

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

---

**TRABAJO FIN DE MASTER**

***Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening***

*Autor: Andrea Corral Abelairas*

*Entidad colaboradora: ITMA*

*Tutor industrial: José Manuel Artúmez Encina*

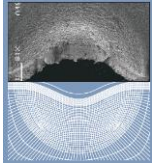
*Departamento: Siderometalurgia*

*Tutor académico: Javier Belzunce Varela*

*Departamento: Ciencia de materiales e ingeniería metalúrgica*

*Universidad de Oviedo*

*Julio 2014*



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

---

**TRABAJO FIN DE MASTER**

***Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening***

*Firma*

*José Manuel Artímez*

*Firma*

*Javier Belzunce*

*Firma*

*Andrea Corral Abelairas*

*Universidad de Oviedo*

**Julio 2014**

# Índice de contenidos

Índice de contenidos .....	3
Índice de figuras.....	5
Índice de tablas.....	8
1. Introducción.....	9
1.1 Marco y Objetivos del trabajo.....	9
2. Tratamientos de shot Peening.....	11
2.1 Proceso de Shot Peening .....	11
2.2 Parámetros que influyen en el tratamiento de shot peening.....	14
2.2.1 El tipo proyectiles. ....	14
2.2.2 Intensidad Almen.....	17
2.2.3 Grado de cobertura.....	19
2.3 Efectos del shot peening.....	19
2.3.1 Tensiones residuales.....	19
2.3.2 Rugosidad .....	22
2.3.3 Dureza superficial .....	22
3. Procedimiento experimental.....	24
3.1 Tratamientos de shot peening .....	24
3.2 Determinación del perfil de la tensión residual .....	27
3.3 Determinación del perfil de dureza .....	30
3.4 Análisis microestructural .....	30
3.5 Ensayos de desgaste .....	30
4. Resultados y discusión.....	33
4.1 Aceros .....	33
4.2 Tratamiento de shot peening.....	34
4.3 Medida de las tensiones residuales.....	34
4.4 Evolución de la austenita retenida .....	40
4.5 Medida de la Rugosidad.....	41
4.6 Análisis microestructural .....	42
4.7 Perfiles de Dureza.....	47
5. Conclusiones.....	58
6. Bibliografía.....	60
7. Presupuesto .....	61

8.	Anexo.....	62
8.1	Tensiones residuales.....	62
8.2	FWHM.....	65
8.3	Austenita retenida.....	68

# Índice de figuras

Figura 1. Esquema del tratamiento de shot peening y esquema del efecto principal de dicho tratamiento sobre la superficie tratada. ....	11
Figura 2. Esquema de la zona afectada por las tensiones residuales de compresión. ....	12
Figura 3. Representación del perfil de tensiones residuales tras un tratamiento SP. ....	13
Figura 4. Efecto de las tensiones de compresión introducidas con el tratamiento de shot peening.....	13
Figura 5. proyectiles de acero esféricos.....	15
Figura 6. proyectiles de acero de alambre cortado (cut wire). ....	15
Figura 7. Izda.: Microesferas de vidrio. Dcha.: Microesferas cerámicas. ....	16
Figura 8. Formas de proyectiles aceptados por normativa. ....	16
Figura 9. Formas de proyectiles no aceptados por normativa. ....	16
Figura 10. Esquema de la deformación generada sobre una placa Almen. ....	17
Figura 11. Representación de la Curva de Saturación. ....	18
Figura 12. Fotografía del equipo de Difracción de Rayos X. ....	20
Figura 13. Perfil de tensiones residuales.....	21
Figura 14. Representación de la tensión aplicada (flexión) junto a la tensión residual de shot peening.....	21
Figura 15. Diferenciación entre ondulación y rugosidad. ....	22
Figura 16. Equipo de tratamiento de shot peening. ....	24
Figura 17. Esquema del procedimiento llevado a cabo con las placas Almen. ....	25
Figura 18. Vista en el microscopio del acero bainítico y Hadfield tras 3 s de shot peening. ....	26
Figura 19. Vista de las fotografías recogidas en la “Figura 18” una vez modificadas en el Paint. ....	26
Figura 20. “Figura 19” después de aplicarle la rutina en el procesador de imágenes. ....	26
Figura 21. Definición del parámetro FWHM sobre el pico de difracción. ....	28
Figura 22. Equipo de fricción de alta frecuencia utilizado en los ensayos de desgaste.....	30
Figura 23. Movimiento lineal alternativo en el ensayo de desgaste. ....	31
Figura 24. Perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM en las tres direcciones de medida. Acero bainítico con cobertura del 100%.....	35
Figura 25. Perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM en las tres direcciones de medida. Acero bainítico con cobertura del 500%.....	35
Figura 26. Perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM en las tres direcciones de medida. Acero Hadfield con cobertura del 100%. ....	35

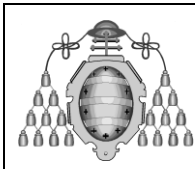
Figura 27. Perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM en las tres direcciones de medida. Acero Hadfield con cobertura del 500%. .....	36
Figura 28. Perfil medio de la tensión residual superficial en el acero bainítico. ....	36
Figura 29. Perfil medio de la tensión residual superficial en el acero Hadfield. ....	37
Figura 30. Representación del perfil del parámetro medio FWHM en las probetas del acero bainítico.....	39
Figura 31. Representación del perfil del parámetro medio FWHM en las probetas del acero Hadfield.....	39
Figura 32. Evolución de la austenita retenida desde la superficie en el acero bainítico tras shot peening con coberturas del 100% y 500%. ....	40
Figura 33. Evolución de la austenita con la profundidad en el acero Hadfield tras shot peening .....	41
Figura 34. Microestructura del acero bainítico sin tratamiento de shot peening. ....	43
Figura 35. Microestructura del acero bainítico tras shot peening con cobertura del 100%. ....	44
Figura 36. Microestructura del acero bainítico tras shot peening con cobertura del 500%. ....	44
Figura 37. Microestructura del acero Hadfield sin tratamiento de shot peening. ....	45
Figura 38. Microestructura del acero Hadfield tras shot peening con cobertura del 100%. ....	46
Figura 39. Microestructura del acero Hadfield tras shot peening con cobertura del 500%. ....	46
Figura 40. Evolución de la dureza del acero bainítico con la profundidad desde la superficie tratada.....	47
Figura 41. Evolución de la dureza del acero Hadfield con la profundidad desde la superficie tratada.....	48
Figura 42. Representación de la pérdida de volumen frente a la longitud recorrida en el acero bainítico sin SP.....	49
Figura 43. Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero bainítico con cobertura del 100%. ....	49
Figura 44. Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero bainítico con cobertura del 500%. ....	50
Figura 45. Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero Hadfield sin SP.....	51
Figura 46. Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero Hadfield con cobertura del 100%.....	51
Figura 47. Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero Hadfield con cobertura del 500%.....	52
Figura 48. Pérdida de volumen del acero bainítico con cobertura del 100% tras acabado por vibración.....	53
Figura 49. Pérdida de volumen del acero Hadfield con cobertura del 100% tras acabado por vibración.....	54

Figura 50. Profundidad de la huella en el ensayo de desgaste del acero bainítico sin tratar superficialmente .....	56
Figura 51. Profundidad de la huella en el ensayo de desgaste del acero Hadfield sin tratar superficialmente. ....	56
Figura 52. Localización de los puntos de dureza medidos debajo de la huella generada en el ensayo de desgaste; a) acero bainítico, b) acero Hadfield.....	57
Figura 53. Perfil de dureza bajo la huella de desgaste en los aceros Hadfield y bainítico sin tratar superficialmente. ....	57

# Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de placas Almen.....	18
Tabla 2. Parámetros de difracción utilizados en la medida de las tensiones residuales de los aceros bainítico y Hadfield. ....	28
Tabla 3. Propiedades a tracción de los aceros estudiados.....	33
Tabla 4. Parámetros utilizados en los tratamientos de shot peening.....	34
Tabla 5. Parámetros característicos de los perfiles de tensión residual.....	38
Tabla 6. Rugosidad del acero bainítico.....	41
Tabla 7. Rugosidad del acero Hadfield.....	42
Tabla 8. Constante adimensional de desgaste .....	52
Tabla 9. Constante adimensional de desgaste de las probetas acabadas por vibración. ....	54
Tabla 10. Constante adimensional de desgaste .....	55
Tabla A.1. Tensiones en el acero bainítico con cobertura del 100%. ....	62
Tabla A2. Tensiones en el acero bainítico con cobertura del 500%. ....	63
Tabla A3. Tensiones en el acero Hadfield con cobertura del 100%.....	64
Tabla A4. Tensiones en el acero Hadfield con cobertura del 500%.....	64
Tabla A5. Valores del parámetro FWHM del acero bainítico con cobertura del 100%. ....	65
Tabla A6. Valores del parámetro FWHM del acero bainítico con cobertura del 500%. ....	66
Tabla A7. Valores del parámetro FWHM del acero Hadfield con cobertura del 100%.....	67
Tabla A8. Valores del parámetro FWHM del acero Hadfield con cobertura del 500%.....	67
Tabla A9. Contenido de austenita retenida en el acero bainítico con cobertura del 100% y 500% .....	68





## **1. Introducción**

En este Trabajo Fin de Máster se han aplicado tratamientos superficiales de shot peening sobre dos aceros diferentes: un acero bainítico libre de carburos y un acero austenítico Hadfield con el propósito de endurecer su región superficial y valorar su influencia en el comportamiento ante acciones de desgaste.

### **1.1 Marco y Objetivos del trabajo**

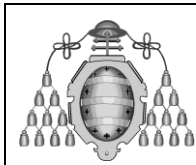
Este Trabajo Fin de Master se enmarca en el estudio de los aceros que se podrían utilizar en la fabricación de carriles de tren y en el uso de los tratamientos controlados de shot peening para su endurecimiento superficial.

En la actualidad, se están utilizando aceros austeníticos, conocidos como aceros Hadfield, para la fabricación de carriles de tren, más exactamente en los cruzamientos de vías, que son las zonas que están sometidas a las mayores cargas, por lo que se requiere un carril con una resistencia al desgaste mayor que en otros lugares. Hasta el momento, los aceros Hadfield que se utilizan en los cruzamientos de vía se endurecen por explosión en dos etapas.

Por lo tanto, el objetivo que se persigue con este trabajo es el de determinar si el tratamiento de shot peening es capaz de endurecer la región superficial de los aceros Hadfield de un modo similar a como hasta ahora se endurecen por explosión y, por otro lado, determinar la respuesta bajo los mismos condicionantes de los nuevos aceros bainíticos libre de carburos, más económicos, que pudieran utilizarse en sustitución de los aceros Hadfield en estas mismas aplicaciones, al menos, si se consiguen propiedades similares.

Este trabajo se ha dividido en los siguientes capítulos:

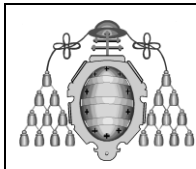
- 1) Introducción: en este apartado se plantean los objetivos que se persiguen con la realización de este trabajo, así como la estructuración del mismo.
- 2) Tratamientos de shot peening: este capítulo recoge la definición del shot peening, el proceso de aplicación, los parámetros que influyen en el tratamiento y los efectos que produce.



*Mejora de las propiedades superficiales  
de los aceros bainíticos libres de  
cementita y aceros austeníticos mediante  
tratamientos de shot peening*

## Introducción

- 3) Procedimiento experimental: a lo largo de este apartado se explica el proceso que se ha seguido para llevar a cabo los ensayos necesarios para la realización de este trabajo.
- 4) Resultados y discusión: este capítulo recoge tanto los resultados obtenidos en los ensayos descritos en el capítulo anterior, como la justificación de los mismos.
- 5) Conclusiones: en este apartado se enumeran los resultados más relevantes extraídos de todo el trabajo.
- 6) Presupuesto: se recoge un listado con los costes derivados de la realización del trabajo completo desarrollado.
- 7) Bibliografía: en este capítulo se recogen todas las referencias bibliográficas que han sido consultadas para la realización de este trabajo.
- 8) Anexo: en este apartado recoge una serie de tablas con resultados más detallados, no incluidas en el apartado de resultados.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

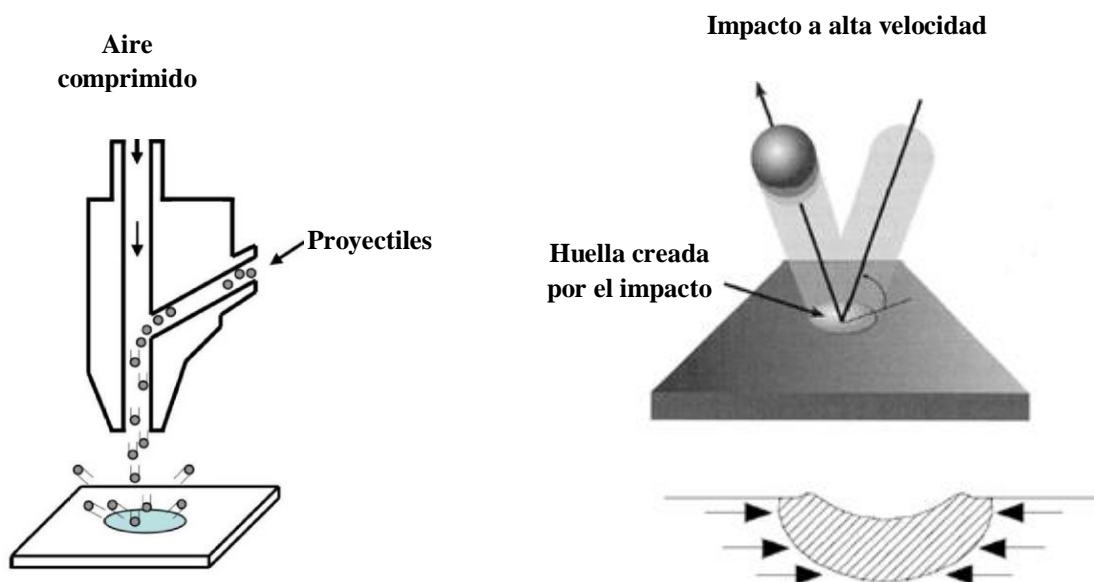
## Shot Peening

## 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 la fatiga de los componentes sometidos a fuertes cargas.

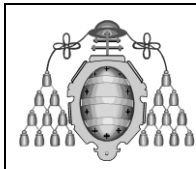
### 2.1 Proceso de Shot Peening

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.

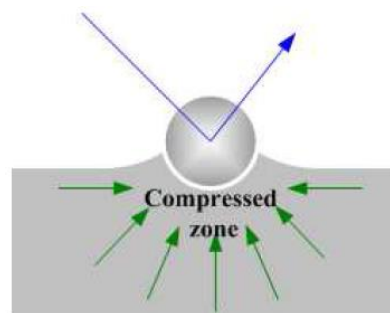
Cada impacto provocado por los proyectiles genera una deformación plástica en una zona muy localizada, que al encontrarse rodeada por material que solo se deforma elásticamente, queda sometida a fuertes tensiones residuales de compresión, como se puede observar en la Figura 1.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

## Shot Peening

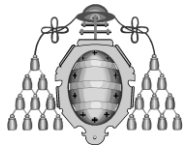
Bajo la superficie de la zona impactada, el material comprimido como resultado del impacto intenta volver a su estado inicial, como se ve en el esquema de la Figura 2. Esta recuperación se ve impedida por las capas internas que no se han deformado plásticamente, lo que genera un campo de tensiones residuales 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 auto-equilibradas).



**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 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.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

## Shot Peening

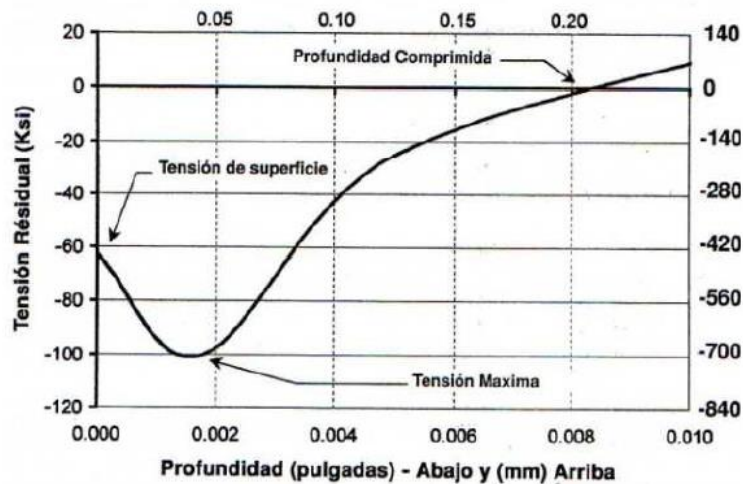


Figura 3. Representación del perfil de tensiones residuales tras un tratamiento SP.

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 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.

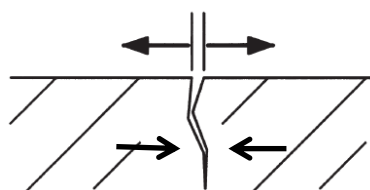
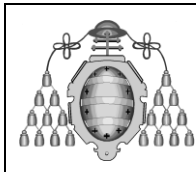


Figura 4. Efecto de las tensiones de compresión introducidas con el tratamiento de shot peening.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**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.

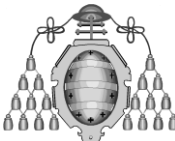
La eficacia del tratamiento radicará entonces en la correcta elección de cada uno de los tres parámetros anteriormente mencionados y que serán desarrollados más ampliamente a continuación.

### *2.2.1 El tipo 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 proyección los proyectiles deteriorados.

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Shot Peening</b></p>
---	--	----------------------------



**Figura 5. proyectiles de acero esféricos.**

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

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.



