

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

TRABAJO FIN DE MASTER

Titulo de trabajo: Efecto de la decarburación en el nivel de tensiones residuales generado en procesos de shot peening.

Entidad colaboradora: CIE GALFOR

Departamento: Materiales

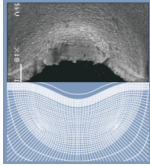
Tutor académico: Javier Belzunce Varela

Departamento: Materiales

Juan Iglesias Rodero

Universidad de Oviedo

Julio 2013



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

TRABAJO FIN DE MASTER

Titulo de trabajo: Efecto de la decarburación en el nivel de tensiones residuales generado en procesos de shot peening.

Firma

Firma

Firma

Nombre tutor industrial

Javier Belzunce Varela

Juan Iglesias Rodero

o externo (si lo hubiera):

Universidad de Oviedo

Julio 2013

Índice:

<i>Índice figuras</i>	5
<i>Índice gráficos</i>	5
<i>Índice tablas</i>	5
<i>Índice fotografías</i>	5
<i>Índice micrografías</i>	6
1- Marco del proyecto.....	7
2- Introducción.....	8
2.1- Generalidades sobre el proceso de shot peening.....	8
2.2- Características del tratamiento superficial de shot peening.....	8
2.2.1- Intensidad Almen.....	8
2.2.2- Cobertura.....	10
2.2.3- proyectiles.....	12
2.3- Parámetros básicos del tratamiento de shot peening.....	13
2.3.1- Ángulo de impacto.....	13
2.3.2- Velocidad e los proyectiles.....	13
2.3.3- Flujo de proyectiles.....	14
2.4- Efecto de los tratamientos de shot peening.....	14
2.4.1- Rugosidad.....	14
2.4.2- Endurecimiento superficial.....	15
2.4.3- Tensiones residuales.....	15
2.4.4- Comportamiento a fatiga.....	16
2.5- Decarburación de los aceros.....	17
3- Procedimiento experimental y equipos utilizados.....	19
3.1- Tratamiento térmico a 1200°C.....	19
3.2- Tratamiento de temple y revenido.....	23
3.3- Tratamiento de shot peening.....	23
3.4- Tensiones de compresión medidas en el difractometro.....	24
3.4.1- Medida de las tensiones residuales.....	25

4- Resultados.....	27
4.1- Tratamiento térmico a 1200°C.....	27
4.2- Tratamiento de temple y revenido.....	29
4.3- Tensiones de compresión medidas en el difractometro.....	32
4.4- Análisis de la rugosidad de las probetas sometidas a shot peening...	38
5- Conclusiones.....	41
6- Bibliografía.....	42

Índice figuras:

Fig 1. Esquema funcionamiento tratamiento shot peening.

Fig 2. Estado de la zona golpeada por las bolas en el tratamiento de shot peening.

Índice gráficos:

Gráfico 1. Curva de saturación

Gráfico 2. Ley de Avrami

Gráfico 3. Profundidad/Tensión residual.

Gráfico 4. Perfil de durezas las 3 probetas.

Gráfico 5. Perfil de tensiones en las direcciones -45° , 0° y 45° tras shoot peening. Probeta 0

Gráfico 6. Perfil de tensiones en las direcciones -45° , 0° y 45° tras shoot peening. Probeta 1

Gráfico 7. Perfil de tensiones en las direcciones -45° , 0° y 45° tras shoot peening. Probeta 2

Gráfico 8. Perfil de tensiones en la dirección -45° tras shot peening para las 3 probetas

Gráfico 9. Perfil de tensiones en la dirección -45° tras shot peening para las 3 probetas

Gráfico 10. Perfil de tensiones en la dirección -45° tras shot peening para las 3 probetas

Gráfico 11. Perfil de tensiones principales tras shoot peening. Probeta 0

Gráfico 12. Perfil de tensiones principales tras shoot peening. Probeta 1

Gráfico 13. Perfil de tensiones principales tras shoot peening. Probeta 2

Índice tablas:

Tabla 1. Consecuencias del tratamiento de shot peening

Tabla 2. Composición química y distancias Jominy del material

Tabla 3. Efecto del tratamiento en la dureza de las probetas 1 y 2.

Tabla 4. Resumen tensiones-profundidad tras el shot peening.

Índice fotografías:

Fotografías 1 y 2. Horno

Fotografía 3. Tronzadora

Fotografía 4. Embutidora automática

Fotografías 5, 6 y 7. Herramientas de pulido de probetas

Fotografía 8. Microdurómetro

Fotografía 9. Microscopio

Fotografía 10. Equipo de tratamiento de shot peening

Fotografías 11 y 12. Probeta usada para determinar el tiempo del tratamiento

Fotografías 13 y 14. Imágenes tratadas con el programa de edición

Fotografía 15. Difractómetro

Fotografía 16. Máquina de electropulido

Índice micrografías:

Micrografía 1. Probeta 0. Interior 50 aumentos.

Micrografía 2. Probeta 0. Superficie 50 aumentos.

Micrografía 3. Probeta 1. Superficie 50 aumentos.

Micrografía 4. Probeta 2. Superficie 50 aumentos.

Micrografía 5. Probeta 0 superficial. 50 aumentos

Micrografía 6. Probeta 1 superficial. 50 aumentos

Micrografía 7. Probeta 2 superficial. 50 aumentos

1. Marco del proyecto:

En la actualidad, se sabe que una serie de factores pueden influir positivamente en la vida a fatiga, aumentándola notablemente. Los factores que intervienen en un proceso de rotura por fatiga son fundamentalmente el diseño, el tratamiento superficial y el endurecimiento superficial.

Un diseño adecuado, con contornos redondeados y sin entallas, mejora el comportamiento a fatiga. En cuanto a los tratamientos superficiales, los procesos de mecanizado, por ejemplo, puede reducir la vida a fatiga si el propio proceso genera imperfecciones en la superficie del componente que deriven en grietas. Un acabado superficial mediante pulido elimina las imperfecciones y aumenta la vida a fatiga. No obstante, los procesos más beneficiosos son aquellos que generan una capa subsuperficial de tensiones residuales de compresión.

Por último, el endurecimiento superficial por medio de un proceso de carburación o nitruración aumenta la dureza de la superficie y la vida a fatiga al dificultar la nucleación de la grieta en superficie y su posterior crecimiento. Estos métodos también generan habitualmente tensiones residuales de compresión que, como se indicó, dificultan el avance de las grietas por fatiga.

Uno de los procesos más ampliamente utilizados en la industria para mejorar la vida a fatiga es el de componentes industriales es el tratamiento de shot peening. El shot peening es un tratamiento superficial que aumenta la resistencia a fatiga en virtud de la generación de una capa de tensiones residuales de compresión y un endurecimiento superficial.

