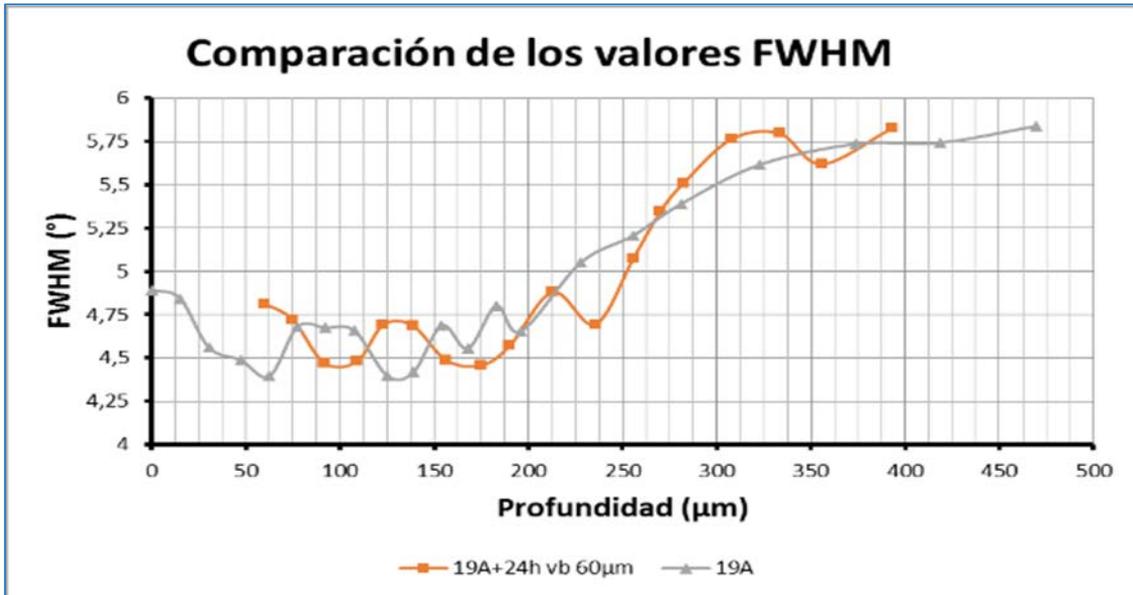
Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Comparación de tensiones (19A) – (19A+24hAV)

En la figura siguiente se muestran los perfiles del parámetro FWHM tras el tratamiento superficial SP 19A y tras este mismo tratamiento seguido del acabado por vibración de 24 horas. Se han superpuesto los dos perfiles trasladando al segundo la profundidad eliminada en el acabado por vibración que recordemos era de 60 µm. Como en los casos anteriores, se observa el ligero endurecimiento registrado en la primera medida tras el doble tratamiento, siendo el resto del perfil ya bastante parecido.

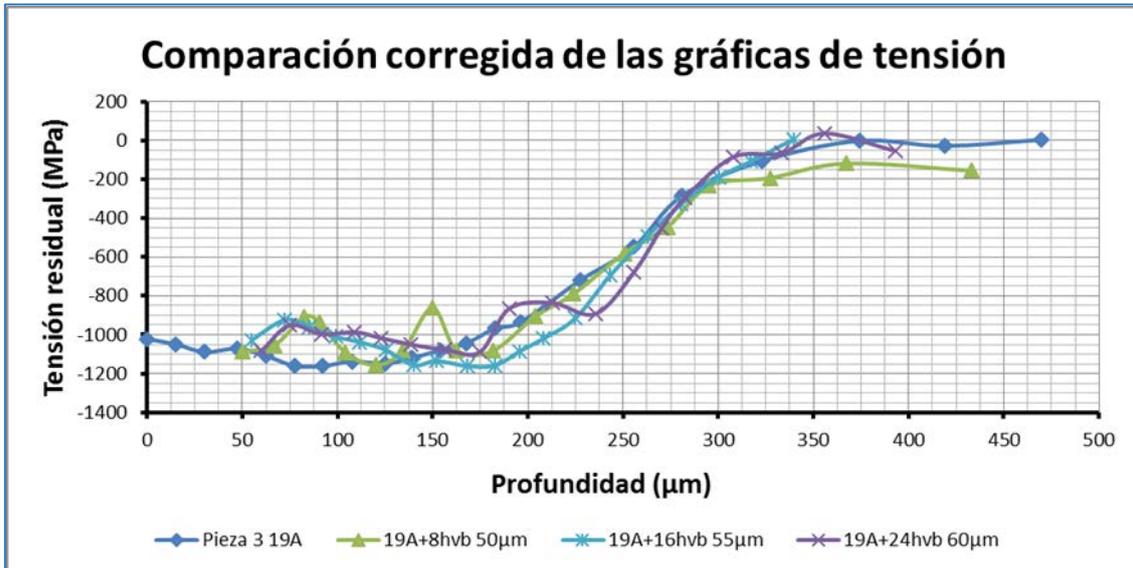
Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Comparación de FWHM (19A) – (19A+24hAV)