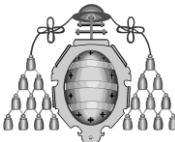
**Figura 6. Proyectiles de acero de alambre cortado (cut wire).**

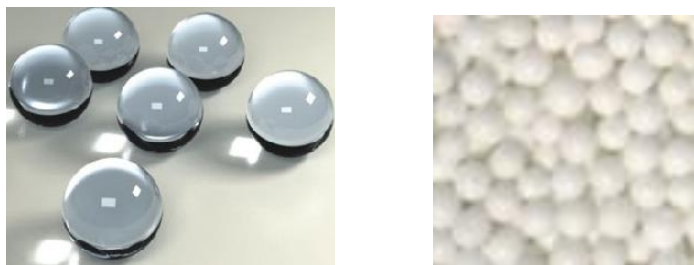
- **Microesferas de vidrio/ Microesferas cerámicas**

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.

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Shot Peening</b></p>
---	--	----------------------------



**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 o 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.

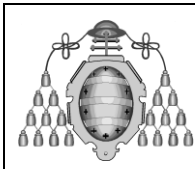


**Figura 9. Formas de proyectiles no aceptados por normativa.**

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





*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

## Shot Peening

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

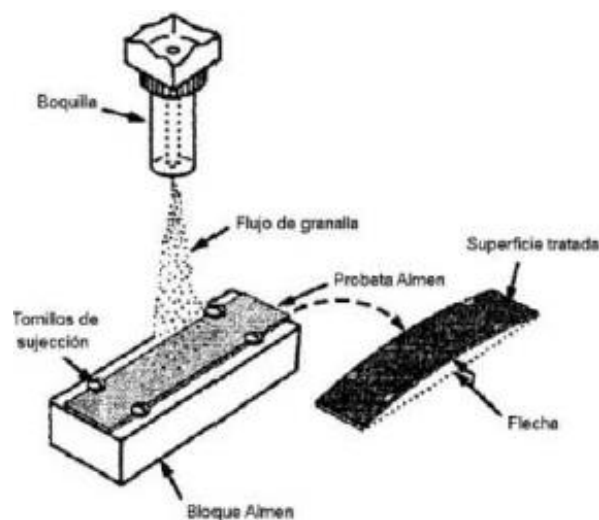
En cuanto a la dureza de los proyectiles, ésta debe ser superior a la del material que va a recibir el tratamiento con dichos proyectiles.

Normalmente, en el caso de las piezas de acero y de otras aleaciones no férricas, 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.

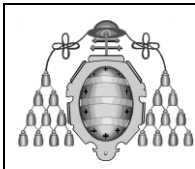
### 2.2.2 Intensidad Almen

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 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



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

## Shot Peening

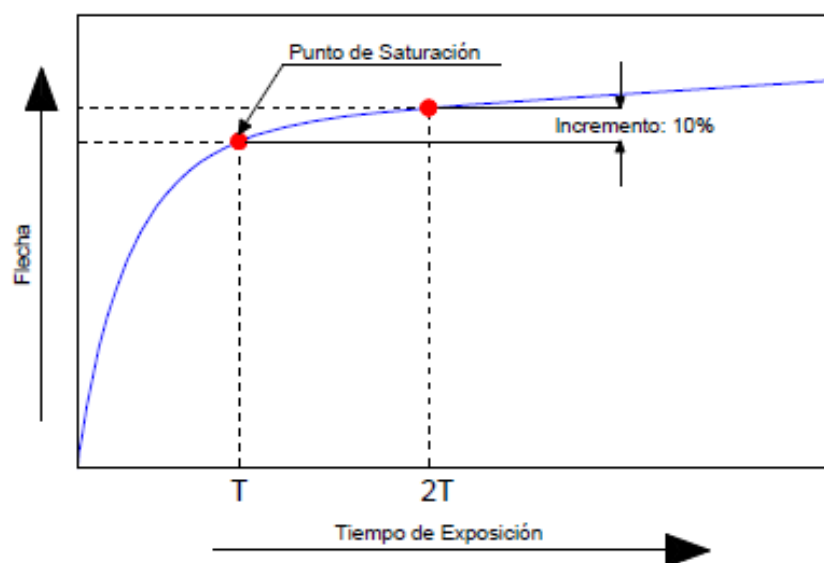
se curve. Esta curvatura, que no se apreciará hasta que no se suelta la placa Almen del bloque, es debida a las tensiones residuales generadas a consecuencia de los impactos de los proyectiles sobre la placa Almen, haciendo que la placa adopte una curvatura convexa.

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 diferentes que quedan recogidos en la Tabla 1. Tipos de placas Almen., junto con sus características diferenciadoras.

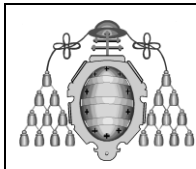
**Tabla 1. Tipos de placas Almen.**

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.



**Figura 11. Representación de la Curva de Saturación.**



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Shot Peening**

Sobre esta curva, se obtiene el “punto de saturación”, que define la intensidad del tratamiento y se calcula como el primer punto de la curva tal que al duplicar el tiempo de exposición, la flecha de la placa Almen aumenta un 10%. La abscisa de dicho punto es el tiempo de saturación, mientras que la ordenada es la intensidad Almen del tratamiento de shot peening.

Una vez obtenido el valor de la intensidad Almen, en la designación estándar de la intensidad de un tratamiento de shot peening, es necesario especificar el tipo de placa Almen que se ha utilizado, así como la unidad utilizada para la medida de las flechas generadas (normalmente mm o micropulgadas).

### *2.2.3 Grado de cobertura*

El grado de cobertura de una superficie tratada mediante shot peening no es más que la relación entre la superficie inicial y la superficie cubierta por las huellas del shot peening.

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.

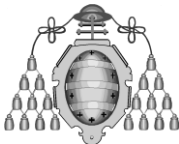
En cuanto a los pasos a seguir para poder determinar el grado de cobertura de una muestra, éstos se recogen en el capítulo dedicado a la descripción del “procedimiento experimental”.

## **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

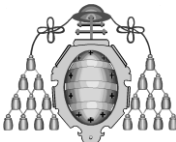
	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Shot Peening</b></p>
---	--	----------------------------

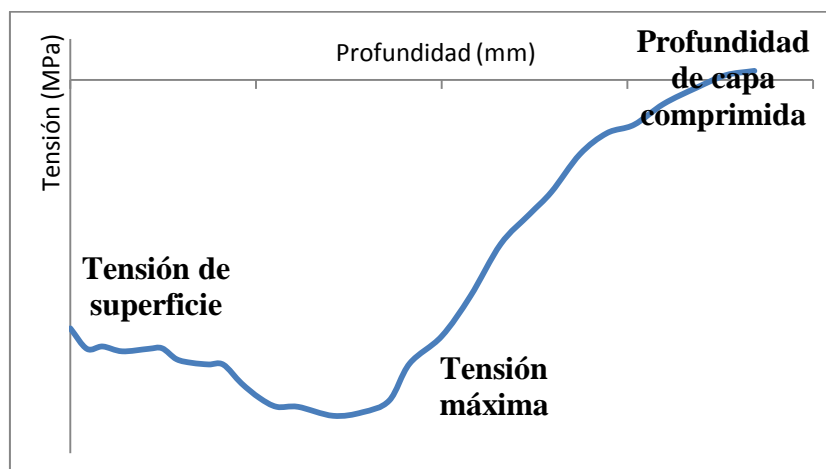
shot peening, obteniendo así un perfil de tensiones residuales. Este perfil de tensiones tiene tres parámetros característicos que se definen a continuación y que aparecen representados en la Figura 13.



**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.

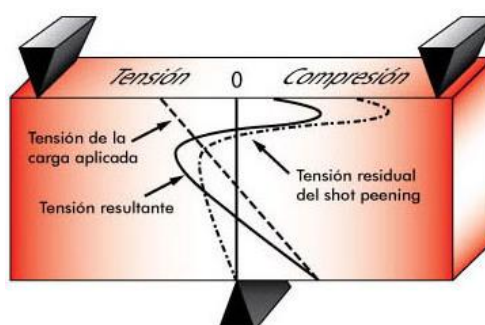
	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Shot Peening</b></p>
---	--	----------------------------



**Figura 13. Perfil de tensiones residuales.**

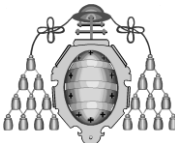
La dureza del material influye tanto en las tensiones máximas de compresión generadas como en la profundidad que alcanzan las mismas.

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.



**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

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Shot Peening</b></p>
---	--	----------------------------

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.

La rugosidad de una 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.

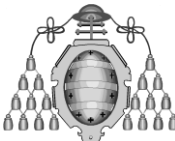


**Figura 15. Diferenciación entre ondulación y rugosidad.**

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.

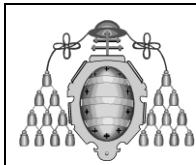
### 2.3.3 Dureza superficial

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

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Shot Peening</b></p>
---	--	----------------------------

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.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Procedimiento Experimental**

## **3. Procedimiento experimental**

### **3.1 Tratamientos de shot peening**

El procedimiento experimental dio comienzo con el corte del material aportado por Fundación ITMA, obteniendo de este modo las probetas sobre las que se realizaron todos los tratamientos y ensayos posteriores.

Para realizar el corte se utilizó una cortadora manual que consta de una zona de sujeción de material, un disco encargado de realizar el corte, un sistema de refrigeración y una palanca que permite la subida o bajada del disco de corte.

Una vez obtenidas las probetas de los dos materiales a ensayar, lo primero que se hizo fue marcar dichas probetas, utilizando un código de identificación. El código elegido consta de una letra seguida de un número, la letra será una “H” cuando se trate de una probeta de acero Hadfield; y una “B” cuando se trate de una probeta de acero bainítico. A continuación se indica un número que permite saber el tipo de tratamiento o ensayo que ha recibido la probeta.

También se incluyó en las probetas el porcentaje de cobertura aplicado en el shot peening.

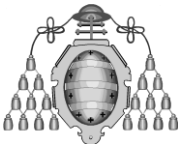
Una vez identificadas todas las probetas, se comenzó con el tratamiento de shot peening. El equipo utilizado fue el que se muestra en la Figura 16.



**Figura 16. Equipo de tratamiento de shot peening.**

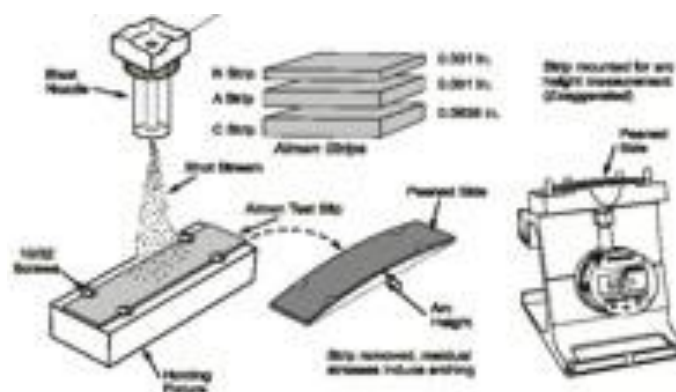
Antes de comenzar a tratar las probetas de los dos aceros fue necesario determinar algunos parámetros, como fue la intensidad Almen que se alcanzaba con las bolas utilizadas o el caudal que permitía trabajar de manera fluida con la máquina.



	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Procedimiento Experimental</b></p>
---	--	--

Para medir la intensidad Almen, lo primero que se hizo fue introducir en la máquina de shot peening las bolas CW 0.9 (proyectiles de alambre cortado de 0.9 mm de diámetro); a continuación se ajustó el caudal a 2,5 vueltas y finalmente se ajustó la presión al máximo permitido por la máquina, en este caso 4 bares.

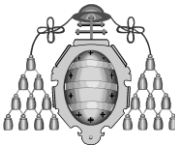
Una vez preparada la máquina, se procedió a medir la curvatura que presentaba inicialmente las placas utilizadas, tipo Almen A, y a continuación se les aplicó el tratamiento de shot peening. Posteriormente se volvió a medir la curvatura final de las placas para poder determinar, por diferencia, la curvatura producida (véase la Figura 17). Este ensayo se repitió varias veces utilizando tiempos distintos para definir la intensidad Almen del tratamiento aplicado. La intensidad Almen de este tratamiento fue 21A.

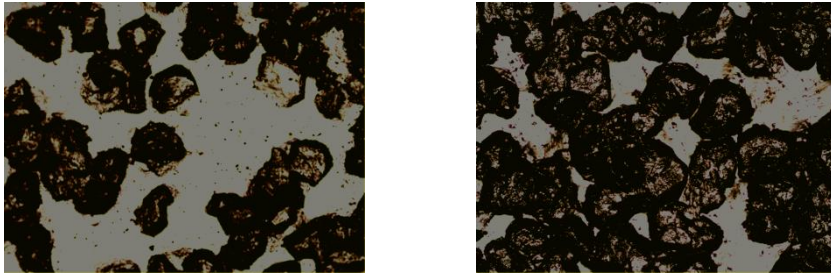


**Figura 17. Esquema del procedimiento llevado a cabo con las placas Almen.**

Una vez determinada la intensidad Almen alcanzada en las condiciones anteriormente mencionadas se pasó a aplicar el shot peening a las probetas del acero bainítico y austenítico. En primer lugar se fijó el tiempo al que se debe someter la probeta para obtener una cobertura del 100%.

Para determinar dicho tiempo, lo que se hizo fue disparar sobre una probeta de cada tipo de acero durante un tiempo muy corto, en este caso fueron 3 segundos, y observar al microscopio el grado de cobertura que se había alcanzado en ese tiempo. La Figura 18 muestra la observación microscópica realizada sobre los dos aceros.

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p>Procedimiento Experimental</p>
---	--	-----------------------------------



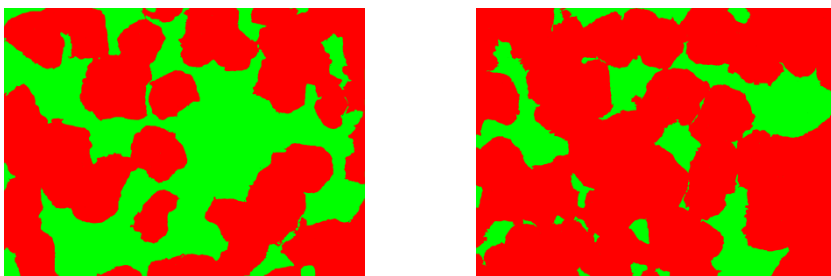
**Figura 18.** Vista en el microscopio del acero bainítico y Hadfield tras 3 s de shot peening.

Una vez tomadas varias fotografías en distintas zonas de la probeta, se recurrió a un software que permite pintar las zonas afectadas por el impacto de negro, y las no afectadas de blanco, como se observa en la Figura 19.

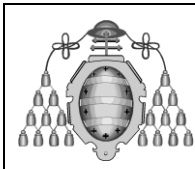


**Figura 19.** Vista de las fotografías recogidas en la “Figura 18” una vez modificadas en el Paint.

A continuación se introdujeron estas fotografías en el programa del microscopio y se aplicó la rutina del procesador de imágenes, de tal modo que directamente calcula el grado de cobertura alcanzado (imagen modificada, Figura 20).



**Figura 20.** “Figura 19” después de aplicarle la rutina en el procesador de imágenes.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Procedimiento Experimental**

Conocido el grado de cobertura logrado al cabo de 3 segundos, utilizando una hoja de cálculo que aplica la ecuación de Avrami, se pudo determinar el tiempo necesario para obtener el 98% de cobertura, que por convenio se considera la cobertura total (100%), ya que la expresión de Avrami (ecuación 1), que se muestra a continuación es exponencial.

$$C = 100 \cdot (1 - e^{-ARt}) \quad (\text{ec. 1})$$

Siendo C la cobertura alcanzada, A el área de cada huella creada, R el ratio de flujo y t el tiempo de exposición.

Si el tiempo de exposición, t, obtenido se multiplica por cinco, proporciona el tiempo necesario para obtener una cobertura del 500%.

Una vez determinado el tiempo necesario para la realización de los tratamientos, se procedió a aplicar shot peening al resto de las probetas. Se trataron tres probetas de cada acero al 100% de cobertura y otras tres al 500%.

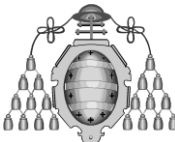
A continuación, se midió la rugosidad de las probetas, lo que se hizo con la ayuda de un rugosímetro.

## **3.2 Determinación del perfil de la tensión residual**

La tensión residual generada en el tratamiento de shot peening se determinó con un equipo de difracción de rayos X.

En primer lugar se calibró adecuadamente el equipo de difracción, utilizando para ello un patrón de ferrita para el acero bainítico y, en el caso del acero Hadfield, un patrón de austenita. Esto significa que se pone a medir el equipo sobre una muestra patrón que se sabe que es ferrita o austenita, respectivamente, con los parámetros correspondientes ajustados a cada tipo de muestra, utilizando tanto el arco como el colimador adecuados. En el arco de medida están situados los detectores, que se disponen en el ángulo de difracción adecuado.

Una vez calibrado el equipo e introducidas tanto las constantes elásticas que se utilizarán en el cálculo, en este caso un coeficiente de Poisson igual a 0,3 y un módulo elástico de 211 GPa, como la forma de llevar a cabo las medidas, es decir, la distancia del colimador (12 mm), el número de medidas que se pretende realizar y los parámetros

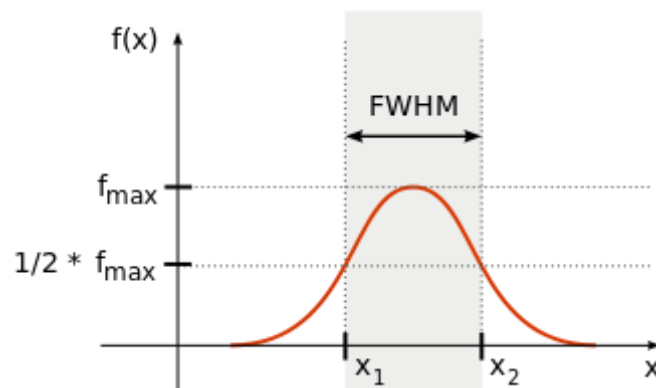
	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Procedimiento Experimental</b></p>
---	--	--

de difracción de los aceros bainítico y Hadfield que se recogen en la Tabla 2, se comenzaron las medidas.