En el presente proyecto se estudió como podía afectar a las tensiones residuales generadas en los procesos de shot peening, la existencia de una decarburación, que muchas veces se induce en los procesos de forja, en virtud del calentamiento a muy alta temperatura de la pieza que se quiere forjar. La pieza objeto de estudio fue un eje de camión de acero al que, material que se calentó durante diferentes tiempos a la temperatura de forja con objeto de alcanzar diferentes grados de decarburación y medir posteriormente las tensiones residuales generadas tras la aplicación de tratamientos de shot peening.

2. Introducción:

En esta introducción se describirán en primer lugar los tratamientos de shot peening y, posteriormente, los fenómenos de decarburación de los aceros, que podrían ocurrir si el calentamiento previo a la forja se prolonga de manera excesiva.

2.1 Generalidades sobre el proceso de shot peening:

El shot peening es un tratamiento superficial de deformación plástica en frío. La superficie de trabajo se bombardea con pequeños proyectiles esféricos que impactan a gran velocidad. Cada impacto genera una pequeña huella redondeada que produce el aplastamiento de la superficie del material.

El material afectado fluye plásticamente bajo esfuerzos de tracción biaxial y al no recuperar su volumen inicial, el resto del material que lo rodea lo comprime elásticamente. De este modo, se genera un esfuerzo residual biaxial de compresión. Cuando la totalidad de la superficie está cubierta por estos pequeños impactos, se crea un campo de compresión uniforme bajo la superficie.

Las tensiones residuales de compresión introducidas por el tratamiento de shot peening retrasan o incluso pueden llegar a bloquear el inicio de las grietas de fatiga, aumentando sensiblemente la vida en servicio de las piezas tratadas. Los tratamientos de shot peening tienen un amplio campo de aplicación en la automovilística y en aeronáutica.

2.2 Características del tratamiento superficial de shot peening:

Los parámetros básicos que caracterizan a un tratamiento de shot peening son:

- La intensidad Almen
- La cobertura
- Los proyectiles empleados.

2.2.1 Intensidad Almen:

La intensidad Almen caracteriza la energía del flujo de bolas que impacta contra una superficie. La intensidad Almen se mide mediante las placas Almen. Para ello se sujeta firmemente la placa Almen en el bloque Almen y se expone al chorro de proyectiles. Como resultado del tratamiento, al soltar las placas, estas tienden a curvarse y separarse del bloque a consecuencia de las tensiones residuales de compresión inducidas en los impactos de los proyectiles sobre la placa (Fig. 1).

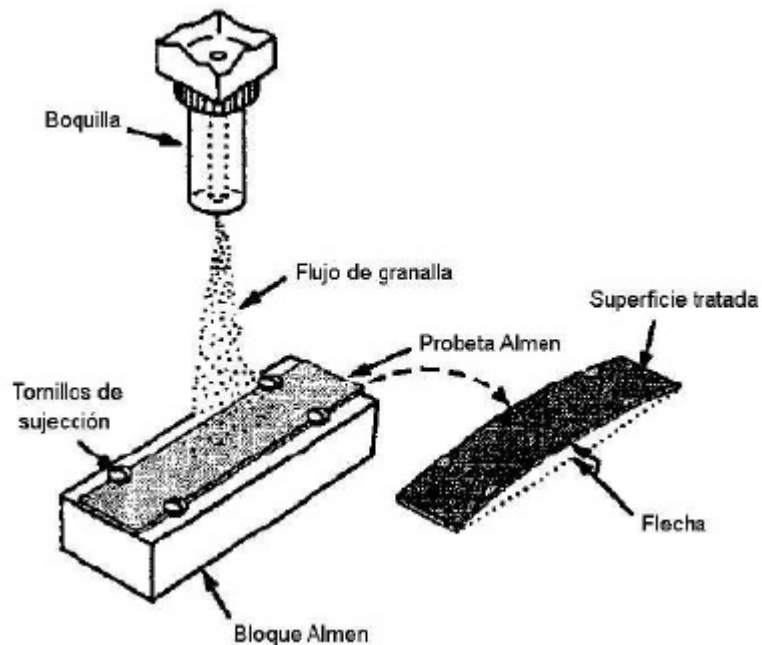


Fig 1. Esquema funcionamiento tratamiento shot peening.

Para determinar la intensidad Almen es necesario trazar la curva de saturación (Gráfico 1), que se obtiene experimentalmente sometiendo varias placas Almen al chorro de proyectiles durante distintos tiempos de exposición. De esta manera, se obtienen diferentes curvaturas que se miden con el medidor Almen. Con estos puntos se traza la curva de saturación en un gráfico que representa la flecha medida frente a la duración del tratamiento con la que se determinará la intensidad del mismo.

- Placa Almen: es una fina lámina de acero de 19 mm de ancho y 76 mm de largo. En función de su espesor hay 3 tipos de placas. En función de la intensidad utilizada se escogerá el espesor apropiado de la placa.
- Bloque Almen: es el soporte que sujeta las placas Almen durante el tratamiento de shot peening.
- Medidor Almen: es un equipo que permite determinar la flecha generada en el tratamiento de shot peening en el centro de la placa Almen.
- Curva de saturación: permite determinar la intensidad Almen de un tratamiento de shot peening. Para ello, se requieren un mínimo de cuatro placas que se ensayan bajo tiempos de exposición crecientes. Se representa gráficamente la flecha de las placas Almen frente al tiempo de exposición y se obtiene una serie de puntos. Los puntos obtenidos experimentalmente se ajustan a una curva que caracteriza el tratamiento, que se denomina curva de saturación.

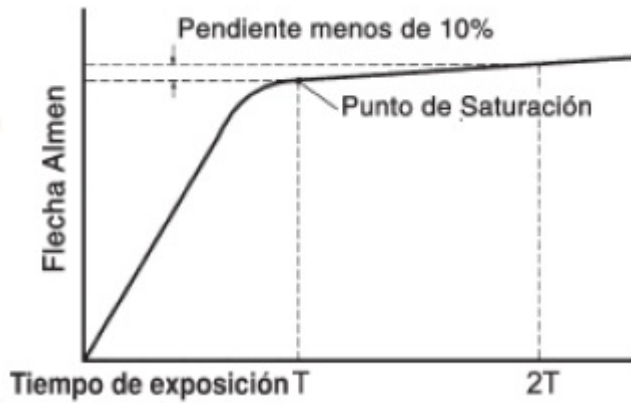


Gráfico 1. Curva de saturación

La curva de saturación se define de forma simplificada (curva de dos parámetros):

$$h = a * (1 - e^{-b*t})$$

Siendo h la flecha medida en la placa Almen, t el tiempo de exposición y ``a`` y ``b`` los parámetros de la curva.

La intensidad Almen se describe por la situación del punto de saturación, tal y como se muestra en el Gráfico 1. El punto de saturación se define 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.