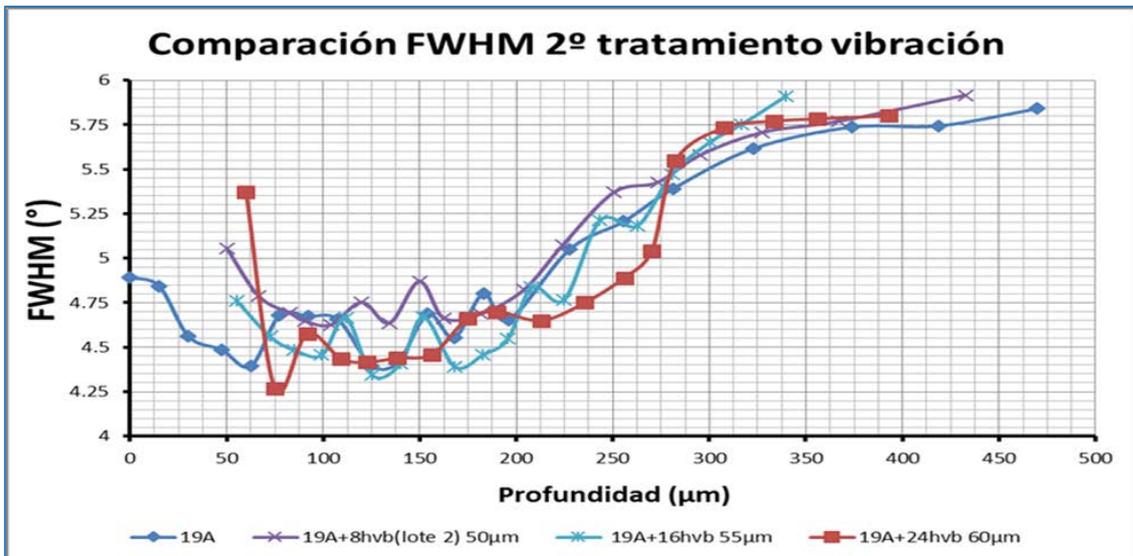
Por último se muestra una gráfica conjunta de todos estos perfiles con objeto de comparar los perfiles de la tensión residual obtenidos tras los tratamientos de acabado por vibración de 8, 16 y 24 horas de duración frente al del tratamiento previos de SP 19A. Recordemos que los tratamientos de acabado vibratorio prolongados durante 8h, 16h y 24h horas habían eliminado respectivamente una capa superficial igual a 50µm, 55µm y 60 µm.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



Comparación de tensiones (19A) – (19A+8hAV)-(19A+16hAV)+(19A+24hAV)

Se ha representado a continuación una gráfica similar a la anterior recogiendo los perfiles del parámetro FWHM.