**Tabla 2. Parámetros de difracción utilizados en la medida de las tensiones residuales de los aceros bainítico y Hadfield.**

Acero	$\lambda$ (nm)	Plano de difracción	Ángulo de difracción	Ángulo de giro ( $\psi$ )	Ángulo $\phi$
Bainítico	0,2291	(211)	156,4°	-45 y +45	-45 y +45
Hadfield	0,2291	(200)	128,8°	-45 y +45	-45, 0 y +45

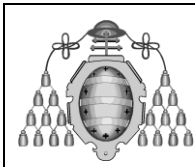
En este trabajo se han obtenido resultados tanto de la tensión residual como del parámetro FWHM. El parámetro FWHM (Full Width at Half Maximum) mide el ensanchamiento del pico de difracción de la muestra a la altura media de dicho pico, como se puede ver en la Figura 21, y está directamente relacionado con el endurecimiento introducido.



**Figura 21. Definición del parámetro FWHM sobre el pico de difracción**

Ya definidos todos los parámetros de medida, para comenzar con éstas, se procede en primer lugar a medir el espesor de la probeta con un micrómetro vertical y se marca la zona de medida.

A continuación, se coloca la probeta en el portamuestras del difractómetro y con la ayuda de un rayo láser que incluye el equipo, se sitúa la zona marcada donde se realizó la medida del espesor en la zona de incidencia de dicho rayo. Una vez colocada, se le indica al equipo el espesor de la probeta, se revisa que estén todos los parámetros bien introducidos y se comienza a medir.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Procedimiento Experimental**

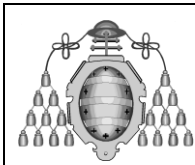
Para profundizar en el interior de la probeta con objeto de determinar el perfil de la tensión residual se llevó a cabo un proceso de electropulido. Para ello se colocó la probeta en una electropulidora, que contiene un electrolito, que consistió en una disolución de ácido acético y ácido perclórico en una relación 94:6, y se seleccionó el tiempo de electropulido. Cuanto mayor es el tiempo electropuliendo, mayor será la profundidad de material eliminado.

De cualquier manera, para determinar con la mayor precisión la profundidad eliminada se midió el espesor de la probeta como se hizo antes de colocarla en el difractor, y por diferencia de medidas se calculó la profundidad eliminada.

En el caso del acero bainítico, al inicio se comenzó eliminando alrededor de 15-18  $\mu\text{m}$  y se fue aumentando según se iba profundizando en el interior del material. Sin embargo, en el acero Hadfield se comenzó eliminando ya una mayor cantidad de material, alrededor de 30-40  $\mu\text{m}$  y, al igual que con el bainítico, se fue aumentando según se iba profundizando en la curva de la tensión.

Una vez obtenidos los perfiles de tensión, se procedió a cambiar los parámetros de medida del difractor así como el arco donde se colocan los detectores, el ángulo de dichos detectores y el colimador, para así pasar a medir la cantidad de austenita retenida.

En el caso de la medida de austenita retenida, el procedimiento consistió en recoger en primer lugar los picos de difracción de los planos (220) y (200) de la austenita, colocando el detector A a  $130^\circ$  y el detector B a  $80^\circ$  y, a continuación, se cambiaron los ángulos para recoger ahora los picos de los planos de difracción (211) y (200) de la ferrita, para lo que se procedió a colocar el detector A a  $156,4^\circ$  y el detector B a  $106,1^\circ$ . A partir de las áreas integradas de los picos recogidos, el software del difractor proporciona directamente el porcentaje de austenita retenida. Igual que en el caso anterior, se llevó a cabo el mismo proceso de electropulido ya explicado con objeto de obtener un perfil de la evolución del porcentaje de austenita con la profundidad en los dos aceros.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Procedimiento Experimental**

### **3.3 Determinación del perfil de dureza**

Tanto para la determinación del perfil de dureza como para el análisis microestructural, lo primero que se realizó fue la preparación metalográfica de las muestras.

La preparación metalográfica consta de una serie de pasos que son, primero el corte, a continuación, la embutición en resina de la probeta cortada y por último el desbaste y pulido con diferentes papeles abrasivos y paños con pasta de diamante, para finalmente, en el caso del análisis microscópico, realizar un ataque con Nital 2%.

Una vez preparada la superficie de la muestra, ésta se colocó sobre el portamuestras del durómetro y se fijó la carga requerida: en este caso se hicieron medidas con una carga de 300 g (HV0,3). Para la realización de los perfiles de dureza se hicieron las correspondientes huellas y se midió con un micrómetro la distancia entre la superficie de la muestra y cada una de ellas.

### **3.4 Análisis microestructural**

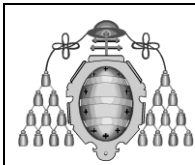
Una vez preparadas las muestras metalográficamente y tras el ataque anteriormente indicado, se analizaron en un microscopio óptico utilizando aumentos comprendidos entre 50x y 1000x y se realizaron las micrografías correspondientes.

### **3.5 Ensayos de desgaste**

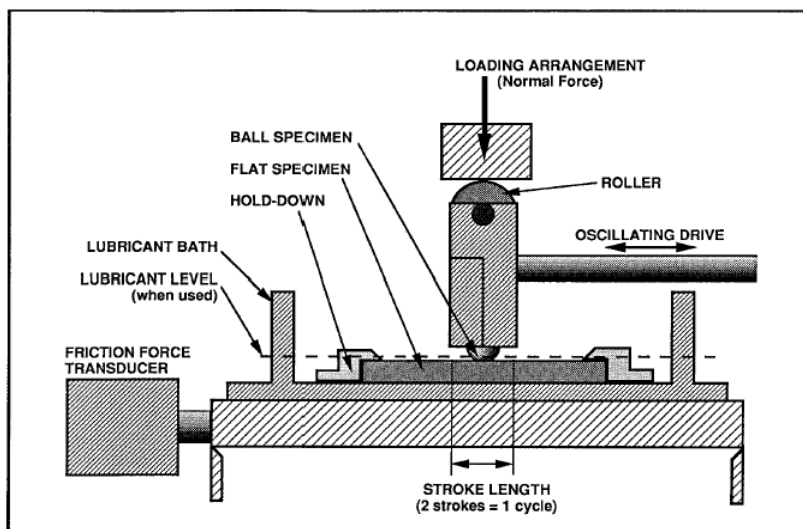
El ensayo de desgaste se ha realizado con un equipo de fricción de alta frecuencia tipo Plint modelo TE77, que se puede ver en la Figura 22.



**Figura 22.** Equipo de fricción de alta frecuencia utilizado en los ensayos de desgaste.



El par de ensayo consta de una probeta plana (material objeto de estudio) y una bola, denominada pin, de material cerámico, más concretamente alúmina, sobre el que se aplica una fuerza normal y que realiza un movimiento lineal y alternativo. Se puede observar un esquema del ensayo en la Figura 23. Cabe destacar que no se utilizó ningún tipo de lubricación en los ensayos.



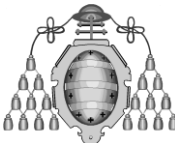
**Figura 23. Movimiento lineal alternativo en el ensayo de desgaste.**

Para la realización de los ensayos de desgaste se seleccionó una geometría de contacto puntual y se aplicó una carga normal de 200 N. El recorrido del movimiento fue de 7 mm y se utilizó una frecuencia de 20 Hz (1 ciclo = 2 recorridos).

A lo largo de todo el ensayo se aplicó un flujo de aire a presión sobre la zona de contacto con objeto de evitar el calentamiento de la muestra, ya que dicho calentamiento podría afectar al comportamiento del acero. Para registrar la temperatura que se alcanzaba durante el ensayo, se utilizó un termopar, que se soldó a la chapa sobre la que se apoyaba la probeta, asegurando así que la temperatura máxima alcanzada no superó en ningún momento los 35°C.

El ensayo se prolongó durante 4 horas, realizando paradas a cada hora para evaluar la evolución del desgaste mediante pérdida de peso, utilizando una balanza de precisión.

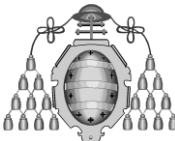
Hay que mencionar que antes de efectuar cada una de las pesadas se procedió a limpiar la probeta objeto de estudio. La limpieza se realizó con acetona en un baño de ultrasonidos durante aproximadamente 15 minutos. Una vez bien limpia la probeta, se

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Procedimiento Experimental</b></p>
---	--	--

introdujo en una estufa a 100°C durante unos minutos, para así, eliminar cualquier resto de humedad.

Los ensayos de desgaste se realizaron sobre tres probetas de cada acero, una sin shot peening y las otras dos con shot peening, una con cobertura del 100% y la otra con cobertura del 500%.



	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Resultados</b></p>
---	--	--------------------------

## 4. Resultados y discusión

En este apartado se recogen todos los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados. Además, se ha intentado justificar los mismos y comparar el comportamiento de los dos aceros analizados.

### 4.1 Aceros

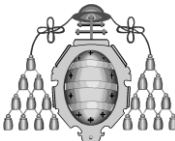
En la realización de este trabajo se han utilizado dos aceros diferentes: un acero bainítico y un acero Hadfield. Las propiedades mecánicas a tracción de los dos aceros analizados que nos han suministrado sus respectivos proveedores se muestran en la Tabla 3. Sus propiedades a tracción son muy diferentes: las propiedades resistentes son sensiblemente superiores en el acero bainítico, mientras que la ductilidad del acero Hadfield es muy superior a la del otro acero.

**Tabla 3. Propiedades a tracción de los aceros estudiados.**

Acero	Lim. Elástico, $\sigma_y$ (MPa)	Res. Tracción, $\sigma_R$ (MPa)	Alargamiento, A $L_0=50$ mm (%)
Bainítico	697	1407	15,5
Hadfield	380	900	40

Por razones de confidencialidad, ArcelorMittal no nos ha suministrado la composición química del acero bainítico. Solo se puede indicar que se trata de un acero con un contenido medio de carbono y ligeramente aleado. Además, el tratamiento aplicado a la hora de fabricar las chapas de este acero consistió en una austenización, seguida de un enfriamiento rápido y finalmente, se mantuvo a una temperatura por encima de  $M_s$ , para así transformar la austenita en bainita. La bainita de este acero está libre de carburos, ya que consiste en una mezcla de ferrita bainítica y austenita no transformada.

Por otro lado, el acero Hadfield es un acero con 1.2% de carbono y 13% de manganeso, que tras temple en agua desde una temperatura superior a los 1000°C muestra una microestructura 100% austenítica, igualmente libre de carburos.

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Resultados</b></p>
---	--	--------------------------

## 4.2 Tratamiento de shot peening

En la Tabla 4 se recogen los parámetros del tratamiento de shot peening utilizados para la ejecución de los tratamientos superficiales en los dos aceros analizados.

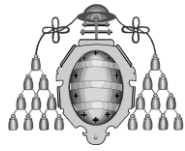
**Tabla 4. Parámetros utilizados en los tratamientos de shot peening.**

Acero	Cobertura	Presión (bar)	Caudal (vueltas)	Bolas	Tiempo (s)	IA
Bainítico	100%	4	2,5	CW0,9	13	21A
	500%	4	2,5	CW0,9	65	21A
Hadfield	100%	4	2,5	CW0,9	9	21A
	500%	4	2,5	CW0,9	45	21A

## 4.3 Medida de las tensiones residuales

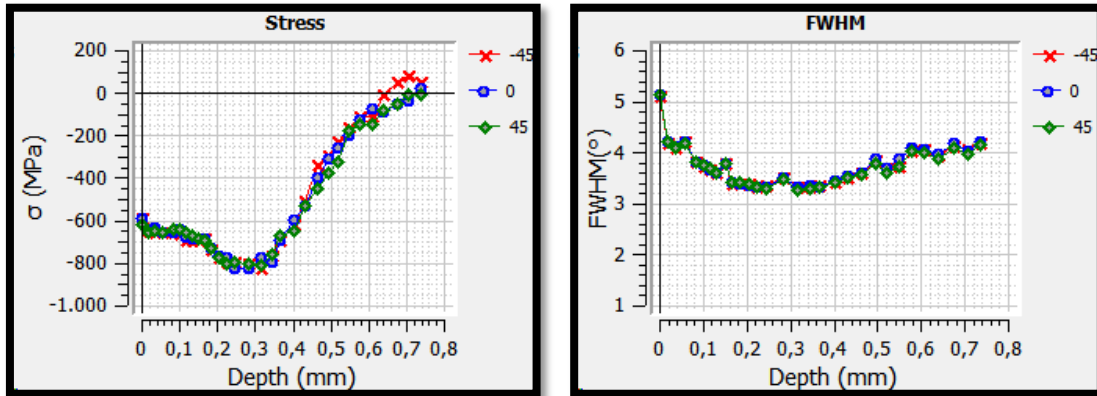
Se realizaron medidas de la tensión residual y del parámetro FWHM en los dos aceros, tanto con cobertura del 100%, como con cobertura del 500% con el equipo de Difracción de Rayos X y se obtuvieron los resultados que se recogen a lo largo de este punto. En las Figuras 24 y 25 se muestran tanto los valores de la tensión residual como del parámetro FWHM medidos en las tres direcciones (-45, 0 y 45°) en el caso del acero bainítico con coberturas del 100 y del 500% y en las Figuras 26 y 27 los mismos resultados en el caso del acero Hadfield.

Se puede observar que los resultados obtenidos en las tres direcciones de medida han sido prácticamente idénticos en el caso del acero bainítico, mientras que en el acero Hadfield se pone de manifiesto una cierta direccionalidad, que posiblemente se deba al diferente mecanismo de deformación plástica superficial que tiene lugar en este acero (maclaje). Por otro lado, mientras el factor FWHM aumenta continuamente al acercarnos a la superficie en el caso del acero Hadfield, en el acero bainítico se observa primero una ligera disminución seguida de un aumento en la región más superficial.

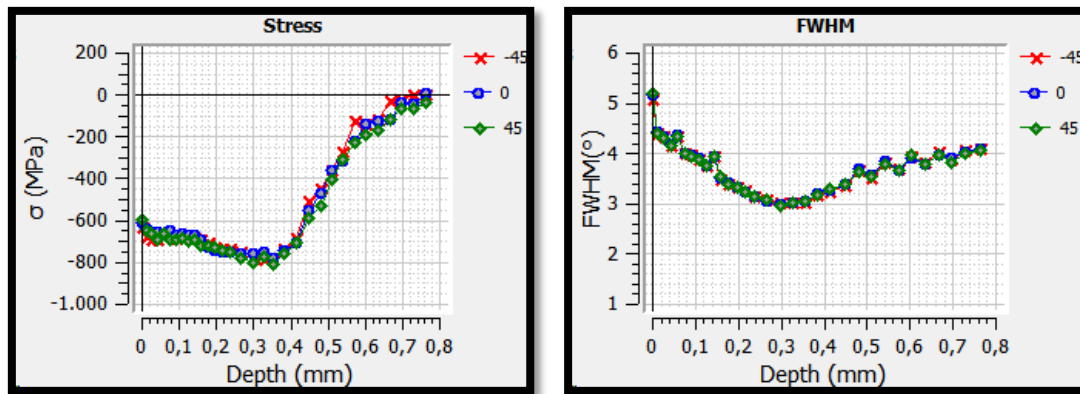


*Mejora de las propiedades superficiales  
de los aceros bainíticos libres de  
cementita y aceros austeníticos mediante  
tratamientos de shot peening*

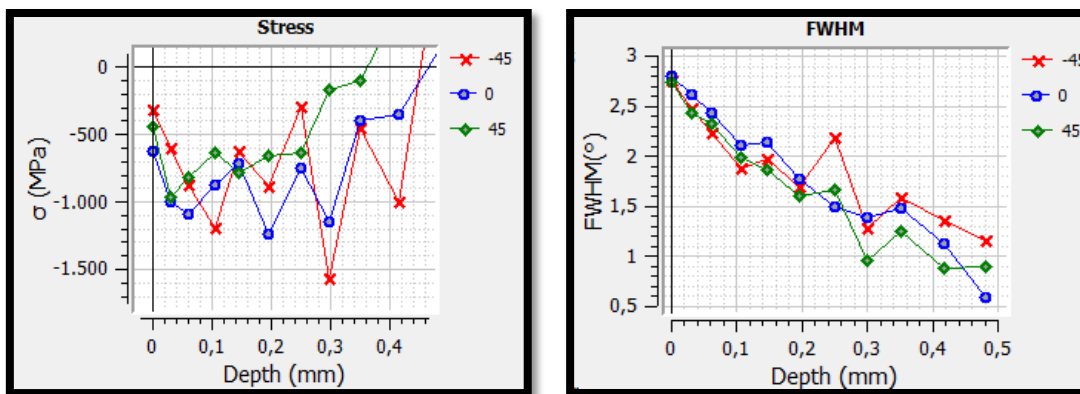
**Resultados**



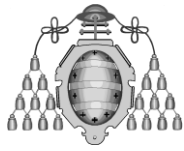
**Figura 24.** Perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM en las tres direcciones de medida. Acero bainítico con cobertura del 100%.



**Figura 25.** Perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM en las tres direcciones de medida. Acero bainítico con cobertura del 500%.



**Figura 26.** Perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM en las tres direcciones de medida. Acero Hadfield con cobertura del 100%.



*Mejora de las propiedades superficiales  
de los aceros bainíticos libres de  
cementita y aceros austeníticos mediante  
tratamientos de shot peening*

**Resultados**

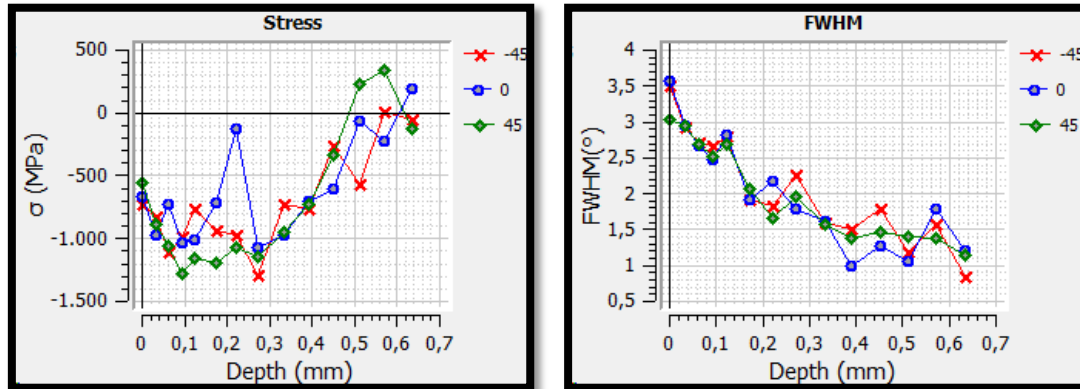


Figura 27. Perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM en las tres direcciones de medida. Acero Hadfield con cobertura del 500%.