El código empleado para identificar los tratamientos es de tipo alfanumérico, formado por un número que representa la intensidad del tratamiento de shot peening, y una letra que especifica el tipo de placa Almen utilizada. Así por ejemplo, en el caso de un tratamiento de intensidad Almen 16 A, el número 16 indica la flecha de la placa Almen en mm, correspondiente al punto de saturación, multiplicada por 40 y la letra señala que se han empleado placas de tipo A para caracterizar el tratamiento (son las de uso más habitual).

2.2.2 Cobertura:

La cobertura es el parámetro que indica el porcentaje de superficie de la pieza afectada por las huellas producidas por los impactos. Analíticamente la llegada de los proyectiles a la superficie de la pieza sigue una distribución estadística de tipo Poisson. En base a la distribución de Poisson y sabiendo que la cobertura es acumulativa se llega a la expresión:

$$C = 1 - e^{-\lambda}$$

λ es el número de veces que un lugar determinado está sujeto a impactos. Suponiendo que r es el radio de huella y R, el flujo, que es constante:

$$\lambda = \pi * r^2 * R * t$$

siendo t el tiempo de exposición.

La evolución de la cobertura en un proceso de shot peening será:

$$C = 100*(1 - e^{-ARt})$$

Siendo C la cobertura, A el área individual de cada huella ($\pi*r^2$), R el flujo de proyectiles y t el tiempo de exposición.

En el Gráfico 2 se ve la representación de la cobertura frente al tiempo, es decir, la representación de la ley de Avrami.

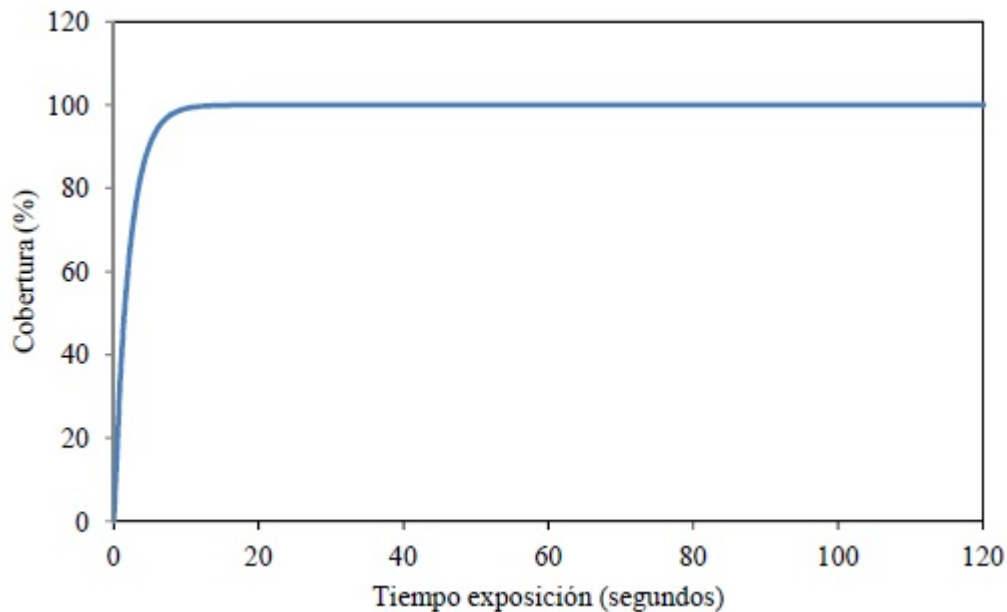


Gráfico 2. Ley de Avrami

La cobertura sigue una curva exponencial de manera que es imposible alcanzar teóricamente el 100%. Al inicio del tratamiento, el crecimiento de la cobertura es lineal con el tiempo y como hay pocos impactos es poco probable que haya solapamiento entre ellos, de tal modo que se consigue un 80% de cobertura con solo el 20% del tiempo total de tratamiento. A medida que la superficie está siendo cubierta por los sucesivos impactos, la probabilidad de que haya impactos solapados aumenta, luego el ritmo de crecimiento de la cobertura disminuye.

De hecho, para lograr el último 10% de cobertura es necesario aplicar un tiempo 1,5 veces mayor que para alcanzar el 90% y para alcanzar el último 1% se requiere un 20% del tiempo total. Como se dijo con anterioridad, teóricamente el 100% de cobertura no se puede conseguir, por lo que en la práctica se considera cobertura total cuando la cobertura es del 98%.

Cuando se aplican coberturas demasiado bajas, en situaciones de fatiga o de corrosión bajo tensión, las grietas se inician fácilmente sobre las regiones no tratadas, donde las tensiones de compresión

generadas por el tratamiento han sido insuficientes. Por otro lado, una cobertura de 150% o 200% significa una duración del tratamiento de 1,5 y 2 veces superior respectivamente al tratamiento necesario para alcanzar la cobertura completa, de modo que el coste del tratamiento se incrementa significativamente sin que reporte habitualmente una mejora sensible.

A partir del 80% de cobertura, el tratamiento del shot peening aumenta la vida a fatiga. Esto se debe a que, a pesar de que haya pequeñas zonas no impactadas, la zona deformada bajo la superficie es mayor que la región indentada (Fig.2), por lo que estas zonas se solapan antes de alcanzar la cobertura completa. Según Cammett¹, se puede considerar que el diámetro de la zona deformada plásticamente bajo la superficie es aproximadamente el doble del diámetro de la huella que se observa superficialmente, por lo que no es estrictamente necesario que las huellas se solapen completamente hasta cubrir toda la superficie, pues dos huellas lo suficientemente próximas generan dos zonas plásticas que se solapan subsuperficialmente, asegurando la continuidad de la zona deformada en las capas subsuperficiales.

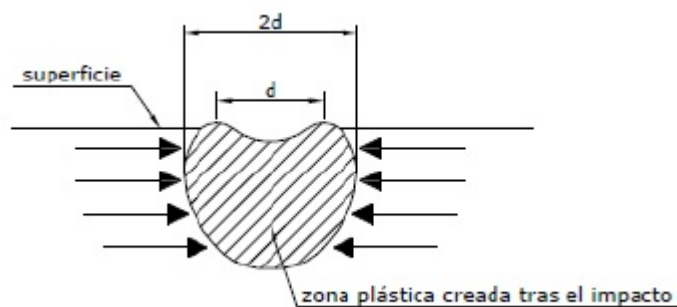


Fig 2. Zona deformada plásticamente creada por las bolas en el tratamiento de shot peening.

2.2.3 Proyectiles:

Los proyectiles utilizados en el tratamiento de shot peening son bolas perfectamente esféricas de diferentes materiales en función de la aplicación. Las principales características que definen cualquier tipo de proyectil son: el tamaño, la forma, la dureza, la densidad y la durabilidad

El tamaño y la forma cambiarán durante el uso de los proyectiles. Cuando una bola se rompa debe ser retirada para evitar que sus aristas afiladas lleguen a causar daños en la superficie de la pieza tratada.