Comparación FWHM (19A) – (19A+8hAV)-(19A+16hAV)+(19A+24hAV)

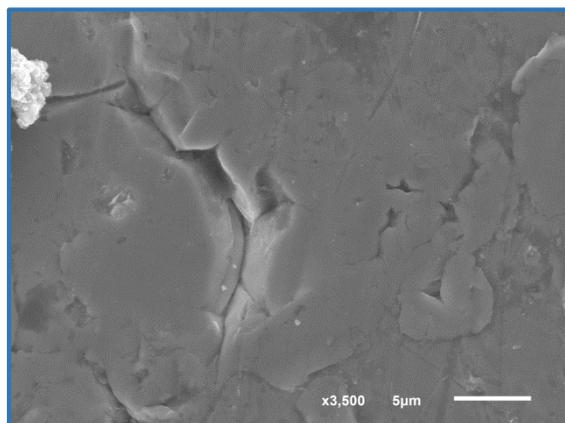
Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

Los perfiles del parámetro de endurecimiento de las probetas con segundos tratamiento de vibración se aproximan bastante al de la probeta con solo el tratamiento de SP 19A, a excepción de la zona más superficial donde se observa un incremento de endurecimiento en las probetas con segundos tratamientos de vibración, siendo el incremento más notorio el que se produce con el tratamiento secundario de 24h de vibración.

Por otro lado, el acabado por vibración parece que es capaz de eliminar con relativa rapidez la región más superficial, que es en la que se concentra el daño generado en el tratamiento de shot peening de alta intensidad, mientras que la efectividad de utilizar tiempos de tratamiento superiores (16 h y 24 h) es ya ostensiblemente menor.

4.3 Examen topográfico de las superficies tratadas

Se muestran en primer lugar imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de barrido de las superficies tratadas mediante shot peening y, a continuación, el efecto que produce la aplicación de los segundos tratamientos de acabado por vibración.



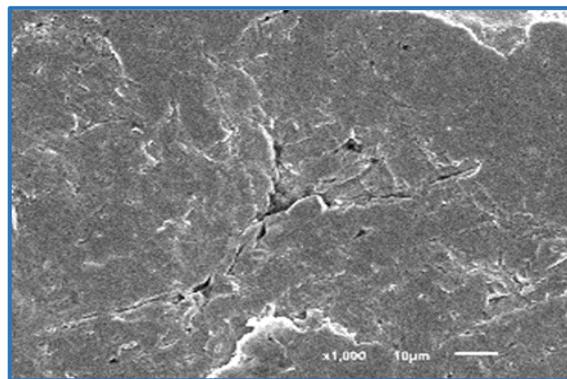
Superficie tras SP 19A

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

En la observación de la superficie sometida a shot peening de intensidad 19A se puede ver la presencia de defectos en forma de pequeñas grietas superficiales en los bordes de los impactos de los proyectiles.

En las micrografías siguientes podemos observar el estado final de la superficie de un material tratado con SP19A al que se ha sometido posteriormente a un tratamiento de acabado por vibración prolongado durante 8 horas. Se observa que el tratamiento de acabado por vibración ha borrado parcialmente las huellas generadas en los impactos de los proyectiles del tratamiento de shot peening y ha eliminado parte de los defectos superficiales, aunque tras un minucioso estudio se han podido encontrar todavía algunos defectos de shot peening, que se han mantenido al final de este segundo tratamiento, aunque lógicamente cabe prever que habrá disminuido la magnitud y la profundidad de los mismos.

A continuación podemos ver micrografías donde podemos observar el estado final de la superficie de un material tratado con SP19A al que se ha sometido posteriormente a un tratamiento de acabado por vibración prolongado durante 8 horas.