A continuación, en las Figuras 28 y 29 se han representados los perfiles medios obtenidos en todos estos ensayos, que son los que utilizaremos para comparar los resultados.

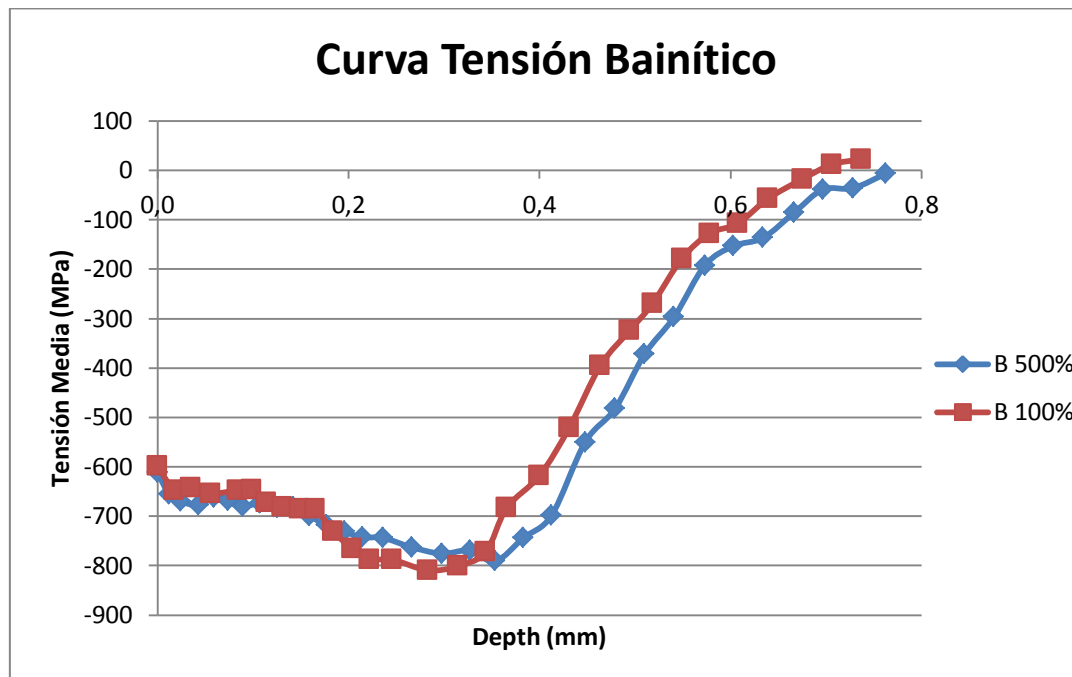
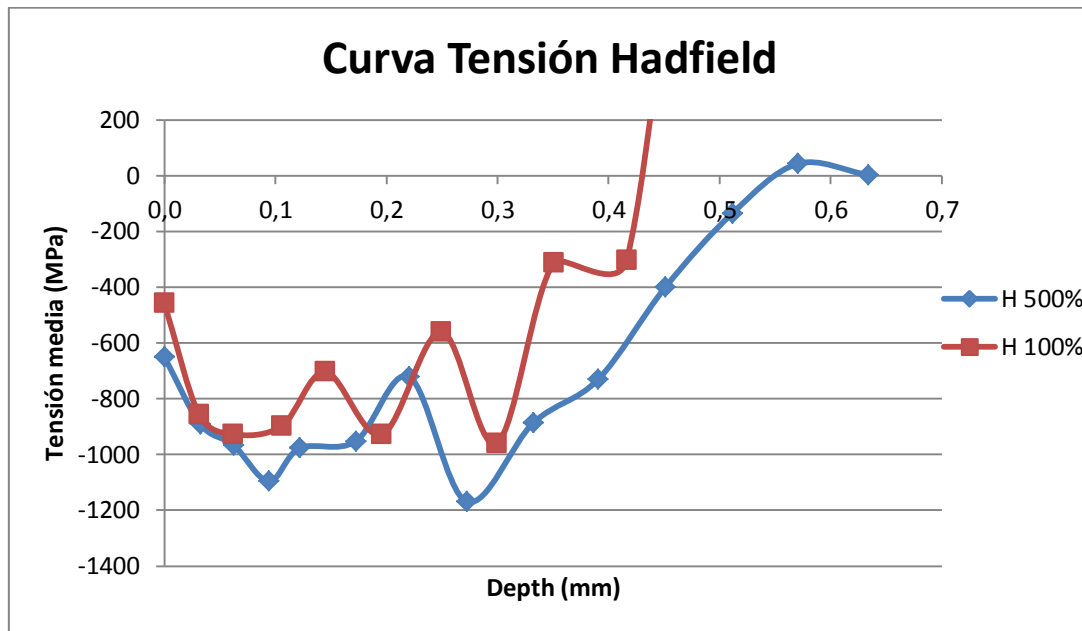
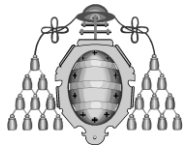


Figura 28. Perfil medio de la tensión residual superficial en el acero bainítico.

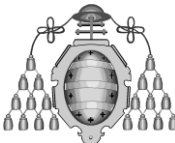


**Figura 29. Perfil medio de la tensión residual superficial en el acero Hadfield.**

En relación al acero bainítico, se pone de manifiesto que al aumentar el grado de cobertura prácticamente no se ve afectada la magnitud de la tensión de compresión generada pero, sin embargo, aumenta ligeramente la profundidad total afectada.

Por otro lado, en cuanto al acero Hadfield, cuanto mayor es la cobertura, mayores son tanto las tensiones de compresión inducidas por el shot peening como la profundidad afectada por el tratamiento.

Por otro lado, en la Tabla 5 se muestran los parámetros más característicos que definen los perfiles medios logrados: tensión residual superficial, tensión residual de compresión máxima, su relación con el límite elástico y con la resistencia a la tracción de ambos aceros, distancia a la que se ha medido esta tensión máxima y profundidad afectada por el shot peening o profundidad que ha quedado sometida a tensiones residuales de compresión.

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Resultados</b></p>
---	--	--------------------------

**Tabla 5. Parámetros característicos de los perfiles de tensión residual**

	$\sigma_c$ superficial (MPa)	$\sigma_c$ máxima (MPa)	$\sigma_c \text{ máx}/\sigma_y$	$\sigma_c \text{ máx}/\sigma_R$	Profundidad $\sigma$ máx. (mm)	Profundidad afectada (mm)
B (100%)	-599	-809	1,16	0,57	0,28	0,69
B (500%)	-611	-791	1,13	0,56	0,35	0,76
H (100%)	-458	-960	2,52	1,07	0,3	0,44
H (500%)	-650	-1169	3,08	1,30	0,27	0,54

Si se comparan ahora ambos aceros, se puede observar que a pesar de que el acero Hadfield tiene una menor resistencia mecánica que el acero bainítico, se han inducido tensiones residuales de compresión apreciablemente mayores en el acero Hadfield, aunque la profundidad afectada ha sido inferior en este caso. Estas diferencias hay que atribuir las al hecho de que el acero Hadfield tiene mucha mayor capacidad de endurecimiento por deformación. Es igualmente interesante destacar que mediante shot peening se han inducido en ambos aceros tensiones de compresión claramente superiores al límite elástico y, en el caso del acero Hadfield, incluso superiores a la resistencia a la tracción. Esto es posible porque el estado de deformación generado en el shot peening permite un grado de deformación y, en consecuencia, de endurecimiento mucho mayor que el de tracción uniaxial. De cualquier manera, las tensiones de compresión generadas en el acero Hadfield mediante shot peening son altísimas y este hecho se justifica por la elevada capacidad de endurecimiento por deformación en frío, que es una de las propiedades más sobresalientes de esta calidad.

Por otro lado en las Figuras 30 y 31 se han representado los perfiles del factor FWHM medio medidos en los dos aceros para los dos grados de cobertura.

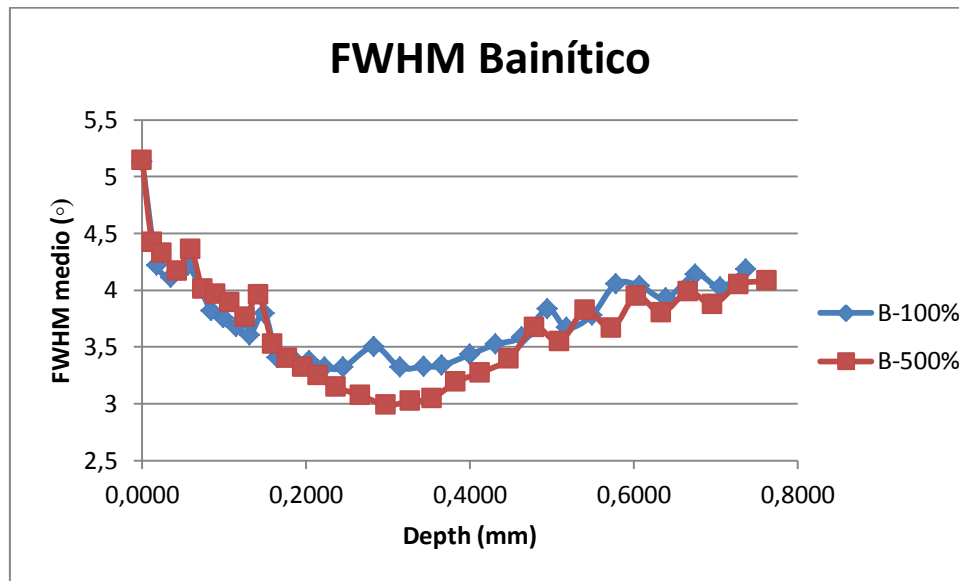
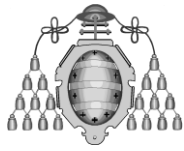


Figura 30. Representación del perfil del parámetro medio FWHM en las probetas del acero bainítico.

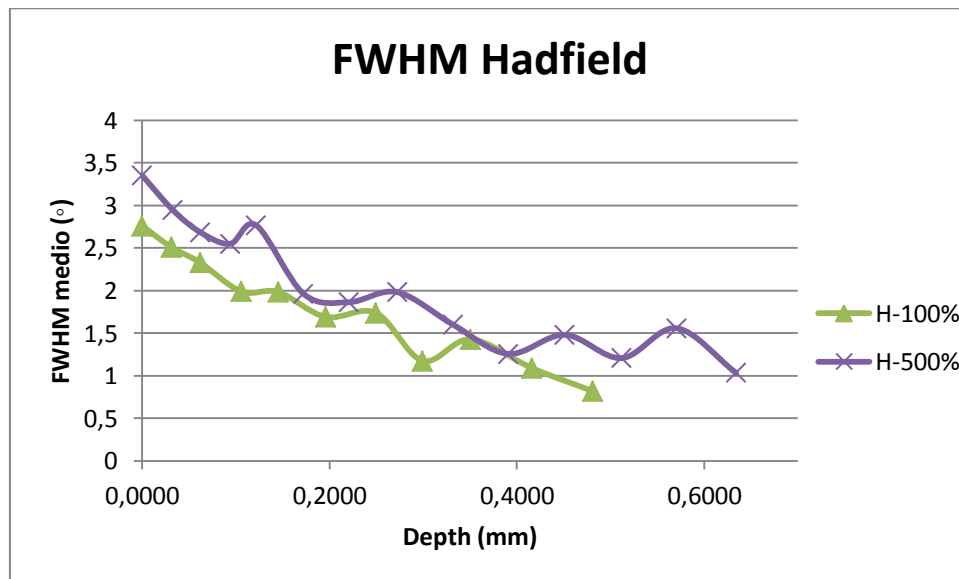
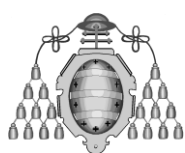


Figura 31. Representación del perfil del parámetro medio FWHM en las probetas del acero Hadfield.

Se destaca la evolución diferente del parámetro de endurecimiento en los tratamientos con distinto grado de cobertura de ambos aceros. El parámetro de endurecimiento medido justo en la superficie del acero bainítico tras el tratamiento con el mayor grado de cobertura (500%) es superior al medido para la cobertura del 100%, mientras que el resto del perfil es ya muy parecido en ambos casos, a excepción del valor mínimo que es más acusado en el tratamiento con el grado de cobertura mayor. Por otro lado, el



perfil completo del parámetro de endurecimiento alcanza valores mayores para la cobertura del 500% en el acero Hadfield.

## 4.4 Evolución de la austenita retenida

En la Figura 32 se muestra la evolución de la austenita retenida en la región afectada por el tratamiento de shot peening del acero bainítico, desde la superficie que recibió los impactos hasta una región situada ya a una profundidad tal que no se ha visto afectada por el tratamiento y que, por lo tanto, corresponde a la fracción de austenita inicialmente existente en este acero. La fracción de austenita retenida inicial del acero bainítico se situaba en torno al 16%. La Figura 32 muestra que el tratamiento de shot peening aplicado ha sido capaz de transformar una parte considerable de la austenita de este acero en martensita, siendo la transformación ligeramente mayor cuando se utilizó un mayor grado de cobertura.

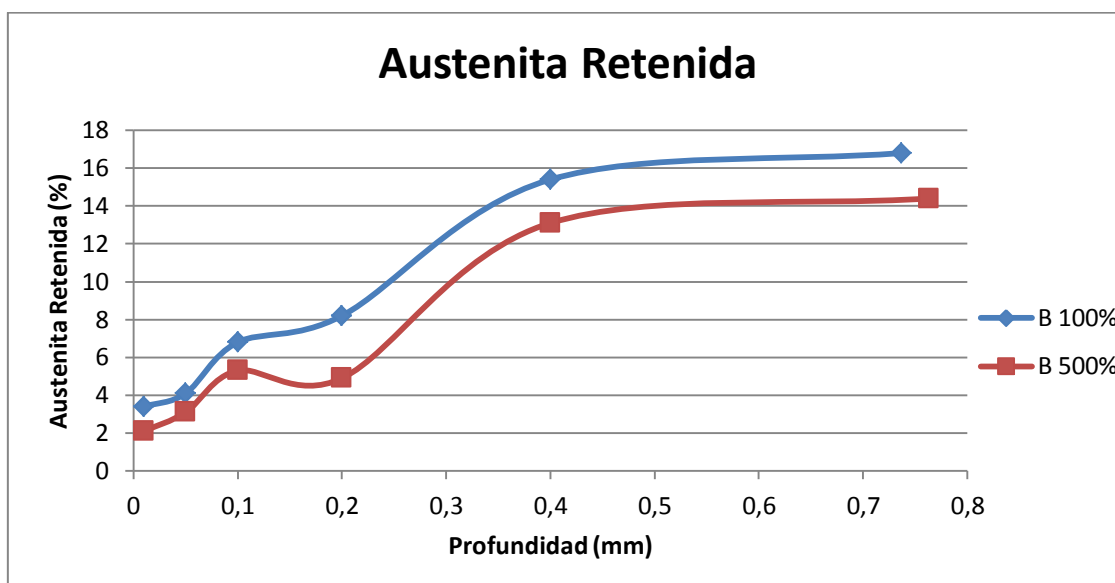
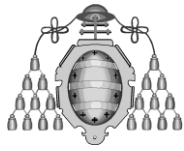


Figura 32. Evolución de la austenita retenida desde la superficie en el acero bainítico tras shot peening con coberturas del 100% y 500%.

Por otro lado, el tratamiento de shot peening no ha sido capaz de transformar la austenita del acero Hadfield: se han obtenido siempre valores del 100% de austenita independientemente de la profundidad de la medida (véase la Figura 33).





*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Resultados**

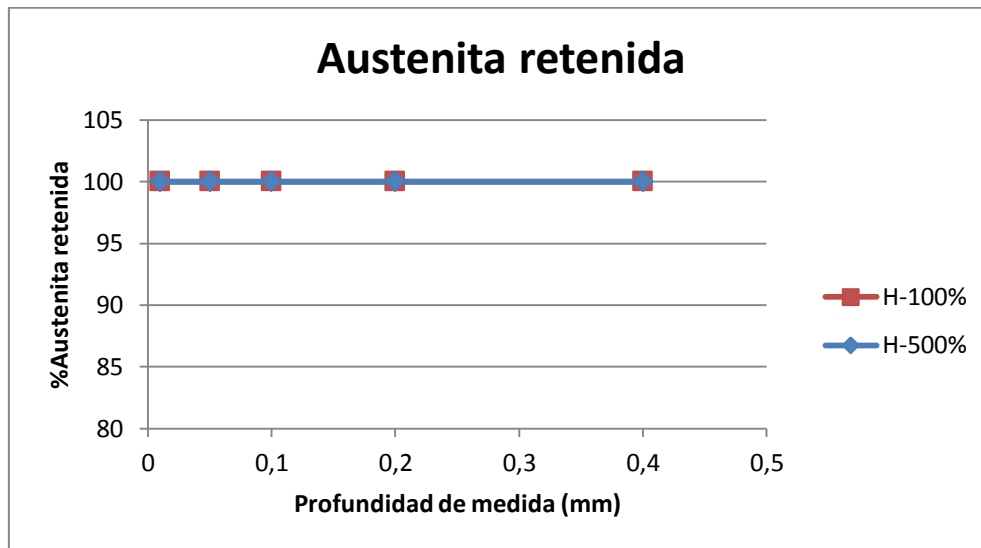


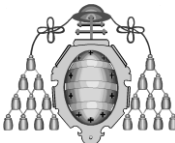
Figura 33. Evolución de la austenita con la profundidad en el acero Hadfield tras shot peening

## 4.5 Medida de la Rugosidad

Las Tablas 6 y 7 recogen los valores medios de la rugosidad (parámetros Ra y Rz) medidos en las chapas sin tratar y tras los tratamientos de shot peening (100 y 500%) aplicados a los dos aceros.