Es importante que la distribución de tamaños de los proyectiles sea lo más uniforme posible pues de lo contrario, los proyectiles más grandes darían lugar a tensiones de compresión mayores, y se crearían zonas con tensiones residuales de compresión más elevadas, haciendo que la capa comprimida fuera heterogénea, dando resultados heterogéneos en la respuesta a fatiga.

La dureza necesaria de los proyectiles dependerá de los parámetros del tratamiento (presión, diámetro y distancia de proyección) y de a la dureza del material a tratar. De este modo, cuanto menor sea

¹ Cammett J., `` The effect of shot peening coverage on residual stress, cold work and fatigue in a Ni-Cr-Mo low alloy steel ``

la dureza del material que se desea tratar, mayor será la deformación plástica inducida en cada impacto y mayor será también la profundidad afectada por el tratamiento. En todo caso, la dureza de los proyectiles utilizados debe ser necesariamente igual o superior a la dureza de la superficie a tratar. Por este motivo se suelen utilizar proyectiles con rangos de dureza comprendidos entre 45 y 52 HRC.

2.3 Parámetros básicos del tratamiento de shot peening:

Los parámetros de proceso son aquellas variables sobre las que se debe actuar para conseguir procesos fiables y repetitivos que aseguren la estabilidad de los parámetros básicos. Se considera que los más relevantes son:

- Ángulo de impacto
- Velocidad de proyectiles
- Flujo de proyectiles

2.3.1 Ángulo de impacto:

El ángulo de impacto condiciona la intensidad Almen y la energía absorbida por la superficie de la pieza en los impactos. La energía absorbida por la pieza se determina como la diferencia entre la energía cinética de los proyectiles antes y después del impacto .

El ángulo de impacto óptimo, aquel que maximiza la energía absorbida por la superficie de la pieza, es 90°, de modo que el tratamiento de shot peening óptimo ocurrirá cuando el chorro de proyectiles impacte perpendicularmente sobre la superficie de la pieza.

La ecuación que relaciona la intensidad Almen con el ángulo de impacto es la siguiente:

$$I_{\theta} = I_{90^{\circ}} * \text{sen}\theta$$

2.3.2 Velocidad de los proyectiles:

La velocidad de los proyectiles juega un papel fundamental en la energía transmitida a la pieza. En realidad, para una determinada masa (m) de los proyectiles, la velocidad fija la energía aplicada.

La velocidad no influye apenas en la tensión residual máxima de compresión alcanzada pero, sin embargo, se observa que cuanto mayor es la velocidad, mayor es la profundidad de la capa afectada por las tensiones residuales de compresión.

2.3.3 Flujo de proyectiles:

Un flujo irregular puede causar un campo de tensiones residuales no uniforme. Por consiguiente, se hace necesario trabajar con una presión constante durante el tratamiento de shot peening.

Al aumentar el flujo aumenta la probabilidad de que los proyectiles choquen entre sí en el interior de la boquilla o la manguera. De este modo, la velocidad se reduce provocando un descenso de la energía cinética, lo que se traduce en una menor penetración de las tensiones residuales de compresión.

En la mayor parte de los ensayos experimentales se trabaja con un valor del flujo constante. Está demostrado que para un flujo másico de granalla constante, el grado de cobertura evoluciona más rápidamente cuanto más pequeño es el tamaño de los proyectiles.

Por lo tanto, parece razonable trabajar con el tamaño de proyectil más pequeño posible que permita alcanzar la intensidad deseada. De este modo, el proceso es más eficiente y económico. No obstante, existe un límite práctico ya que si la pieza alcanza la cobertura requerida en un espacio de tiempo muy corto, el control del proceso se hace más difícil.

2.4 Efecto de los tratamientos de shot peening:

- Modificación del acabado superficial (cambio de rugosidad).
- Endurecimiento de la región superficial.
- Generación de un campo de tensiones residuales de compresión bajo la superficie.
- Mejora del comportamiento a fatiga.

En la Tabla 1 vemos las consecuencias que tienen los efectos provocados por los tratamientos de shot peening en la nucleación y propagación de la grieta de fatiga.

	Nucleación grieta	Propagación grieta
Rugosidad superficial	Acelera	Sin efecto
Endurecimiento por deformación en frío	Retarda	Sin efecto claro
Tensiones residuales de compresión	Efecto pequeño	Retarda

Tabla 1. Consecuencias del tratamiento de shot peening

2.4.1 Rugosidad:

El acabado superficial inducido depende principalmente de la intensidad Almen del tratamiento, de la dureza del material y de la cobertura. Un tratamiento a mayor intensidad, con proyectiles más grandes, provoca una mayor rugosidad. Un material más blando sufre una mayor deformación superficial que un material más duro bajo unas condiciones de tratamiento idénticas.

El inconveniente principal es la posibilidad de creación de un daño superficial cuando se aplica un tratamiento de shot peening excesivo. Hay que tener cuidado con la intensidad del tratamiento, el nivel de cobertura y demás parámetros para no provocar un daño superficial que repercuta en una reducción de la vida a fatiga.

2.4.2 Endurecimiento superficial:

El tratamiento de shot peening además de generar tensiones residuales de compresión, crea una capa plastificada endurecida por deformación en frío. Este endurecimiento se debe al aumento de la densidad de dislocaciones.

El máximo grado de deformación plástica tiene lugar en la superficie de la pieza. Se alcanza la mayor dureza en la superficie y ésta decrece a medida que se profundiza hacia el interior de la pieza. Así, para analizar la profundidad de la zona plastificada y el endurecimiento inducido, resulta útil medir la variación de la microdureza desde la superficie hacia el interior del material, hasta alcanzar una profundidad donde la dureza tiene el valor inicial del material sin tratar (región no afectada).

El endurecimiento superficial inducido y la capa plastificada tendrán un espesor determinado, que depende de la dureza del material de partida, de la intensidad Almen del tratamiento aplicado y del tamaño y dureza de los proyectiles.

Manteniendo constantes todos los demás parámetros del proceso, el espesor de la capa endurecida será tanto mayor cuanto más blando sea el material tratado. Al aplicar una mayor intensidad Almen, la capa endurecida tendrá una mayor profundidad.

A igualdad de condiciones, los proyectiles de mayor tamaño crean capas endurecidas de mayor profundidad. Este efecto es más acusado a medida que aumenta la dureza de los proyectiles.

2.4.3 Tensiones residuales:

Las tensiones residuales juegan un papel fundamental en la vida a fatiga de los materiales tanto positiva como negativamente. Las tensiones residuales de compresión son beneficiosas dado que dificultan la apertura de las grietas, retrasando y bloqueando el crecimiento de las grietas de fatiga, lo que contribuye a aumentar significativamente la vida a fatiga.