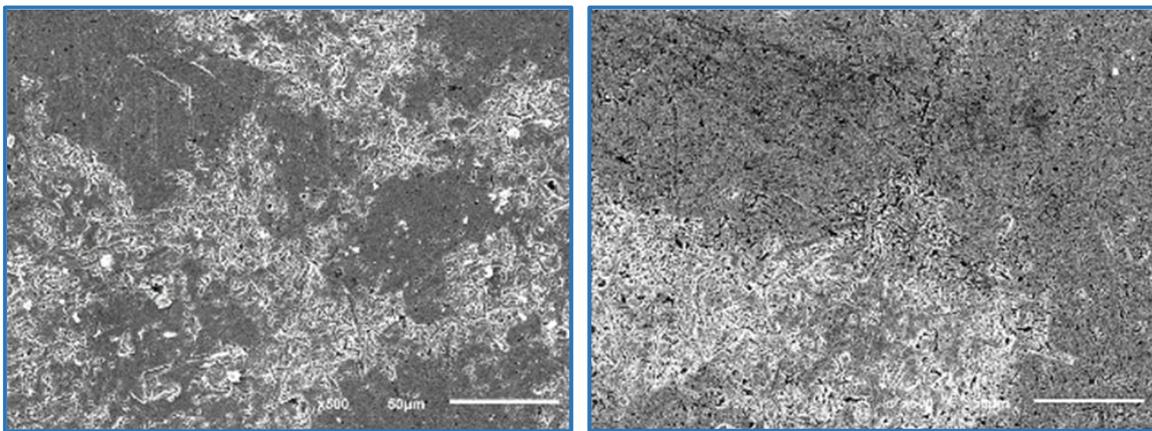


Superficie sometida a (SP19A+8hAV) a x1000

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

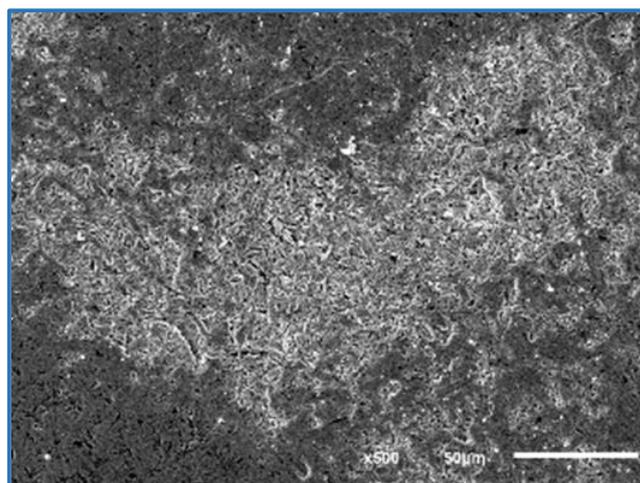
A continuación se muestran juntas tres micrografías correspondientes a muestras tratadas con un primer tratamiento de 19A y un segundo tratamiento de vibración de 8h, de 16h y de 24h a 500x.

Observando las micrografías no llegamos a distinguir diferencias topográficas significativas, aunque los valores de rugosidad así nos lo indicaban. De todos modos, el daño principal generado en el tratamiento previo de shot peening parece que ha sido eliminado.