Tabla 6. Rugosidad del acero bainítico.

Acero Bainítico				
Cobertura	Ra		Rz	
	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )
0%	0,3	0,2	2,4	1,1
100%	7,6	0,8	43,7	4,6
500%	7,2	0,7	41,2	3,4

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Resultados</b></p>
---	--	--------------------------

**Tabla 7. Rugosidad del acero Hadfield.**

Acero Hadfield				
Cobertura	Ra		Rz	
	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )	Media ( $\mu\text{m}$ )	Desviación ( $\mu\text{m}$ )
0%	2,8	0,2	16,5	0,8
100%	11,3	1,0	61,2	4,9
500%	8,0	1,0	41,4	4,5

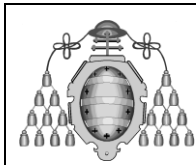
En el caso del acero bainítico, la chapa inicial tenía un acabado bastante bueno (baja rugosidad) y el tratamiento de shot peening bajo la intensidad de 21A ha incrementado significativamente la rugosidad del producto. Por otro lado, el aumento del tiempo del tratamiento de shot peening apenas ha modificado ya la rugosidad de la chapa, realmente ésta ha disminuido muy ligeramente.

Pasando ahora a realizar la valoración del acero Hadfield, igual que en el caso anterior, se puede observar el fuerte aumento de la rugosidad de la probeta con cobertura del 100% respecto a la probeta sin SP. Sin embargo, igual que ocurría en el acero bainítico, pero en este caso de un modo aún mucho más evidente, la rugosidad ha disminuido significativamente en la probeta con la cobertura del 500%.

Es igualmente digno de mención que a pesar de haber aplicado tratamientos de shot peening similares en ambos aceros, la rugosidad final obtenida ha sido muy superior en el acero Hadfield. La explicación de este hecho podría atribuirse al diferente mecanismo de deformación plástica inducido en ambos, ya que en el acero Hadfield cabe suponer que el mecanismo de maclaje juega un papel importante.

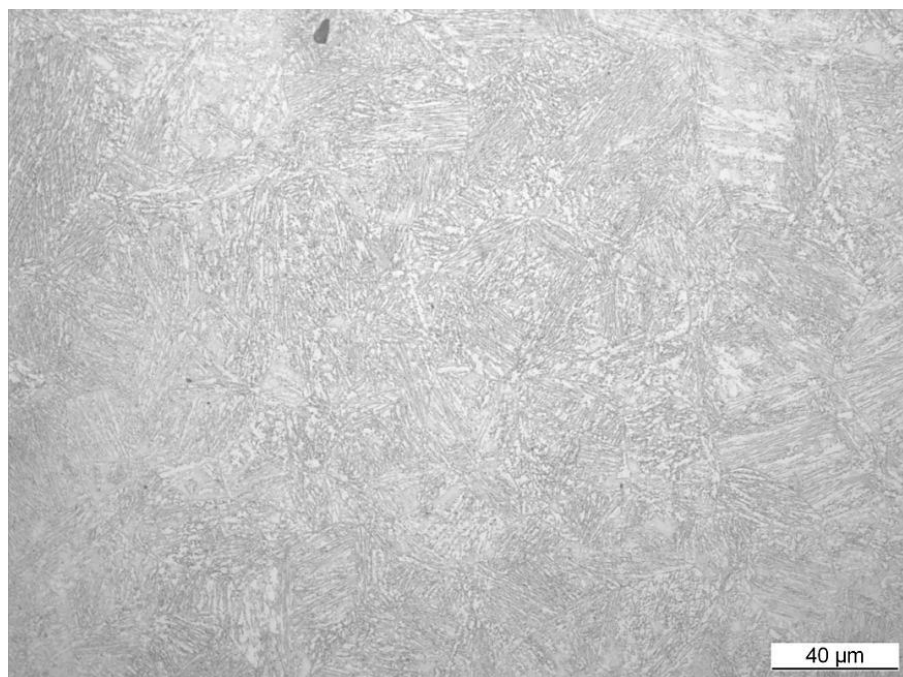
## **4.6 Análisis microestructural**

En las Figuras 34, 35 y 36 se observa la microestructura que presenta la superficie de las probetas del acero bainítico sin tratamiento de shot peening, con cobertura del 100% y con cobertura del 500%, respectivamente. En la Figura 34, probeta sin tratamiento superficial, se puede observar que la microestructura es 100% bainítica y sus dos fases constitutivas (ferrita y austenita) muestran formas aciculares muy finas. Además, se puede observar la presencia de algunas inclusiones.



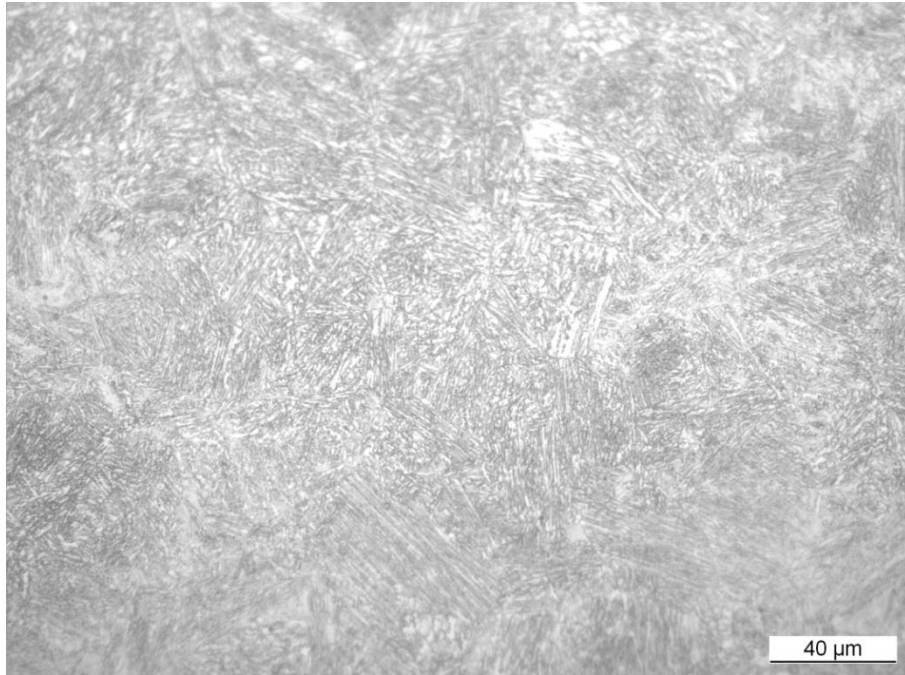
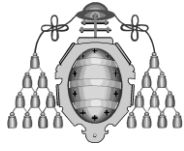
*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

Resultados

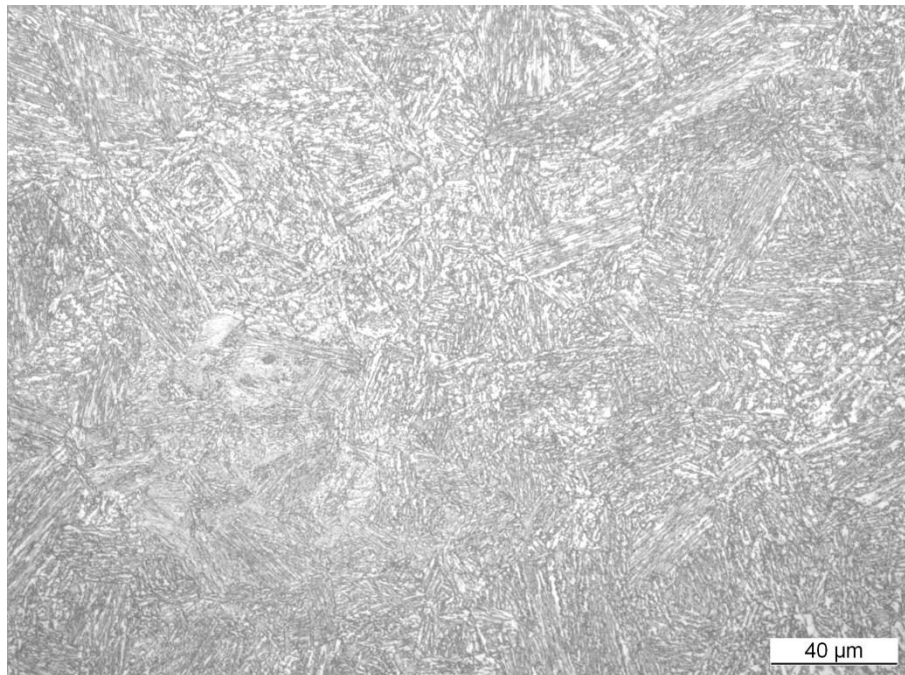


**Figura 34. Microestructura del acero bainítico sin tratamiento de shot peening.**

Por otro lado, las micrografías de la región superficial de las probetas de este mismo acero tratado mediante shot peening, Figuras 35 y 36, son muy similares a las de antes del tratamiento. Con las técnicas de análisis utilizadas no es posible detectar visualmente la transformación de la austenita en martensita, que se había observado mediante difracción de rayos X. Por otro lado, en este acero la deformación plástica superficial generada en el shot peening tampoco se ha podido visualizar mediante microscopía óptica convencional.

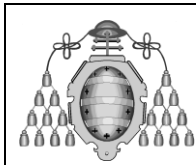


**Figura 35.** Microestructura del acero bainítico tras shot peening con cobertura del 100%.



**Figura 36.** Microestructura del acero bainítico tras shot peening con cobertura del 500%.

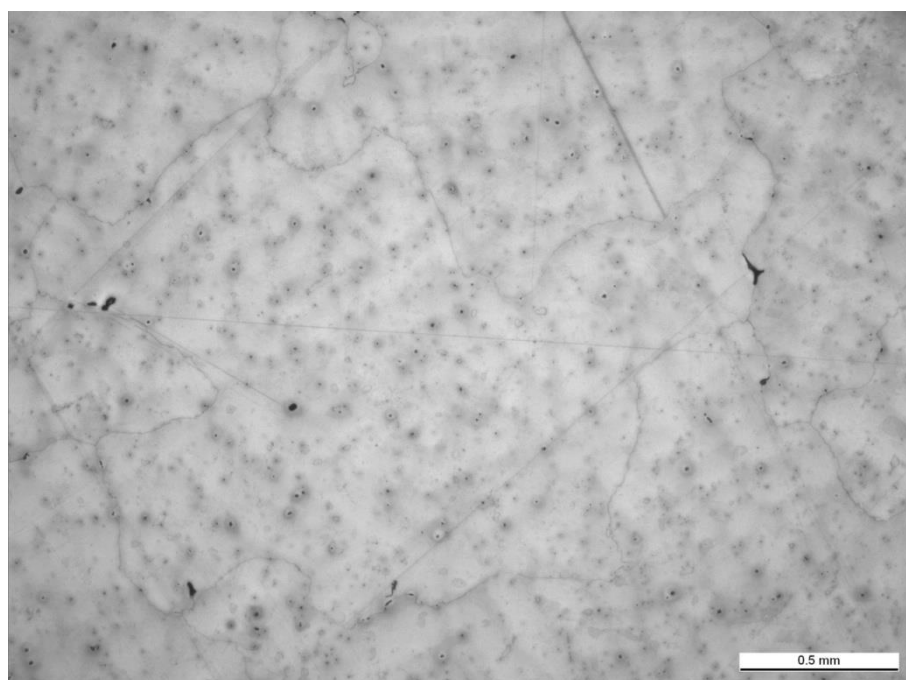
En las Figuras 37, 38 y 39, se puede observar la microestructura de la superficie del acero Hadfield con y sin tratamiento superficial. En la Figura 37 se ha presentado la microestructura de la probeta sin tratamiento superficial. Se trata de una microestructura completamente austenítica con un tamaño de grano muy grande. También se observa la



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

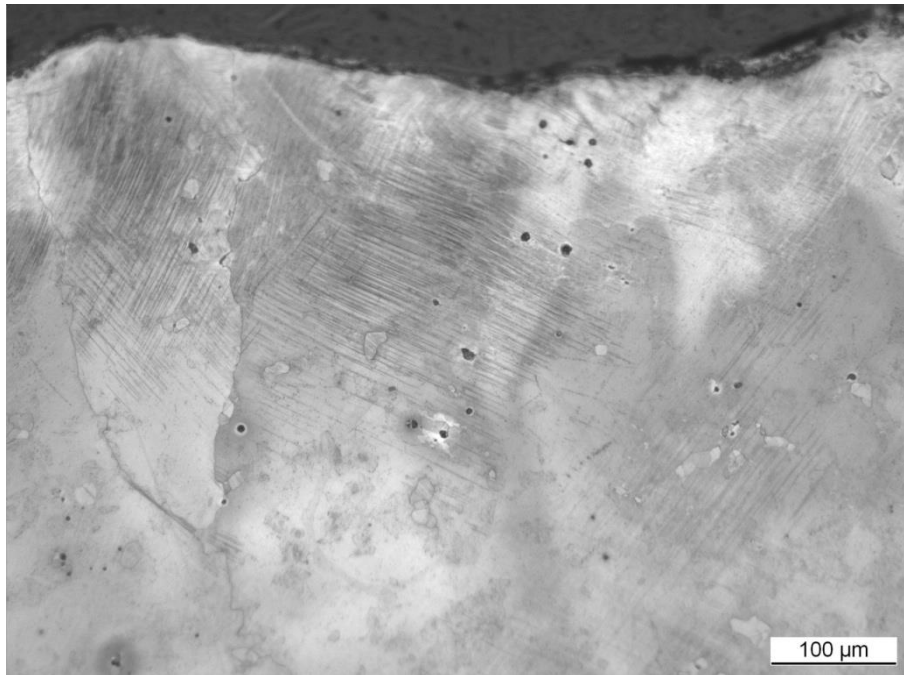
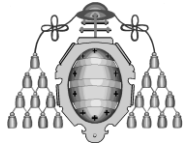
**Resultados**

presencia de pequeños rechupes e inclusiones uniformemente distribuidas (producto moldeado). Se hace notar aquí que un tamaño de grano muy grande, como el que tiene este acero Hadfield, dificulta las medidas mediante difracción de rayos X, por lo que ésta podría ser la causa tanto de la aparente anisotropía como de las fluctuaciones observadas en los perfiles de la tensión residual y del parámetro FWHM (apartado 4.3).

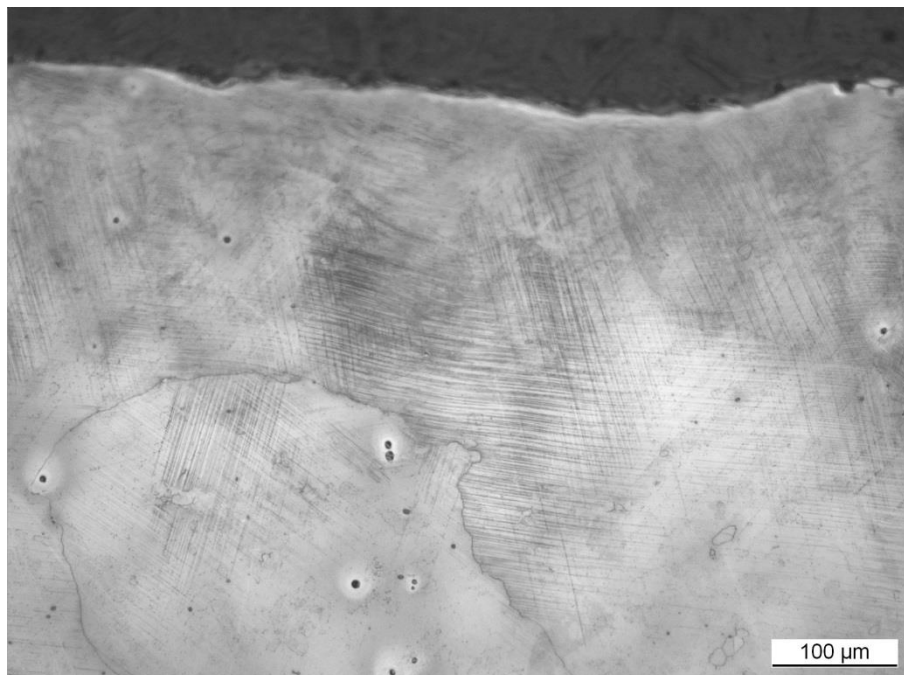


**Figura 37. Microestructura del acero Hadfield sin tratamiento de shot peening.**

Por otro lado, tras los tratamientos de shot peening (100% y 500%), Figuras 38 y 39, se observan marcas claras de la deformación plástica inducida, líneas de deformación y maclas.

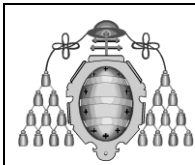


**Figura 38.** Microestructura del acero Hadfield tras shot peening con cobertura del 100%.



**Figura 39.** Microestructura del acero Hadfield tras shot peening con cobertura del 500%.

En la Figura 38 se aprecian claramente las líneas de deformación y las maclas generadas en la zona más superficial de la probeta tratada con el grado de cobertura del 100%, mientras que en la zona inferior prácticamente ya no se aprecia marca alguna. La profundidad afectada por la deformación inducida en el shot peening, según esta



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Resultados**

micrografía, se sitúa en torno a 300-400  $\mu\text{m}$ , que aproximadamente se corresponde con el tamaño de la región afectada por las tensiones residuales de compresión.

En el caso del acero Hadfield tras shot peening con cobertura del 500%, además de existir una mayor cantidad de líneas de deformación, la profundidad que alcanzan las citadas líneas es también es mayor.

En la Figura 39 también se aprecia con claridad que las líneas de deformación y los planos de macla cambian de dirección dependiendo del grano en el que se encuentren, lo que denota la distinta orientación cristalográfica de granos adyacentes.