El gráfico 3 muestra un perfil de tensiones residuales de compresión típico de un tratamiento de shot peening. Se pueden distinguir tres puntos relevantes: la tensión desarrollada en la superficie, la tensión máxima y la profundidad comprimida (punto de paso a tensiones de tracción). La tensión máxima ocurre siempre a una cierta profundidad, normalmente a unas pocas centésimas de milímetro de la superficie tratada.

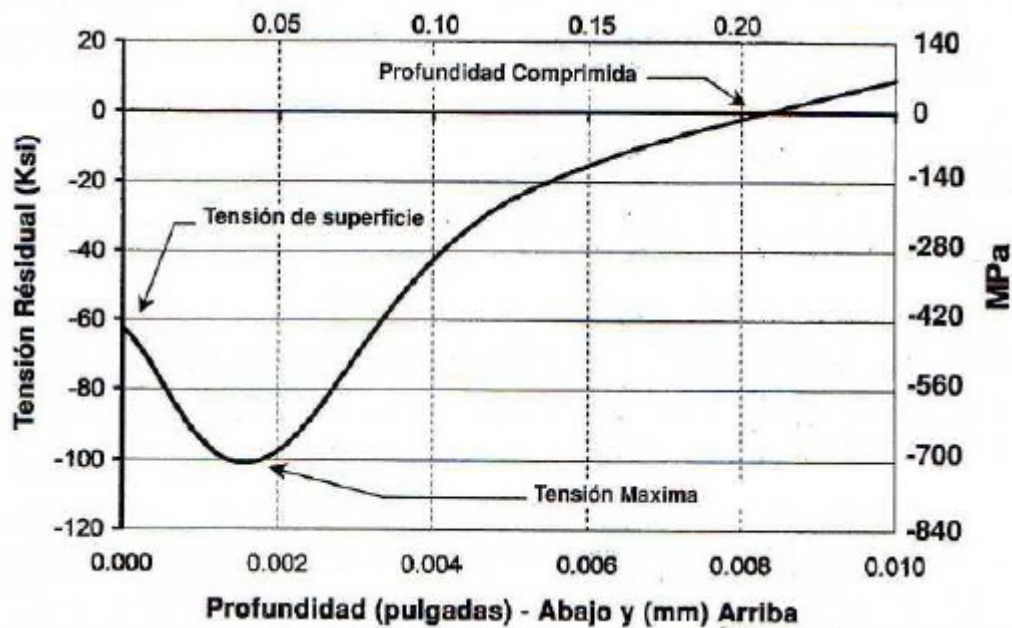


Gráfico 3. Evolución de la tensión residual generada en shot peening con la profundidad.

La tensión máxima es el valor máximo de la tensión residual de compresión creada por el tratamiento. Cuanto mayor es esta tensión y mayor es la profundidad de la región sometida a compresión, mayor es la resistencia que se opone al crecimiento de las grietas por fatiga. El valor de la tensión máxima y la profundidad de la misma dependen del material, ya que la tensión máxima corresponde a una cierta fracción del límite elástico del material, y también depende de la dureza de los proyectiles, aumentando su valor cuanto mayor es la dureza de estos.

La profundidad de la capa comprimida indica el espesor de la zona sometida a tensiones residuales de compresión, ya que en el interior existen tensiones de tracción que equilibran a las primeras. En general, la profundidad aumenta al aumentar la intensidad del tratamiento, siendo también mayor en los materiales más blandos.

El tamaño de la zona sometida a tensiones de compresión se incrementa al hacerlo la intensidad Almen aplicada. En el caso de intensidades excesivas, termina reduciéndose la tensión de compresión superficial a causa de fenómenos de relajación.

2.4.4 Comportamiento a fatiga:

La fatiga de materiales se refiere al fenómeno por el cual se produce la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas que presentan cargas máximas inferiores a las cargas estáticas que producirían la plastificación del material (límite elástico).

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil incluso en metales dúctiles, debido a que no hay apenas deformación plástica apreciable asociada a la misma. El proceso de rotura consiste en la nucleación de una fisura y posterior propagación de la misma hasta la rotura final de la pieza o componente.

La rotura por fatiga depende básicamente de la amplitud de la tensión aplicada. No obstante, hay una serie de factores adicionales que determinan la vida a fatiga de los componentes. Estos factores son, entre otros, el diseño geométrico del componente y los tratamientos superficiales.

El diseño tiene una influencia relevante ya que cualquier discontinuidad geométrica actúa como concentrador de tensiones, donde se inicia la grieta de fatiga. Por otro lado, los tratamientos superficiales generan un endurecimiento de la superficie del producto que permite incrementar la vida a fatiga.

Tal y como ya se ha indicado, el proceso de shot peening modifica la superficie de la pieza tratada e induce tensiones residuales de compresión que cierran las grietas y dificultan su propagación. También consigue un endurecimiento superficial que mejora el comportamiento a fatiga.

2.5 Decarburación de los aceros:

El fenómeno de la decarburación de los aceros consiste en la pérdida de parte del carbono de su superficie debido a su interacción con una atmósfera gaseosa a alta temperatura. Este fenómeno se produce en las zonas más próximas a la superficie de la pieza, lo que provoca una disminución de sus propiedades mecánicas.

El grado de decarburación es función de:

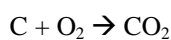
- La temperatura.
- El tiempo de permanencia a temperatura elevada
- La composición química del acero.
- La composición química de fase gaseosa con la que reacciona.

Para cada acero, el coeficiente de difusión del carbono en la red del acero, D , en función de la temperatura sigue una ley similar a la de Arrhenius:

$$D = D_0 \cdot \exp(-Q/RT)$$

Como se puede apreciar en la ecuación, el coeficiente de difusión del carbono en el acero aumenta exponencialmente con la temperatura, con lo que el proceso de decarburación será más acusado cuanto mayor sea ésta. Del mismo modo, la decarburación será tanto mayor cuanto mayor sea el tiempo de exposición del acero a alta temperatura.

Por otro lado, como la reacción de decarburación tiene lugar entre la superficie del acero y la atmósfera gaseosa que lo rodea, el análisis termodinámico de las reacciones gas – sólido es otro punto fundamental. En ambientes con oxígeno, la reacción de decarburación es:



Por lo tanto, el control de las reacciones de decarburación depende tanto del potencial de carbono en la fase gaseosa, es decir, por la actividad del carbono en la atmósfera, como del contenido de carbono del

acero base. Para una misma atmósfera, la decarburación será tanto más acusada cuanto mayor sea el contenido de carbono del acero base.

En la práctica industrial, con objeto de evitar los fenómenos de decarburación, se deben emplear atmósferas adecuadas, en función de las necesidades en cada momento y también se deben evitar calentamientos excesivos y tiempos prolongados más de lo necesario.