19A+8hAV

19A+16hAV



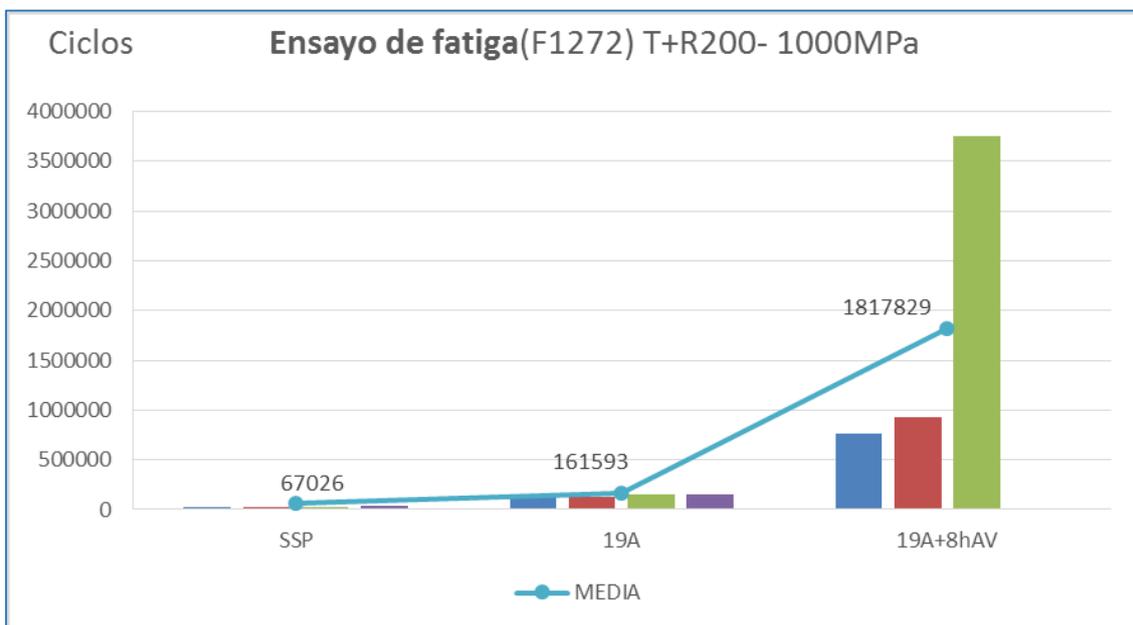
19A+24hAV

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

4.4 Ensayos de fatiga

En esta parte del trabajo se presentan los resultados de los ensayos de fatiga y con ellos confirmamos que los tratamientos secundarios han mejorado notablemente el comportamiento a fatiga de este acero en relación a las probetas sometidas exclusivamente al tratamiento inicial de shot peening (SP 19A).

El efecto de los tratamientos superficiales ha sido muy notorio. El tratamiento de shot peening con una intensidad de 19A ha permitido incrementar la vida a fatiga en un factor próximo a 4 frente a las probetas sin tratar. Por otro lado, la aplicación del segundo tratamiento de acabado por vibración aplicado durante 8 horas ha supuesto un incremento de vida superior a 12 veces en relación al primer tratamiento de SP y de 46 veces en relación a las probetas sin tratar.



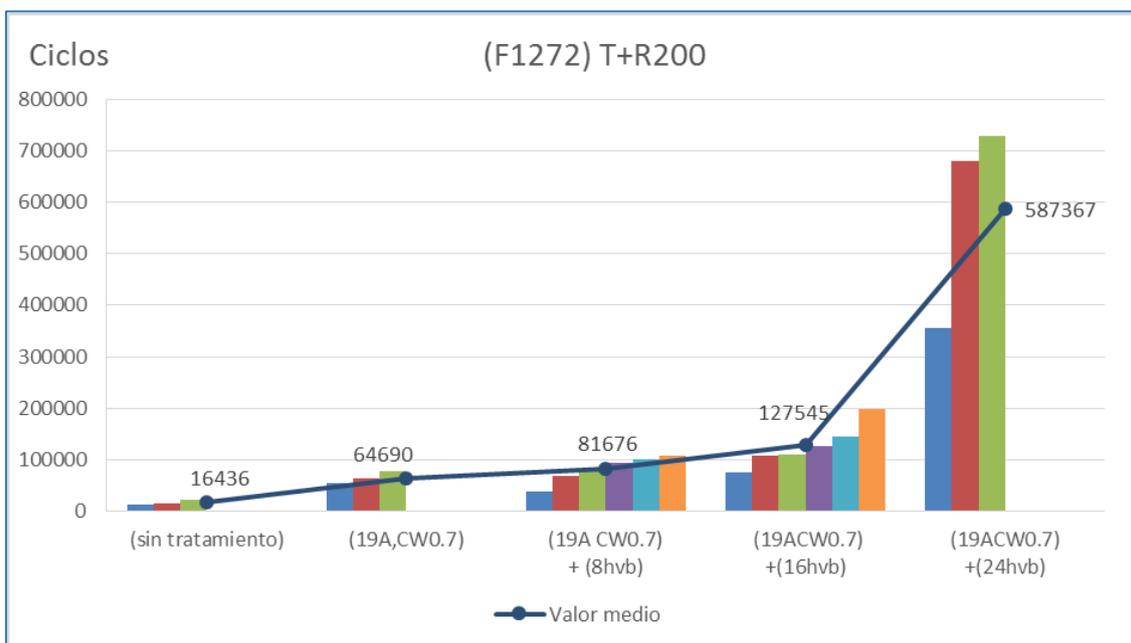
Comparación ensayos de fatiga (1000MPa) SSP-SP19A-19A+8hAV

Por otro lado, como la vida a fatiga de algunas de estas muestras bajo una tensión alterna de 1000 MPa era ya muy alta y algunas probetas no llegaban a

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

romper, se continuó el estudio del comportamiento a fatiga utilizando una tensión alterna de 1100 MPa.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos a fatiga realizados a 1100 MPa, para lo que se ha representado también como en el caso anterior en un diagrama de barras el valor individual obtenido con cada una de las probetas y el valor medio del conjunto.