## 4.7 Perfiles de Dureza

La Figura 40 muestra en un mismo gráfico los perfiles de dureza medidos en el acero bainítico desde la superficie tratada para los dos grados de cobertura aplicados. Como referencia se presenta también la dureza medida en la probeta sin tratar, que se sitúa en torno a 420 HV.

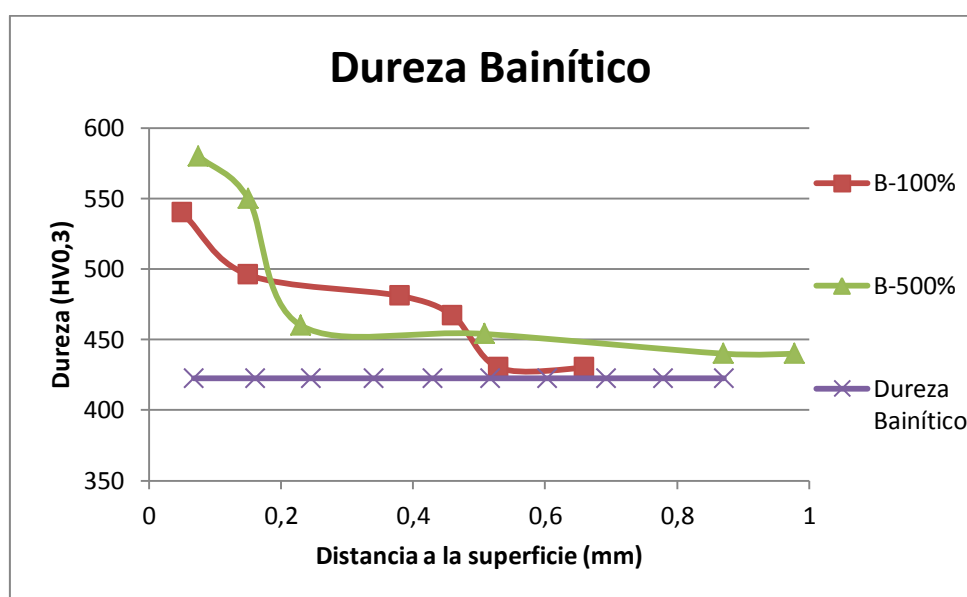
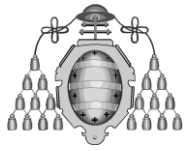
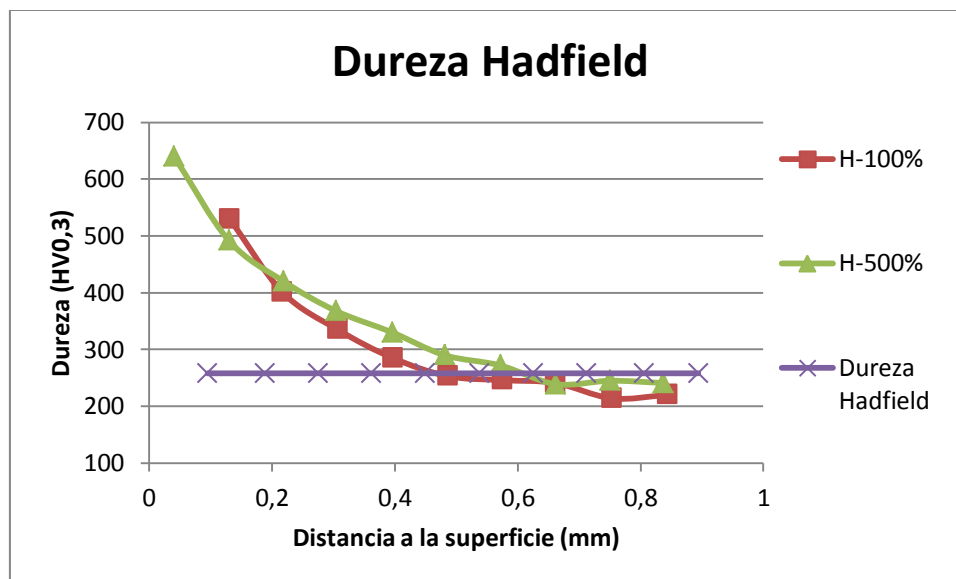


Figura 40. Evolución de la dureza del acero bainítico con la profundidad desde la superficie tratada



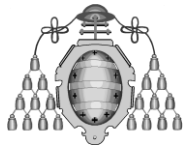
Esta figura muestra un claro endurecimiento superficial inducido como consecuencia de la aplicación del tratamiento de shot peening, motivado en parte por la transformación de la austenita en martensita. Se pone de manifiesto que se ha llegado a medir durezas individuales que se aproximan a 600 HV.

En el caso del acero Hadfield, Figura 41, se observa todavía mejor el fuerte endurecimiento inducido en la superficie sometida a shot peening, como consecuencia de que este acero es susceptible de endurecerse muy considerablemente mediante deformación en frío. Ahora, mientras la dureza original del acero se situaba en torno a 250 HV, se han llegado a medir valores individuales próximos a la superficie tratada por encima de 600 HV. Además, la región superficial afectada por el endurecimiento es algo mayor en el caso del tratamiento con el mayor grado de cobertura, coincidiendo además, aproximadamente, estas distancias con las de las regiones afectadas por la tensión residual de compresión y también con las de la región donde se había observado la presencia de abundantes líneas de deformación.



**Figura 41.** Evolución de la dureza del acero Hadfield con la profundidad desde la superficie tratada





## 4.8. Comportamiento al desgaste

Las Figuras 42, 43 y 44 muestran la pérdida de volumen medida en los ensayos de desgaste del acero bainítico en función de la longitud recorrida. Para llevar a cabo estas representaciones, la pérdida de peso se transformó en pérdida de volumen, teniendo en cuenta la densidad del acero ( $7.8 \text{ g/cm}^3$ ) y el tiempo de ensayo se transformó en longitud recorrida, teniendo en cuenta el recorrido por ciclo y la frecuencia de ensayo (7 mm y 20 Hz respectivamente).

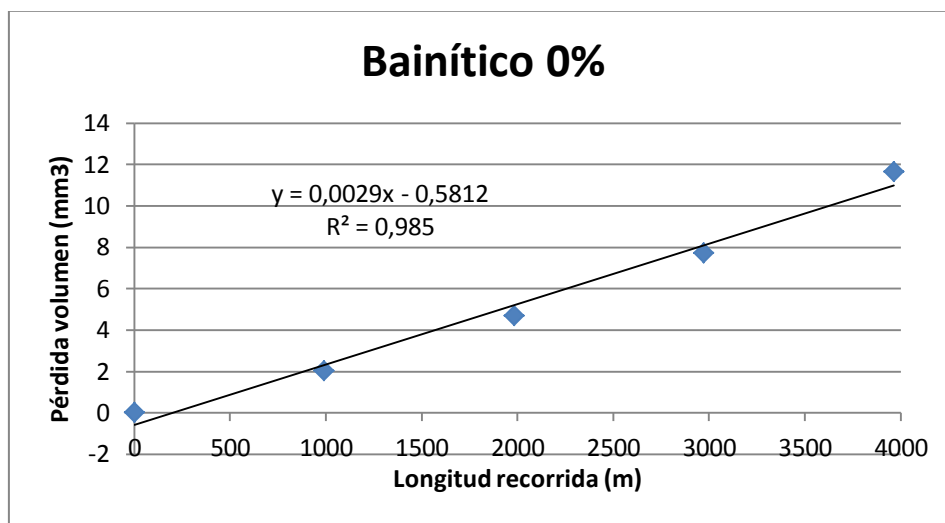


Figura 42. Representación de la pérdida de volumen frente a la longitud recorrida en el acero bainítico sin SP

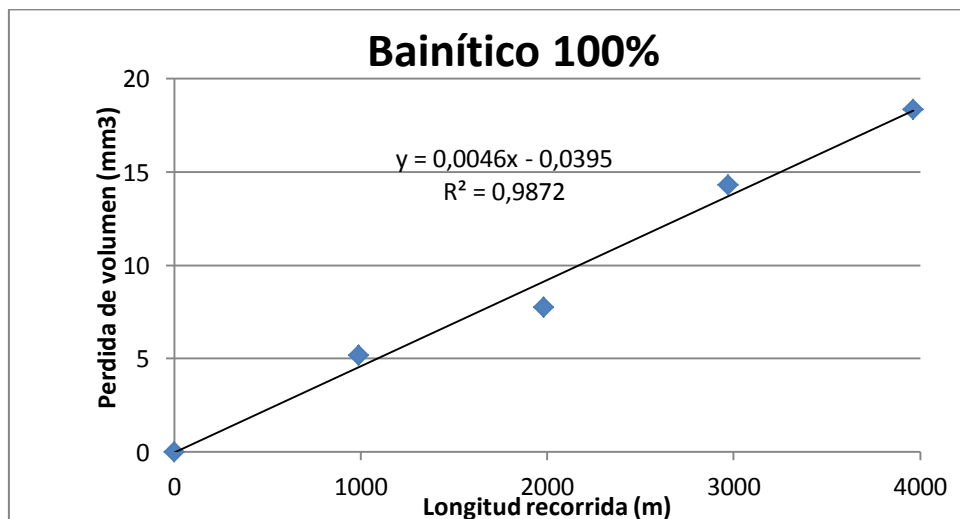
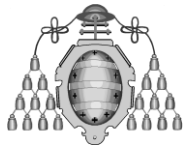
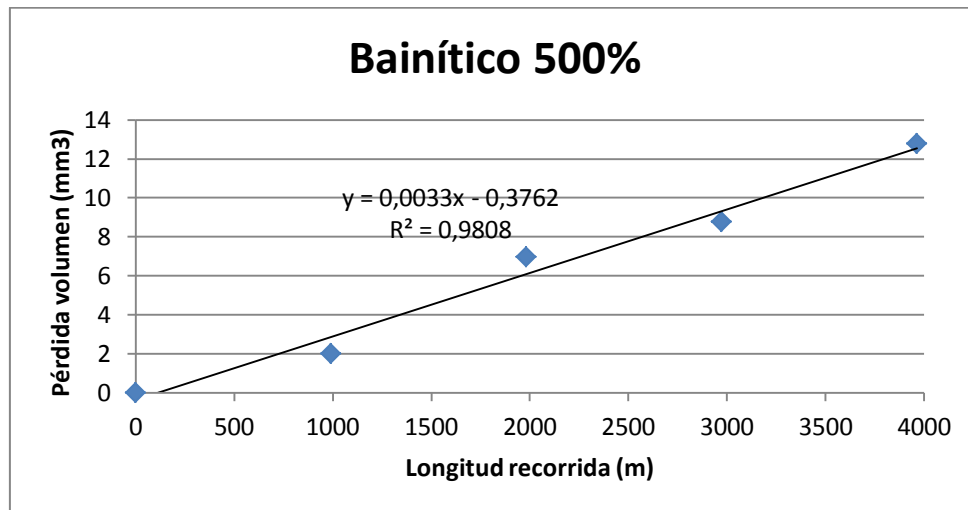


Figura 43. Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero bainítico con cobertura del 100%.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Resultados**



**Figura 44.** Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero bainítico con cobertura del 500%.

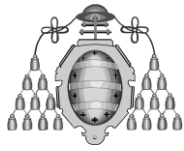
Se han obtenido así unos gráficos perfectamente lineales, que responden bien a la conocida ecuación de Archard:

$$\frac{V}{l} = K = k \cdot \left(\frac{P}{H}\right) \quad (ec. 2)$$

Siendo en esta ecuación V el volumen desgastado, l longitud recorrida, K constante de desgaste, P es la carga aplicada y H la dureza del material.

La pendiente de los gráficos es la constante de desgaste, K, que cuantifica el comportamiento frente al desgaste de estos productos.

Del mismo modo, en las Figuras 45, 46 y 47 se han representado los resultados de los ensayos de desgaste obtenidos utilizando el acero Hadfield.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Resultados**

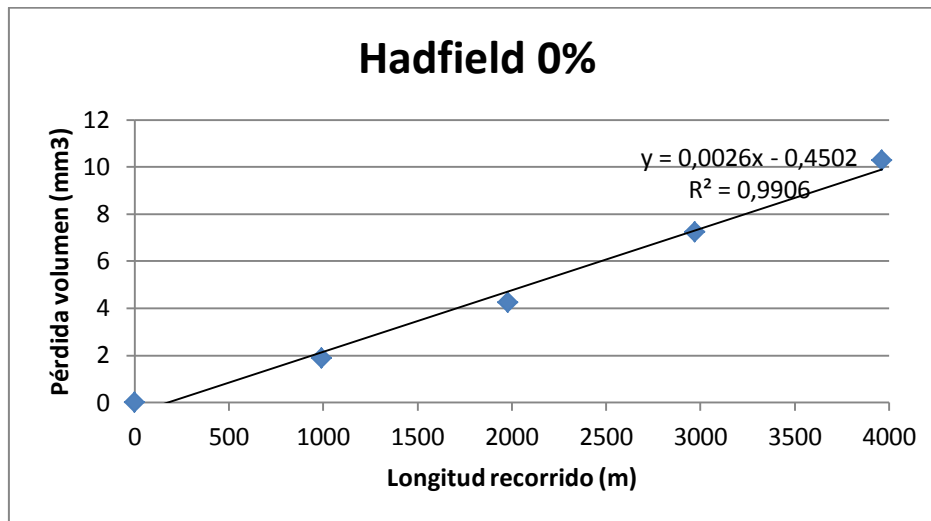


Figura 45. Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero Hadfield sin SP.

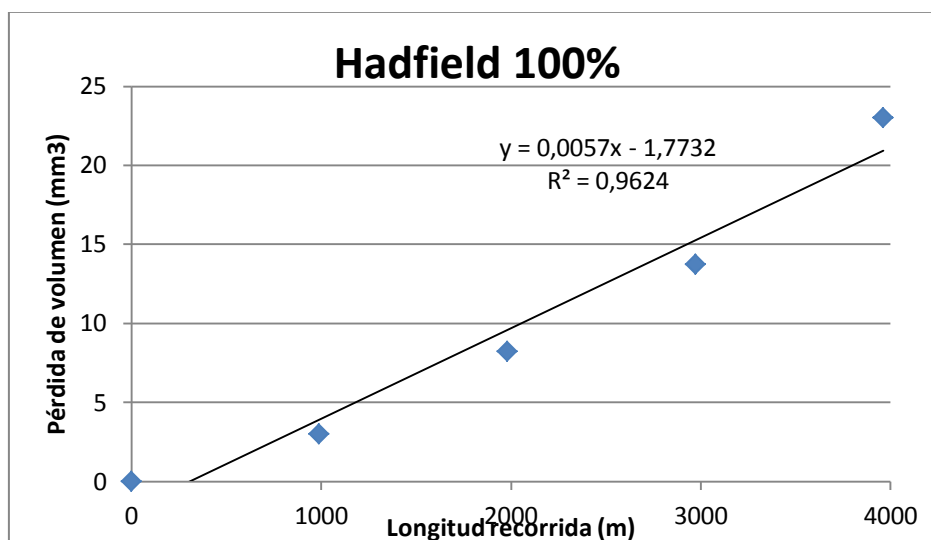
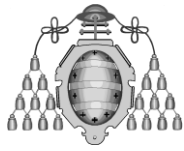
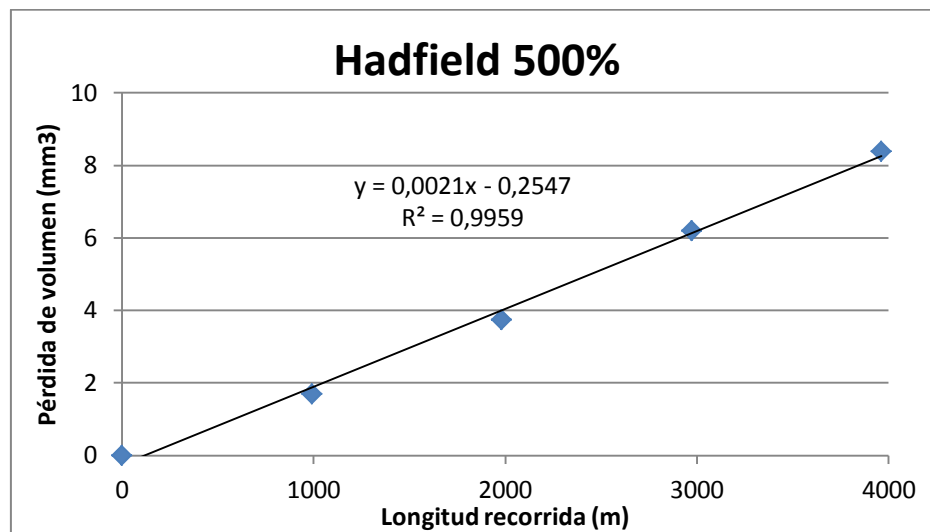


Figura 46. Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero Hadfield con cobertura del 100%.



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Resultados**



**Figura 47.** Representación de la pérdida de volumen respecto a la longitud recorrida en el acero Hadfield con cobertura del 500%.

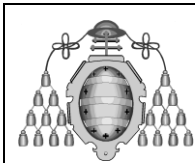
La Tabla 8 muestra la constante de desgaste K obtenida en todos estos ensayos, junto a la rugosidad inicial de cada una de las probetas ensayadas.

**Tabla 8.** Constante de desgaste

Bainítico	K (mm <sup>2</sup> )	Rz (µm)	Hadfield	K (mm <sup>2</sup> )	Rz (µm)
Sin SP	2,9 10 <sup>-6</sup>	2,4	Sin SP	2,6 10 <sup>-6</sup>	16,5
100%	4,6 10 <sup>-6</sup>	43,7	100%	5,8 10 <sup>-6</sup>	61,2
500%	3,2 10 <sup>-6</sup>	41,2	500%	2,1 10 <sup>-6</sup>	41,4

Llama inmediatamente la atención que la aplicación de los tratamientos de shot peening en ambos aceros no ha mejorado el comportamiento al desgaste a pesar del claro endurecimiento superficial que habían introducido (en realidad parece que lo deterioran). Sin embargo, estos resultados hay que tomarlos con prevención ya que la rugosidad inicial de las probetas ensayadas era muy diferente, siendo sin duda éste un factor que es necesario tomar en consideración. El desgaste más intenso (mayor constante K) observado en los dos aceros en la probeta con shot peening y cobertura del 100% podría atribuirse a la alta rugosidad de estas probetas.