3. Procedimiento experimental y equipos utilizados

El acero utilizado en la fabricación de los ejes tiene la composición que se muestra en la Tabla 2. En dicha tabla también se muestra los valores de la dureza del acero representativos de su curva Jominy.

COMPOSICION QUIMICA											
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Al	B
0.30	1.40	0.15	-	0.020	-	-	-	-	0.015	0.020	0.001
0.35	1.60	0.50	0.020	0.035	0.30	-	-	0.20	0.040	0.080	0.004
BANDA DE TEMPLABILIDAD (JOMINY)			DISTANCIAS AL EXTREMO TEMPLADO EN MM.								
			5	10	15	20	25	30	35	40	
DUREZAS RC.	MINIMA		52	48	42	38	32	31	30	28	
	MAXIMA		60	58	55	52	48	45	44	42	

Tabla 2. Composición química y valores de la curva Jominy del acero

Todo el trabajo se llevó a cabo sobre varias piezas extraídas de un eje de camión forjado que fueron suministradas por la empresa colaboradora (CIE Galfor). Se cortaron 3 probetas de un tamaño manejable para la realización de los tratamientos.

3.1 Tratamiento térmico a 1200°C:

Dos de estas piezas fueron tratadas a 1200°C, una de ellas estuvo a esta temperatura durante 1 hora y la otra durante 2 horas. Un calentamiento de una hora podría ser un tiempo de calentamiento industrial relativamente normal, mientras que dos horas se considera un tratamiento excesivo, que podría dar ya lugar a una decarburación importante. A la tercera probeta no se le realizó ningún tratamiento a 1200°C con objeto de tener una referencia con la que comparar las 2 probetas tratadas térmicamente del modo indicado. El tratamiento térmico fue realizado en el horno que aparece en las Fotografías 1 y 2.



Fotografías 1 y 2. Horno

Las dos probetas tratadas se dejaron enfriar al aire, y una vez frías se cortó con la tronzadora (Fotografía 3) un trozo de cada una de las 3 probetas de tamaño adecuado para poder realizar los procedimientos posteriores.



Fotografía 3. Tronzadora

Posteriormente, los trozos cortados con la tronzadora se embutieron en la máquina de embutición automática (Fotografía 4) preparando las probetas para la realización sobre ellas de los perfiles de microdurezas y el análisis metalográfico.



Fotografía 4. Embutidora automática

Una vez están los trozos a analizar embutidos, se pulieron con las útiles de desbaste y pulido (Fotografía 5, 6 y 7) hasta que nos quede la superficie metálica completamente lisa. Cuando se acabó con el proceso de desbaste y pulido se atacaron las probetas con nital para observar su microestructura.



Fotografías 5, 6 y 7. Útil de pulido de probetas

Sobre estas probetas se realizaron los perfiles de microdureza y el análisis metalográfico de cada una de ellas. De aquí en adelante se utilizará la siguiente nomenclatura para referenciar cada una de las probetas:

- Probeta 0: no ha sido tratada a 1200°C.
- Probeta 1: ha estado a 1200°C durante 1 hora.
- Probeta 2: ha estado a 1200°C durante 2 horas.

El equipo utilizado para realizar los perfiles de durezas de todas las probetas embutidas ha sido el microdurómetro (Fotografía 8)

Se ha utilizado el método de dureza Vickers que emplea un penetrador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada. La dureza Vickers, HV, se define como la relación entre la carga aplicada (expresada en kgf) y el área de la superficie lateral de la impresión (en mm), que se obtiene a partir del valor medio de la medida de las dos diagonales. La carga utilizada fue de 200 gramos.



Fotografía 8. Microdurómetro

Por otra parte el análisis metalográfico de las probetas, que nos permite apreciar de forma visual la decarburación superficial de las mismas se ha realizado con un microscopio óptico Nikon (Fotografía 9).



Fotografía 9. Microscopio óptico

3.2 Tratamiento de temple y revenido:

Posteriormente se realizó el tratamiento de temple y revenido a las 3 probetas. Se calentaron hasta 850°C durante 1 hora para asegurar la austenización de toda la pieza. El temple se realizó en agua. El revenido se hizo a la temperatura de 540°C durante 1 hora.

3.3 Tratamiento de shot peening:

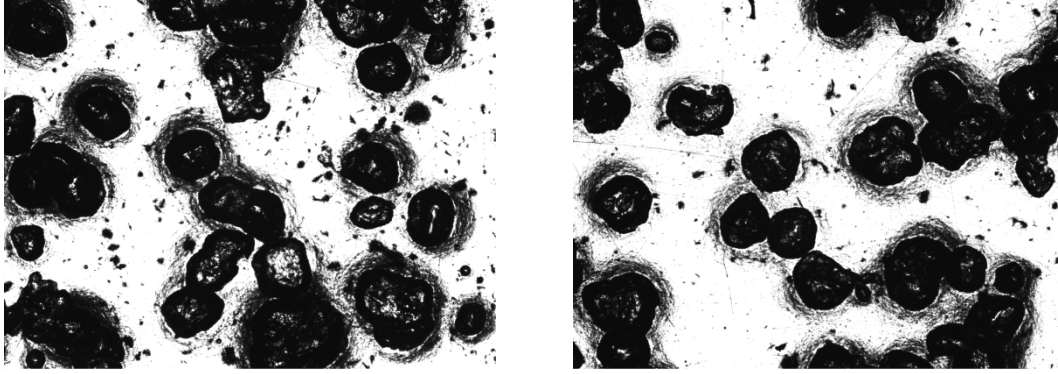
Después de realizar el estudio descrito en los apartados anteriores de cómo afecta la decarburación de las probetas a la microestructura y dureza superficial, se mecanizaron probetas para la realización del tratamiento de shot peening. Estas probetas se prepararon igual que las utilizadas para el análisis metalográfico para tener la superficie más lisa posible (se desbastaron y pulieron con los útiles de desbaste y pulido que aparecen en las Fotografías 5, 6 y 7) y que las tensiones residuales que hubiese sobre la misma fuesen solamente consecuencia del tratamiento de shot peening.

El tratamiento de shot peening se realizó con el equipo que aparece en la Fotografía 10. Se trata de una máquina neumática de presión directa de aire.