Comparación ensayos de fatiga (1100MPa) SSP-SP19A -19A+8hAV – 19A+16hAV - 19A+24hAV

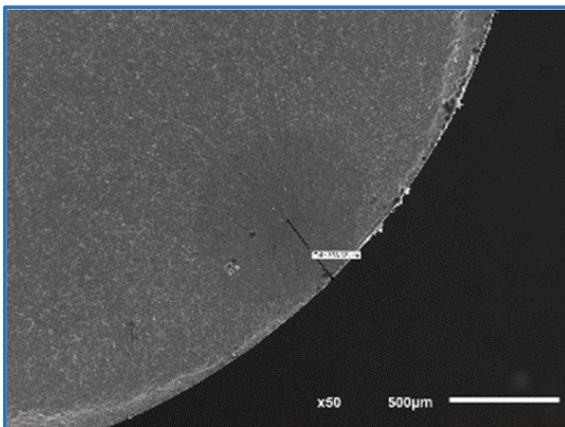
En este caso, también observamos que el efecto de los tratamientos superficiales ha seguido en la misma línea y que los tratamientos segundos de acabado por vibración han supuesto siempre una mejora notable en el comportamiento a fatiga del acero. Se pone también de manifiesto que es posible incrementar notablemente la vida a fatiga de estas probetas prolongando el tiempo del tratamiento de acabado por vibración. La vida media a fatiga ha pasado respectivamente de 81.676 a 127.545 y a 587.367 para los tiempos de acabado de 8, 16 y 24 horas.

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros

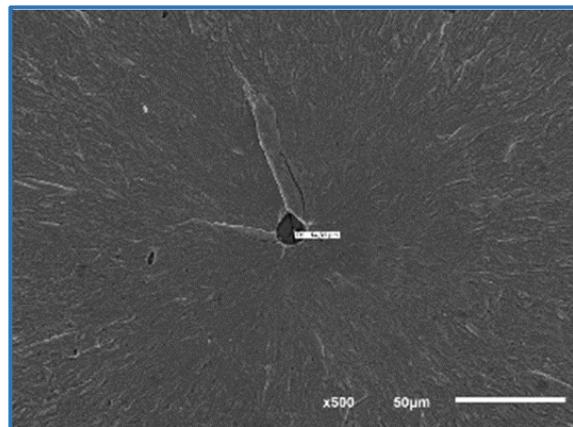
4.5 Examen fractográfico de las probetas rotas a fatiga

En el siguiente apartado se muestran algunas de las superficies de fractura de las probetas rotas a fatiga que fueron analizadas con un microscopio electrónico de barrido, con el objeto de observar los mecanismos de fallo operativos y, si fuera posible, el lugar de inicio del fallo por fatiga en la probeta.

Las primeras fotos corresponden a la probeta sometida a SP 19A + 8 horas de tratamiento de acabado por vibración rota a fatiga bajo una tensión alterna de 1000 MPa. Esta fue una de las probetas que tuvo una mayor vida a fatiga, ya que rompió tras 3.756.024 ciclos. Se observa que esta probeta tuvo un origen de fallo subsuperficial (a una profundidad de aproximadamente 336 μm). La figura que muestra el perfil de la tensión residual en estas probetas muestra que aproximadamente es a esta profundidad a la que desaparecen las tensiones residuales de compresión.