Con objeto de determinar si la rugosidad inicial de la probeta influye en los resultados de desgaste, se han tomado las muestras de acero bainítico y Hadfield con grado de cobertura en el shot peening del 100% y se les ha aplicado un proceso de acabado por vibración durante 8 horas. Se trata de un proceso de pulido muy suave utilizando un



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

## Resultados

abrasivo cerámico con objeto de reducir la rugosidad de las probetas, tratando de eliminar la menor cantidad posible de material, a fin de mantener la capa endurecida en el shot peening. Al final de este proceso se han medido unas rugosidades de  $R_a$  media de  $5,54 \mu\text{m}$  en el acero bainítico con cobertura del 100% y de  $4,76 \mu\text{m}$  en el acero Hadfield con cobertura del 100% y valores medios de  $R_z$  de  $25,18 \mu\text{m}$  y  $21,22 \mu\text{m}$  para los mismos aceros respectivamente.

Los resultados de los ensayos de desgaste realizados sobre estas dos últimas probetas, en las mismas condiciones que los anteriores, se recogen en las Figuras 48 y 49.

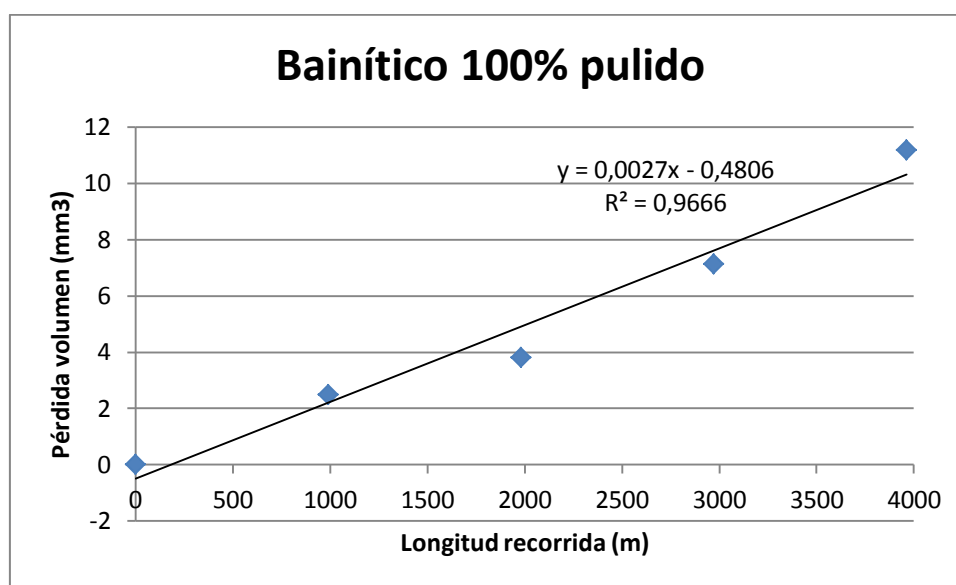
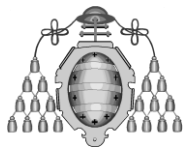
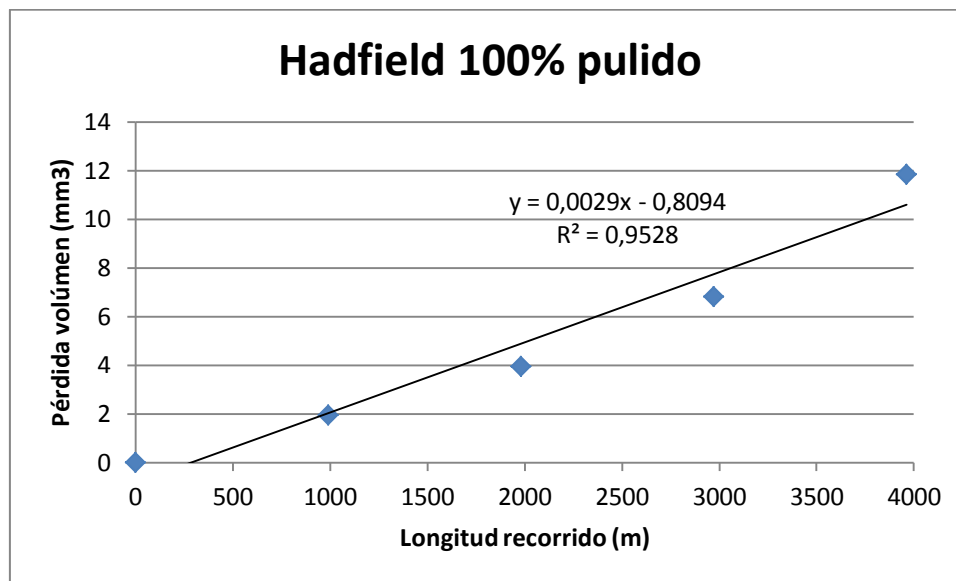


Figura 48. Pérdida de volumen del acero bainítico con cobertura del 100% tras acabado por vibración



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Resultados**



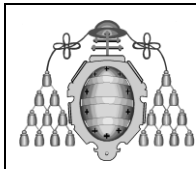
**Figura 49. Pérdida de volumen del acero Hadfield con cobertura del 100% tras acabado por vibración**

La Tabla 9 muestra ahora la constante de desgaste, K, obtenida en el caso de las dos probetas tras el acabado por vibración (AV). Se han obtenido valores muy inferiores a los previos, por lo que se ha demostrado que la rugosidad inicial de las probetas es un parámetro que influye mucho en los resultados de desgaste, y que sin duda es necesario tener siempre en cuenta. El comportamiento frente al desgaste obtenido con los dos aceros es ya casi idéntico al que se había obtenido con las probetas de los aceros base, sin shot peening, aun cuando la rugosidad de las primeras seguía siendo bastante superior, por lo que cabe pensar que la aplicación del tratamiento de shot peening mejora el comportamiento frente al desgaste tanto del acero bainítico como del acero Hadfield, aunque su efecto no parece que sea excesivo.

**Tabla 9. Constante de desgaste de las probetas acabadas por vibración.**

Bainítico	K (mm <sup>2</sup> )	Rz (μm)	Hadfield	K (mm <sup>2</sup> )	Rz (μm)
100%+AV	2,8 10 <sup>-6</sup>	25,3	100%+AV	2,9 10 <sup>-6</sup>	21,4

Si pasamos ahora a comparar el comportamiento de los dos aceros entre sí, las diferencias tampoco parecen demasiado significativas, aunque de nuevo deberíamos tener en cuenta el importante papel que juega la rugosidad. A este respecto, si comparamos la constante K medida tras los tratamientos de shot peening del 500%, que han dado lugar a una rugosidad casi idéntica en los dos aceros (véase la Tabla 8), el



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

**Resultados**

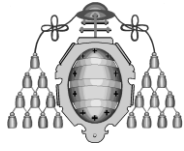
superior comportamiento del acero Hadfield es evidente. Este punto podría llamar la atención si se tiene en cuenta que el acero bainítico es un producto con una mayor dureza que el acero Hadfield (420 HV frente a 250 HV), pero también se había comprobado que, tras el tratamiento de shot peening del 500%, la dureza de la región más superficial (es la que se desgasta en el ensayo) era algo mayor en el acero Hadfield que en el bainítico (580 HV en el acero bainítico y 650 HV en el Hadfield, véanse los perfiles de dureza de las Figura 40 y Figura 41). La Tabla 10 muestra por último el valor de la constante adimensional de desgaste (ecuación 2,  $k = K \cdot H/P$ ) medida en los dos aceros tras el tratamiento de shot peening con la cobertura del 500%.

**Tabla 10. Constante adimensional de desgaste**

Bainítico	k	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Hadfield	k	Rz ( $\mu\text{m}$ )
500%	$9,4 \cdot 10^{-5}$	41,2	500%	$6,5 \cdot 10^{-5}$	41,4

Se ha obtenido de este modo un valor de la constante k adimensional de desgaste bastante parecida en los dos aceros, aunque algo menor para el acero Hadfield.

Finalmente se ha medido la profundidad de la huella generada en los ensayos de desgaste de los dos aceros sin tratar. Las Figuras 50 y 51 dan cuenta de las medidas realizadas: la profundidad máxima de la huella de desgaste generada en el acero bainítico sin shot peening ha sido de 462 micrómetros, mientras que en el acero Hadfield se ha medido una profundidad máxima de 407 micrómetros. Se aprecia entonces que la profundidad de la huella en el acero bainítico es ligeramente superior que la del acero Hadfield. Estos datos concuerdan con los resultados de desgaste mostrados con anterioridad, ya que el acero bainítico presentaba una pérdida de volumen superior a la del acero Hadfield. De cualquier manera, la profundidad de estas huellas se aproxima ya bastante a la de la región endurecida y sometida a tensiones de compresión en los tratamientos de shot peening, por lo que hubiera sido preferible haber utilizado en los ensayos de desgaste una carga normal algo inferior.



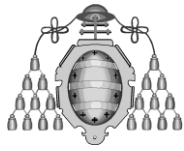
**Figura 50. Profundidad de la huella en el ensayo de desgaste del acero bainítico sin tratar superficialmente**



**Figura 51. Profundidad de la huella en el ensayo de desgaste del acero Hadfield sin tratar superficialmente.**

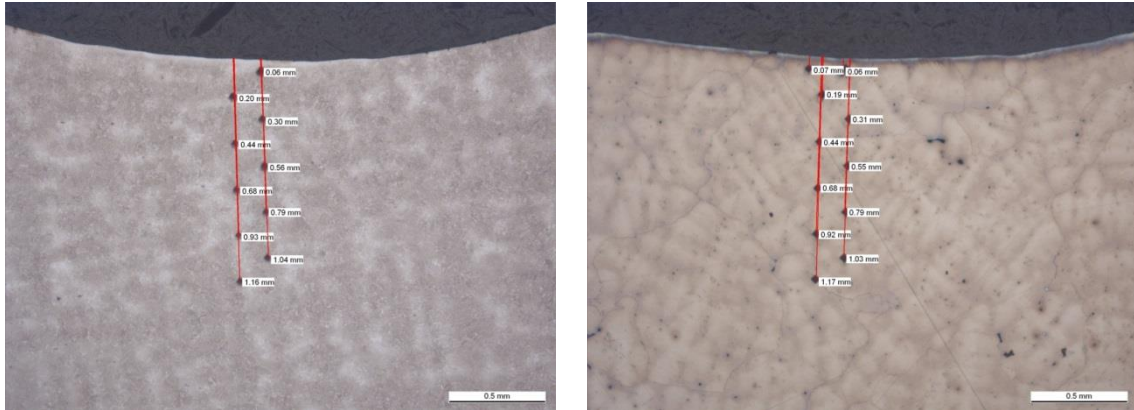
También se realizó un perfil de durezas en estos dos mismos aceros sin tratamiento superficial, después del ensayo de desgaste, con el propósito de detectar si en la región próxima a la huella se generaba algún fenómeno de endurecimiento (véase en la Figura 52 la localización de las citadas medidas). Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 53. En el acero Hadfield se observa un leve endurecimiento en la región más próxima a la huella, mientras que en el acero bainítico no se ha apreciado endurecimiento alguno.



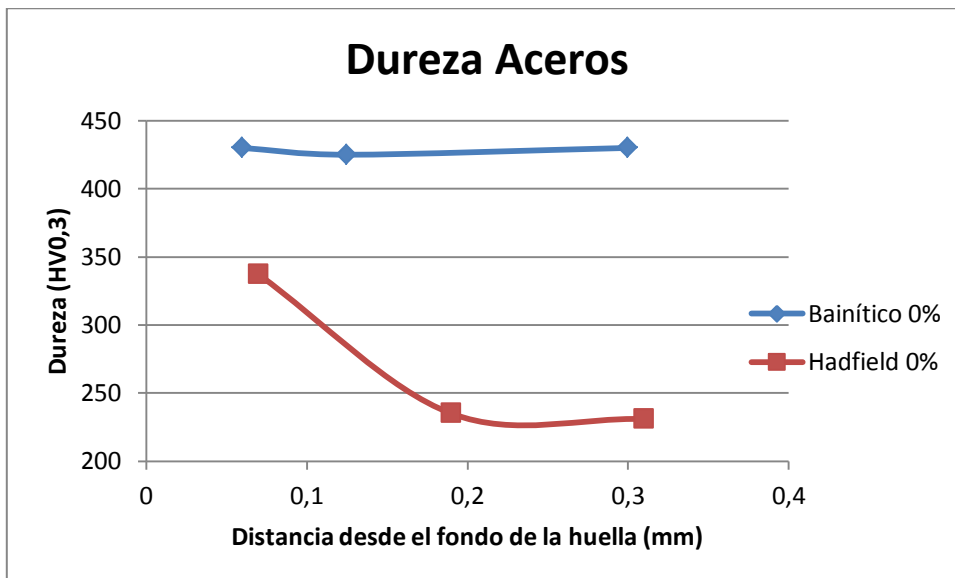


*Mejora de las propiedades superficiales  
de los aceros bainíticos libres de  
cementita y aceros austeníticos mediante  
tratamientos de shot peening*

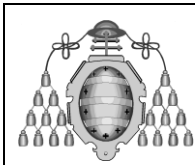
**Resultados**



**Figura 52. Localización de los puntos de dureza medidos debajo de la huella generada en el ensayo de desgaste; a) acero bainítico, b) acero Hadfield**



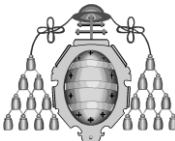
**Figura 53. Perfil de dureza bajo la huella de desgaste en los aceros Hadfield y bainítico sin tratar superficialmente.**



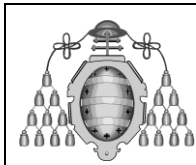
## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el efecto que produce la aplicación de tratamientos de shot peening en dos aceros utilizados en la fabricación de carril, un acero bainítico y un acero Hadfield. Se analizó su influencia en la rugosidad, microestructura, dureza, tensiones residuales y, finalmente frente al desgaste. A la vista de los resultados obtenidos a lo largo del estudio, recogidos en el capítulo anterior de este proyecto, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

- Los tratamientos de shot peening generan unas fuertes tensiones residuales de compresión en la región más superficial (0,7-0,8 mm en el acero bainítico y 0.45-0.55 mm en el acero Hadfield, correspondiendo las profundidades mayores a los tratamientos con mayor grado de cobertura). El nivel que alcanzan estas tensiones es especialmente importante en el caso del acero Hadfield, al ser éste un acero con una capacidad de endurecimiento por deformación muy alta. En este caso se han llegado a medir valores individuales de la tensión de compresión superiores a la resistencia a la tracción del acero.
- Los tratamientos de shot peening han permitido transformar parcialmente la austenita del acero bainítico en martensita, mientras que en el caso del acero Hadfield esta transformación no ha tenido nunca lugar, a pesar del fuerte endurecimiento inducido (mayor que en el acero bainítico).
- Los tratamientos de shot peening incrementan notoriamente la rugosidad de ambos aceros, pero especialmente la del acero Hadfield. La rugosidad inducida ha alcanzado su máximo valor en el caso de las probetas con cobertura del 100%, tanto en el acero bainítico como en el Hadfield. Para grados de cobertura mayores, la rugosidad disminuye en ambos aceros, pero más intensamente en el acero Hadfield.
- El endurecimiento superficial inducido en los tratamientos de shot peening se revela nítidamente a través del parámetro FWHM, que mide el ancho del pico de difracción en su altura media. Además, la profundidad de las tensiones residuales de compresión coincide aproximadamente con la profundidad en la que se altera este parámetro.

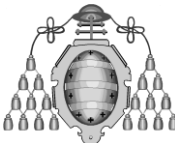
	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Conclusiones</b></p>
---	--	----------------------------

- Mediante la observación en el microscopio óptico, se pudo comprobar la localización de la deformación superficial en el acero Hadfield, que se manifestó en forma de líneas de deformación y maclas.
- En los ensayos de desgaste llevados a cabo se pudo comprobar la importante influencia que tiene la rugosidad de la muestra en los resultados del ensayo: al aumentar la rugosidad inicial de la muestra, el volumen desgastado aumenta significativamente. Además se han obtenido leyes de desgaste lineales, acordes con la conocida ley de Archard, y se han valorado las constante características.
- A pesar de la menor dureza inicial que tiene el acero Hadfield, pero debido principalmente a su muy superior capacidad de endurecimiento por deformación en relación al acero bainítico, el comportamiento al desgaste del acero Hadfield ha sido siempre superior al de aquél.