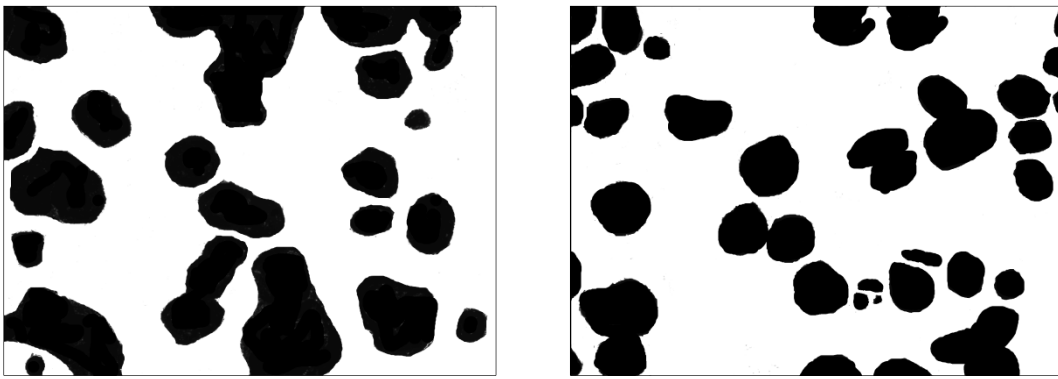
Fotografía 10. Equipo de tratamiento de shot peening

La intensidad del tratamiento fue de 21A y la cobertura del 100%. Se realizó un ensayo previo para determinar el tiempo necesario para alcanzar cobertura del 100%. Se ensayó una de las probetas durante un tiempo pequeño ≈ 5 segundos quedando la superficie como se aprecia en las Fotografías 11 y 12.



Fotografías 11 y 12. Probeta usada para determinar el tiempo del tratamiento

Mediante un programa de edición de imágenes se diferenciaron con colores las zonas que habían sido golpeadas por las bolas (negro) y las zonas que no habían sido alcanzadas por las mismas (blanco). Las Fotografías 13 y 14 son el resultado del tratamiento con el programa



Fotografías 13 y 14. Imágenes tratadas con el programa de edición

Se tomaron 5 imágenes de la probeta, con las que se sacó un valor medio de la cobertura, que fue del 38%. Conocido el valor de la cobertura y el tiempo de exposición se determinó mediante el uso de la curva de Avrami para la intensidad 21A que el tiempo necesario para alcanzar una cobertura del 100% era de 28 segundos.

Se realizó el tratamiento de shot peening en las probetas con los siguientes parámetros:

- Cobertura 100%
- Intensidad 21A
- Tiempo de exposición 28 segundos.

3.4 Tensiones de compresión medidas en el difractómetro:

En esta última parte del trabajo se determinaron los perfiles de tensiones residuales de compresión que tenían las probetas sometidas a los distintos tratamientos térmicos previos, tras los tratamientos de shot peening practicados. Se graficaron las tensiones residuales en función de la profundidad medida desde la superficie hasta que las tensiones citadas pasaban a ser tensiones de tracción.

3.4.1 Medida de las tensiones residuales:

Para medir las tensiones residuales provocadas por el tratamiento de shot peening se ha utilizado la técnica de difracción de rayos X.

El equipo empleado para la experimentación realizada es el difractor de rayos X de la marca Stresstech XSTRESS 3000 G3, que se muestra en la Fotografía 15. Debido a la emisión de rayos X hay que trabajar con el equipo en condiciones de seguridad de manera que, es aconsejable estar lo más separado posible del aparato mientras está en funcionamiento. Por otro lado, hay que señalar que el equipo se complementa con un software asociado cuyo sencillo interfaz permite al usuario trabajar fácilmente con el dispositivo.



Fotografía 15. Difractor

En las medidas realizadas en el presente estudio se utilizó un colimador de 2 mm de diámetro por ser el más funcional, ya que se adapta perfectamente a las medidas requeridas.

La medida de las tensiones residuales se ha realizado siempre sobre el mismo punto de la probeta que se ha marcado previamente con un rotulador permanente tras cada operación de electropulido. Se ha determinado siempre la tensión residual en tres direcciones en el plano de la probeta, identificadas como -45, 0 y +45°.

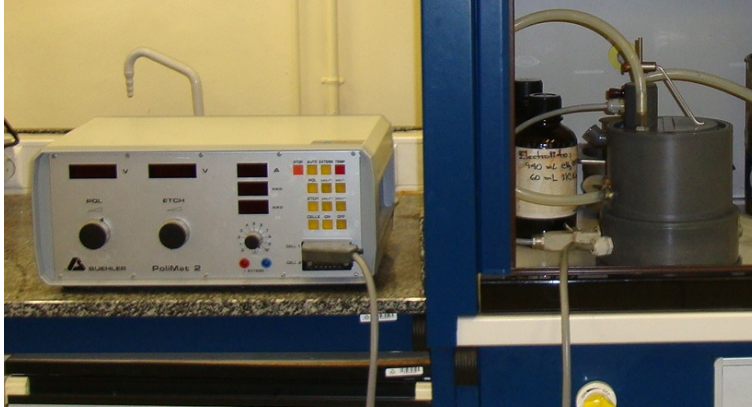
La determinación de la tensión residual se basa en la ley de Bragg:

$$\lambda = 2d \sin\theta$$

Siendo λ la longitud de onda de la radiación X (en este caso se utilizó la línea $K\alpha$ del cromo, $\lambda = 0,22897$ nm), d la distancia interplanar objeto de la medida y θ el ángulo de difracción. Las medidas realizadas se han llevado a cabo siempre sobre la familia de planos (211) de la ferrita, a través de la “técnica $\sin^2 \psi$ ”. Para el paso de la medida de la deformación (variación de la distancia interplanar) a tensión se utilizó la constante elástica de la familia de planos (211), $E/(1+\nu) = 168.900$ MPa.

En esta parte del trabajo se usaron dos equipos, el difractor y la máquina de electropulido (Fotografía 16). El procedimiento consistía en medir las tensiones en superficie y posteriormente se sometía la probeta a electropulido para eliminar un determinado espesor del material (30 – 40 μm). Se volvía a medir las tensiones a esta nueva profundidad y se volvía a electropulir, y se continuaba con este

procedimiento hasta llegar a la profundidad deseada. En este caso se continuó (como suele ser habitual) realizando medidas hasta que las tensiones de compresión pasaron a ser de tracción.



Fotografía 16. Máquina de electropulido

La razón de utilizar el electropulido para eliminar el material y poder así medir las tensiones en profundidad, es que si la eliminación del material se realiza de forma mecánica, se inducirán en el material una serie de tensiones adicionales que no serán consecuencia del proceso de shot peening y que por tanto nos falsearían las medidas y por tanto los resultados del estudio.