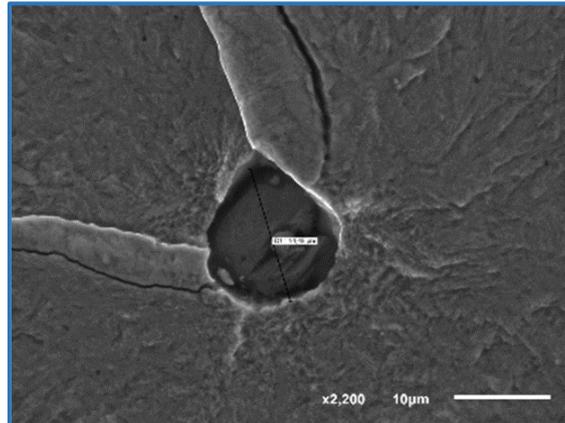


SP 19A + 8hAV (1000MPa) x50



SP 19A + 8hAV (1000MPa) x500

Tratamiento doble de Shot Peening seguido de acabado por vibración con objeto de mejorar la resistencia a la fatiga de los aceros



SP 19A + 8hAV (1000MPa) x2200

Bajo un mayor número de aumento se observa que el punto de inicio del fallo está ligado a la presencia de una inclusión bastante grande, de forma aproximadamente esférica y con un diámetro aproximado de 14 μm . Se realizó un análisis cualitativo de la inclusión y se apreció que era de alúmina. Se ha demostrado así la eficacia del tratamiento aplicado, ya que las tensiones de compresión han sido capaces de evitar la formación de grietas superficiales, a pesar de ser esa la región más cargada en los ensayos de fatiga.

5. Conclusiones

En este trabajo se estudió los efectos que produce sobre la rugosidad, las tensiones residuales, la microestructura y la vida a fatiga, un doble tratamiento de shot peening seguido de un tratamiento de acabado por vibración.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos que se reflejan en el apartado anterior del trabajo, podemos obtener las siguientes conclusiones:

- La aplicación de un tratamiento de shot peening de 19 A es capaz de incrementar sustancialmente la vida a fatiga en relación al material no tratado (la vida media a fatiga se incrementó unas cuatro veces).
- El valor de las tensiones residuales tras el tratamiento de acabado por vibración se aproxima bastante al obtenido después de los tratamientos de shot peening, es decir, las tensiones residuales no resultan apenas modificadas. También se observa que el tratamiento de acabado por vibración produce un ligero endurecimiento de la superficie.
- El acabado por vibración es capaz de eliminar con relativa rapidez la región más superficial, que es donde se concentra el daño producido por los tratamientos de shot peening. El tratamiento de acabado por vibración borró parcialmente las huellas generadas en los impactos de los proyectiles de los tratamientos de shot peening y eliminó parte de los defectos superficiales.
- Al aplicar el acabado por vibración se observa que la rugosidad se reduce considerablemente, dependiendo del tiempo de aplicación del tratamiento. A mayor tiempo de duración del tratamiento mayor será el porcentaje de reducción de la rugosidad.
- La aplicación del acabado por vibración aumentó considerablemente la vida a fatiga del material en relación al tratamiento anterior de shot peening. También se observa que es posible incrementar notablemente la vida a fatiga de las probetas prolongando el tiempo del tratamiento de acabado por vibración.

6. Bibliografía

- A.T. Vielma; V. Llana; F.J. Belzunce “Effect of coverage and double peening treatments on the fatigue life of a quenched and tempered structural steel”, Surface & Coatings Technology 249 (2014) 75-83.
- S. Tekeli “Enhancement of fatigue strength of SAE 9245 steel by shot peening”, Materials Letters 57 (2002) 604-608.
- David A. Davidson “Surface Finishing Reaches New Heights”, www.metalfinishing.com, March 2005, 25-28.
- David A. Davidson “Surface Condition Impacts Part Performance”, www.metalfinishing.com, February 2007, 22-31.
- Harold Luong; Michael R. Hill “The effects of laser peening and shot peening on high cycle fatigue in 7050-T7451 aluminum alloy”, Material Science and Engineering, A 527 (2010) 699-707.
- www.metalspain.com
- Apuntes de la asignatura: “Materiales estructurales”, Máster Universitario en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras, Curso 2013/2014.
- Apuntes de la asignatura: “Fatiga, corrosión bajo tensión y fluencia”, Máster Universitario en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras, Curso 2013/2014.