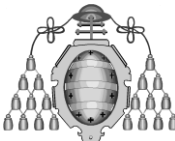
## 6. Bibliografía

- Al Obaid “Shot-peening mechanics; experimental and theoretical analysis” Mechanics of materials, 1995.
- ASM, Metals Handbook, Ninth Edition, Vol. 3, Austenitic Manganese Steel, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, USA.
- Champaigne J. “Shot peening” Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Shot Peening, Paris, France, 1981.
- Jenkins, R. ; Snyder, R.L. “Introduction to X-ray powder diffractometry”, John Wiley & Sons Inc.: New York, 1996.
- Lihe Qian, Qian Zhou, Fucheng Zhang, Jiangying Meng, Ming Zhang, Yuan Tian; “Microstructure and mechanical properties of a low carbon carbide-free bainitic steel co-alloyed with Al and Si”. Materials and Design 39 (2012) 264-268.
- Liu F.C., Lv B., Zhang F.C., Yang S. “Enhanced work hardening in Hadfield steel during explosive treatment”. Materials Letters 65 (2011) 2333-2336.
- Metal Improvement Company “Shot peening. Aplicaciones” 8<sup>a</sup> Edición, 2001.
- Metallography (Principles and practice) George F. Vander Voort. (ASM) 1999.
- Tyler D. “Shot Peening: A Surface Improvement And Forming Process” Metals and Materials 4(II), 1988.
- Universidad Tecnológica de Pereira “Fundamentos teóricos de los aceros austeníticos al manganeso (Aceros Hadfield)” Scientia et Technica Año XIII, No 34. Mayo de 2007.
- [www.metalspain.com/ShotPeening.pdf](http://www.metalspain.com/ShotPeening.pdf)
- [www.mpa.es](http://www.mpa.es)

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p><b>Presupuesto</b></p>
---	--	---------------------------

## 7. Presupuesto

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Total de línea
<b>Coste de ensayos</b>			
12	Tratamiento superficial (shot peening)	€ 50,00	€ 600,00
8	Determinación de la Rugosidad	€ 10,00	€ 80,00
89	Determinación de las Tensiones	€ 75,00	€ 6.675,00
24	Determinación de la Austenita Retenida	€ 100,00	€ 2.400,00
10	Ensayo Desgaste	€ 100,00	€ 1.000,00
6	Determinación de la Dureza	€ 10,00	€ 60,00
6	Preparación metalográfica	€ 30,00	€ 180,00
6	Análisis microestructural	€ 50,00	€ 300,00
		Subtotal	€ 11.295,00
<b>Coste de personal</b>			
625	Revisión información y elaboración del documento	€ 20,00	€ 12.500,00
		Subtotal	€ 12.500,00
		Subtotal	€ 23.795,00
		IVA (21%)	€ 4.996,95
		<b>TOTAL</b>	<b>€ 28.791,95</b>

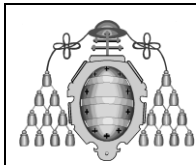
	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p>Anexo</p>
---	--	--------------

## 8. Anexo

### 8.1 Tensiones residuales

Tabla A.1. Tensiones en el acero bainítico con cobertura del 100%.

Tensión (MPa)			Profundidad (mm)	Tensión media (MPa)
-45	0	45		
-591,3	-588,5	-615,9	0,00	-598,6
-645,6	-640,8	-657,3	0,02	-647,9
-652,4	-628,9	-645,1	0,03	-642,1
-657,2	-652,5	-651,8	0,06	-653,8
-652,1	-651	-640,6	0,08	-647,9
-658,2	-641,3	-639,8	0,10	-646,4
-687,2	-679,2	-652	0,11	-672,8
-694,1	-682,2	-668,7	0,13	-681,7
-693,2	-681,2	-682,1	0,15	-685,5
-684,5	-682,8	-690,3	0,16	-685,9
-736,3	-729,1	-726,7	0,18	-730,7
-768,7	-760,9	-769,2	0,20	-766,3
-791,5	-772,1	-799,4	0,22	-787,7
-791,5	-772,1	-799,4	0,24	-787,7
-803,2	-823	-801,8	0,28	-809,3
-821,9	-774,1	-806,5	0,31	-800,8
-766,7	-795,2	-755,8	0,34	-772,6
-691	-689,2	-669,6	0,36	-683,3
-616	-592,1	-644,9	0,40	-617,7
-505,1	-529	-528,3	0,43	-520,8
-338,5	-396	-451,3	0,46	-395,3
-294	-304,5	-372,7	0,49	-323,7
-230	-253,7	-324,2	0,52	-269,3
-161,6	-198,6	-176,2	0,55	-178,8
-110,6	-126,9	-145,8	0,58	-127,8
-106,7	-69	-147,1	0,61	-107,6
-5	-90,6	-76,6	0,64	-57,4
49,3	-52,5	-50,3	0,67	-17,8
79,7	-36,9	-7,2	0,71	11,9
53,2	19,7	-5,8	0,74	22,4

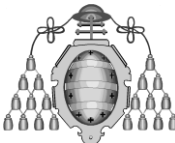


*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

Anexo

**Tabla A2. Tensiones en el acero bainítico con cobertura del 500%.**

Tensión (MPa)			Profundidad (mm)	Tensión media (MPa)
-45	0	45		
-628,6	-606,9	-598,6	0,00	-611,4
-679,4	-638,5	-649,6	0,01	-655,8
-689,8	-654,7	-664,4	0,02	-669,6
-690,8	-653,5	-690,7	0,04	-678,3
-660,3	-662,3	-663,4	0,06	-662,0
-667,2	-649,7	-689,4	0,07	-668,8
-682,6	-667,6	-689,5	0,09	-679,9
-676,5	-659,6	-686,2	0,11	-674,1
-684,2	-667,4	-696,6	0,12	-682,7
-684,8	-668,1	-691,6	0,14	-681,5
-691,8	-690,2	-717,3	0,16	-699,8
-707,5	-725	-721,7	0,18	-718,1
-728,9	-739,3	-726,2	0,19	-731,5
-736,8	-746,5	-744,9	0,21	-742,7
-731,4	-751,7	-748,6	0,24	-743,9
-748,7	-760,4	-779,2	0,26	-762,8
-771	-754,2	-802	0,29	-775,7
-784,9	-750,7	-772,3	0,33	-769,3
-789,6	-778,5	-805,1	0,35	-791,1
-733,6	-741,2	-756,2	0,38	-743,7
-680,1	-706,9	-708,1	0,41	-698,4
-508,1	-552	-590,3	0,44	-550,1
-447,9	-466,9	-531,2	0,48	-482,0
-357,6	-356,6	-402,9	0,51	-372,4
-271	-311,9	-308,1	0,54	-297,0
-126,4	-221,5	-229,7	0,57	-192,5
-135	-138,3	-186,8	0,60	-153,4
-118,3	-126,3	-165,1	0,63	-136,6
-26,9	-114,1	-114,2	0,67	-85,1
-22,8	-32,3	-61,6	0,69	-38,9
-0,6	-39,9	-67,6	0,73	-36,0
3,5	10,6	-34	0,76	-6,6

	<p><i>Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening</i></p>	<p>Anexo</p>
---	--	--------------

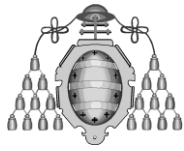
**Tabla 11. Tensiones en el acero Hadfield con cobertura del 100%.**

Tensión (MPa)			Profundidad (mm)	Tensión media (MPa)
-45	0	45		
-311,9	-623,8	-438,1	0,00	-457,9
-604,0	-998,2	-970,2	0,03	-857,5
-872,7	-1093,4	-816,0	0,06	-927,4
-1187,7	-872,5	-633,0	0,11	-897,7
-620,3	-712,6	-778,1	0,14	-703,7
-888,5	-1242,3	-654,4	0,19	-928,4
-295,6	-745,8	-637,9	0,25	-559,8
-1568,6	-1145,9	-164,5	0,30	-959,7
-450,0	-391,8	-96,1	0,35	-312,6
-999,8	-346,8	437,1	0,42	-303,2
815,8	104,4	4221,7	0,48	1714,0

**Tabla 12. Tensiones en el acero Hadfield con cobertura del 500%.**

Tensión (MPa)			Profundidad (mm)	Tensión media (MPa)
-45	0	45		
-724,5	-669,3	-556,4	0,00	-650,1
-825,6	-968,7	-882,1	0,03	-892,1
-1106,4	-727,2	-1064,1	0,06	-965,9
-980,4	-1031,1	-1277,0	0,09	-1096,2
-762,9	-1013,8	-1154,6	0,12	-977,1
-941,4	-715,6	-1199,3	0,17	-952,1
-970,7	-127,9	-1065,5	0,22	-721,4
-1297,2	-1070,1	-1139,5	0,27	-1168,9
-729,9	-977,5	-951,4	0,33	-886,3
-769,4	-700,5	-722,6	0,39	-730,8
-261,6	-600,8	-339,9	0,45	-400,8
-564,9	-64,8	225,6	0,51	-134,7
10,3	-226,2	344,1	0,57	42,7
-57,3	188,3	-122,5	0,63	2,8





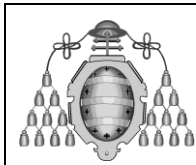
*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

Anexo

## 8.2 FWHM

Tabla 13. Valores del parámetro FWHM del acero bainítico con cobertura del 100%.

Profundidad (mm)	FWHM		
	-45	0	45
0,00	5.11° ± 0.25°	5.14° ± 0.24°	5.15° ± 0.23°
0,0179	4.20° ± 0.18°	4.23° ± 0.19°	4.23° ± 0.18°
0,0348	4.10° ± 0.16°	4.12° ± 0.20°	4.11° ± 0.16°
0,0559	4.22° ± 0.11°	4.24° ± 0.11°	4.20° ± 0.11°
0,0841	3.81° ± 0.14°	3.82° ± 0.15°	3.82° ± 0.15°
0,0988	3.74° ± 0.12°	3.76° ± 0.15°	3.77° ± 0.13°
0,1144	3.67° ± 0.13°	3.68° ± 0.14°	3.69° ± 0.13°
0,1309	3.60° ± 0.13°	3.60° ± 0.14°	3.61° ± 0.14°
0,149	3.80° ± 0.11°	3.79° ± 0.11°	3.80° ± 0.12°
0,1648	3.40° ± 0.15°	3.41° ± 0.15°	3.41° ± 0.15°
0,1842	3.40° ± 0.15°	3.38° ± 0.14°	3.41° ± 0.14°
0,2038	3.39° ± 0.16°	3.36° ± 0.14°	3.38° ± 0.15°
0,2223	3.32° ± 0.13°	3.32° ± 0.13°	3.32° ± 0.15°
0,2453	3.35° ± 0.14°	3.33° ± 0.12°	3.31° ± 0.13°
0,2831	3.50° ± 0.10°	3.52° ± 0.10°	3.49° ± 0.11°
0,3147	3.34° ± 0.10°	3.34° ± 0.10°	3.28° ± 0.12°
0,3436	3.33° ± 0.12°	3.35° ± 0.15°	3.30° ± 0.13°
0,3656	3.35° ± 0.15°	3.33° ± 0.14°	3.33° ± 0.12°
0,4001	3.43° ± 0.17°	3.46° ± 0.15°	3.41° ± 0.13°
0,4311	3.52° ± 0.13°	3.55° ± 0.15°	3.50° ± 0.10°
0,4637	3.60° ± 0.10°	3.60° ± 0.10°	3.57° ± 0.11°
0,4946	3.84° ± 0.09°	3.87° ± 0.11°	3.79° ± 0.12°
0,5185	3.70° ± 0.13°	3.70° ± 0.08°	3.61° ± 0.11°
0,549	3.74° ± 0.14°	3.87° ± 0.10°	3.73° ± 0.10°
0,5782	4.03° ± 0.13°	4.10° ± 0.10°	4.04° ± 0.09°
0,6074	4.05° ± 0.10°	4.07° ± 0.07°	4.00° ± 0.09°
0,6392	3.95° ± 0.09°	3.96° ± 0.15°	3.88° ± 0.13°
0,6751	4.14° ± 0.08°	4.18° ± 0.12°	4.10° ± 0.08°
0,7061	4.06° ± 0.13°	4.04° ± 0.11°	3.98° ± 0.11°
0,7371	4.18° ± 0.05°	4.21° ± 0.08°	4.16° ± 0.11°

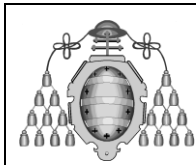


*Mejora de las propiedades superficiales  
de los aceros bainíticos libres de  
cementita y aceros austeníticos mediante  
tratamientos de shot peening*

Anexo

**Tabla 14. Valores del parámetro FWHM del acero bainítico con cobertura del 500%.**

Profundidad (mm)	FWHM		
	-45	0	45
0,00	5.08° ± 0.19°	5.16° ± 0.21°	5.19° ± 0.17°
0,0122	4.42° ± 0.15°	4.44° ± 0.18°	4.40° ± 0.17°
0,0242	4.33° ± 0.17°	4.35° ± 0.17°	4.30° ± 0.16°
0,043	4.16° ± 0.16°	4.20° ± 0.16°	4.14° ± 0.16°
0,0589	4.35° ± 0.10°	4.38° ± 0.10°	4.35° ± 0.09°
0,0739	4.00° ± 0.14°	4.02° ± 0.15°	4.01° ± 0.13°
0,0896	3.97° ± 0.14°	3.98° ± 0.15°	3.95° ± 0.14°
0,1072	3.89° ± 0.14°	3.90° ± 0.15°	3.89° ± 0.14°
0,1256	3.76° ± 0.15°	3.76° ± 0.16°	3.76° ± 0.15°
0,1421	3.95° ± 0.12°	3.96° ± 0.14°	3.96° ± 0.13°
0,1594	3.49° ± 0.14°	3.53° ± 0.17°	3.56° ± 0.15°
0,177	3.40° ± 0.14°	3.41° ± 0.16°	3.40° ± 0.14°
0,1957	3.32° ± 0.14°	3.32° ± 0.15°	3.32° ± 0.14°
0,2149	3.26° ± 0.15°	3.24° ± 0.14°	3.24° ± 0.15°
0,2363	3.16° ± 0.14°	3.13° ± 0.14°	3.15° ± 0.14°
0,2661	3.09° ± 0.12°	3.07° ± 0.13°	3.07° ± 0.13°
0,2977	3.01° ± 0.12°	2.99° ± 0.11°	2.97° ± 0.10°
0,3272	3.03° ± 0.13°	3.02° ± 0.11°	3.02° ± 0.14°
0,3536	3.03° ± 0.12°	3.06° ± 0.11°	3.05° ± 0.14°
0,3832	3.19° ± 0.14°	3.21° ± 0.14°	3.18° ± 0.13°
0,4126	3.25° ± 0.12°	3.27° ± 0.09°	3.30° ± 0.15°
0,4478	3.38° ± 0.10°	3.40° ± 0.16°	3.41° ± 0.14°
0,4792	3.67° ± 0.08°	3.69° ± 0.11°	3.65° ± 0.12°
0,5099	3.52° ± 0.11°	3.58° ± 0.11°	3.54° ± 0.09°
0,5409	3.81° ± 0.09°	3.86° ± 0.11°	3.80° ± 0.12°
0,5731	3.68° ± 0.09°	3.66° ± 0.11°	3.66° ± 0.11°
0,603	3.95° ± 0.11°	3.92° ± 0.10°	3.97° ± 0.11°
0,6341	3.82° ± 0.13°	3.79° ± 0.11°	3.80° ± 0.07°
0,6668	4.03° ± 0.09°	3.96° ± 0.09°	3.97° ± 0.05°
0,6966	3.89° ± 0.09°	3.91° ± 0.11°	3.83° ± 0.08°
0,7281	4.08° ± 0.15°	4.05° ± 0.14°	4.02° ± 0.09°
0,7628	4.10° ± 0.12°	4.09° ± 0.12°	4.06° ± 0.11°



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

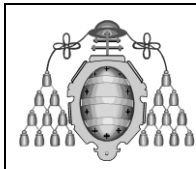
Anexo

**Tabla 15. Valores del parámetro FWHM del acero Hadfield con cobertura del 100%.**

Profundidad (mm)	FWHM		
	-45	0	45
0,00	2.75° ± 0.21°	2.79° ± 0.30°	2.74° ± 0.23°
0,0314	2.48° ± 0.19°	2.62° ± 0.29°	2.43° ± 0.24°
0,0617	2.23° ± 0.27°	2.44° ± 0.27°	2.33° ± 0.32°
0,1057	1.89° ± 0.28°	2.10° ± 0.15°	1.99° ± 0.21°
0,1451	1.97° ± 0.28°	2.14° ± 0.27°	1.86° ± 0.13°
0,1958	1.70° ± 0.18°	1.77° ± 0.30°	1.61° ± 0.32°
0,2495	2.19° ± 0.51°	1.50° ± 0.32°	1.66° ± 0.72°
0,2993	1.28° ± 0.33°	1.39° ± 0.52°	0.95° ± 0.46°
0,3507	1.60° ± 0.33°	1.48° ± 0.31°	1.25° ± 0.26°
0,4163	1.36° ± 0.80°	1.13° ± 0.32°	0.88° ± 0.28°
0,4813	1.16° ± 0.55°	0.59° ± 0.31°	0.90° ± 0.39°

**Tabla 16. Valores del parámetro FWHM del acero Hadfield con cobertura del 500%.**

Profundidad (mm)	FWHM		
	-45	0	45
0	3.51° ± 0.16°	3.57° ± 0.22°	3.03° ± 0.11°
0,0327	2.93° ± 0.16°	2.96° ± 0.26°	2.95° ± 0.18°
0,0623	2.70° ± 0.25°	2.66° ± 0.26°	2.69° ± 0.20°
0,094	2.68° ± 0.39°	2.47° ± 0.31°	2.51° ± 0.18°
0,1218	2.79° ± 0.31°	2.82° ± 0.53°	2.69° ± 0.41°
0,1724	1.91° ± 0.20°	1.91° ± 0.48°	2.07° ± 0.15°
0,2206	1.83° ± 0.27°	2.17° ± 0.64°	1.66° ± 0.26°
0,2723	2.26° ± 1.33°	1.79° ± 0.82°	1.95° ± 1.10°
0,3323	1.60° ± 0.33°	1.61° ± 0.28°	1.58° ± 0.20°
0,3906	1.51° ± 0.27°	1.00° ± 0.35°	1.38° ± 0.43°
0,451	1.79° ± 0.94°	1.27° ± 0.41°	1.47° ± 0.38°
0,5115	1.20° ± 0.16°	1.06° ± 0.22°	1.41° ± 0.59°
0,5703	1.57° ± 0.56°	1.79° ± 0.61°	1.37° ± 0.32°
0,6338	0.83° ± 0.12°	1.21° ± 0.63°	1.15° ± 0.58°



*Mejora de las propiedades superficiales de los aceros bainíticos libres de cementita y aceros austeníticos mediante tratamientos de shot peening*

Anexo

### 8.3 Austenita retenida

Tabla A9. Contenido de austenita retenida en el acero bainítico con cobertura del 100% y 500%

Profundidad ( $\mu\text{m}$ )	Austenita retenida B 100%	Austenita retenida B 500%
10	3,4 $\pm$ 1,4%	2,1 $\pm$ 2,1%
50	4,1 $\pm$ 1,0%	3,1 $\pm$ 1,2%
100	6,8 $\pm$ 1,4%	5,3 $\pm$ 1%
200	8,2 $\pm$ 1,5%	4,9 $\pm$ 2,1%
400	15,4 $\pm$ 1,6%	13,1 $\pm$ 1,5%