4. Resultados:

4.1 Tratamiento térmico a 1200°C:

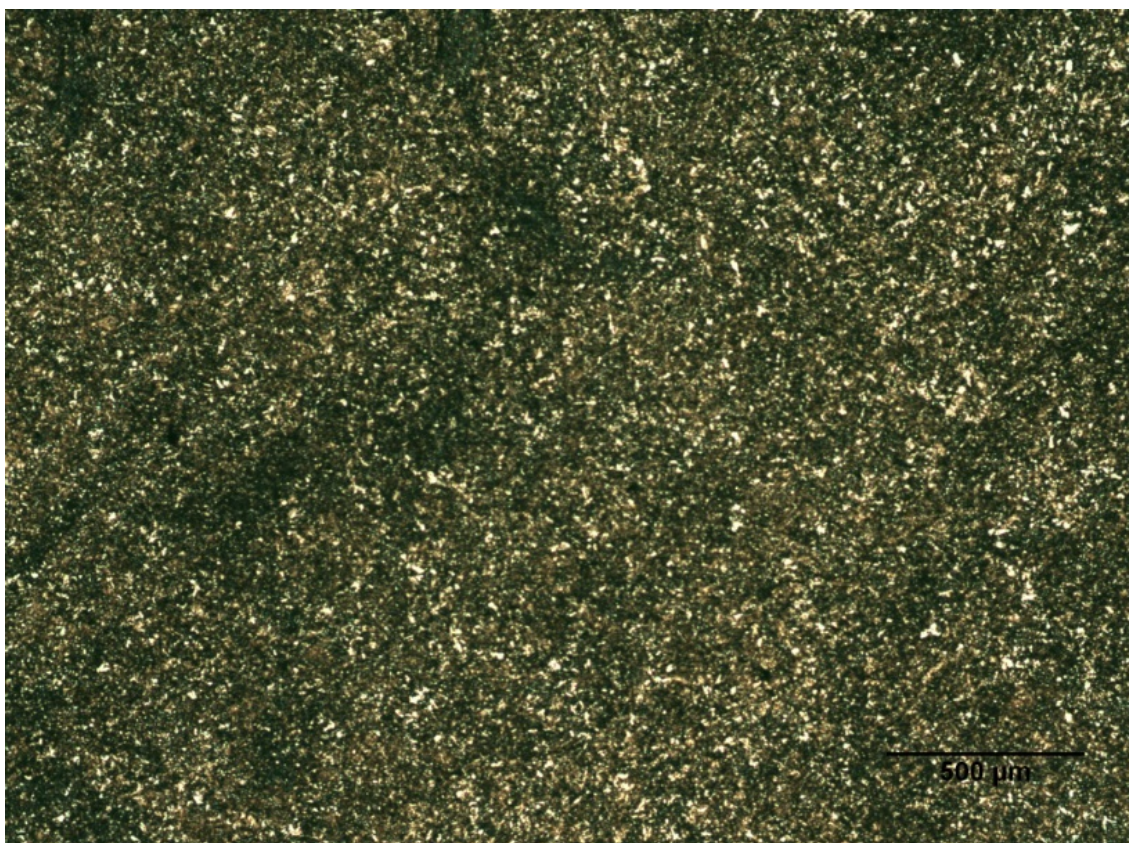
Tras el tratamiento térmico a 1200°C de las probetas 1 y 2 se comprobó que ambas presentaban decarburación superficial, con la consiguiente disminución de la dureza en las zonas decarburadas. El acero sin decarburar tenía una dureza de 305 – 310 HV. La caída de dureza y profundidad de la decarburación de ambas probetas se puede ver en la Tabla 3.

	Dureza sup. (HV)	Dist. Decarb. (mm)
Probeta 1 (1200°C/1h)	216	1,5
Probeta 2 (1200°C/2h)	193	2,25

Tabla 3. Efecto del tratamiento en la dureza de las probetas 1 y 2.

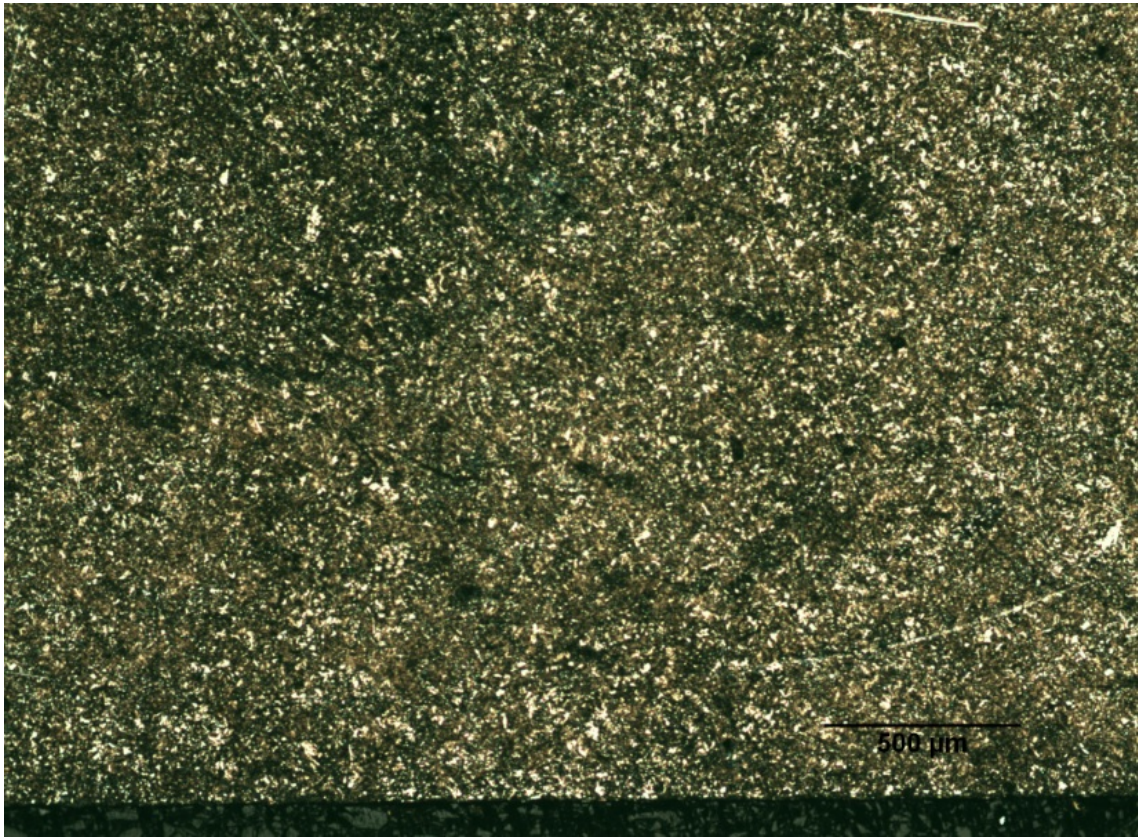
Se aprecia que el tiempo de permanencia de las probetas a 1200°C tiene influencia en la decarburación, ya que la probeta que estuvo 2 horas a esa temperatura (probeta 2) presenta una menor dureza superficial y una mayor profundidad de la zona decarburada que la probeta que estuvo 1 hora a 1200°C (probeta 1).

A continuación se realizó el análisis metalográfico de las probetas. Las micrografías 1 y 2 corresponden respectivamente a una zona interior de la probeta 0 y a una zona superficial de la misma 0, (esta probeta no había sido tratada térmicamente):

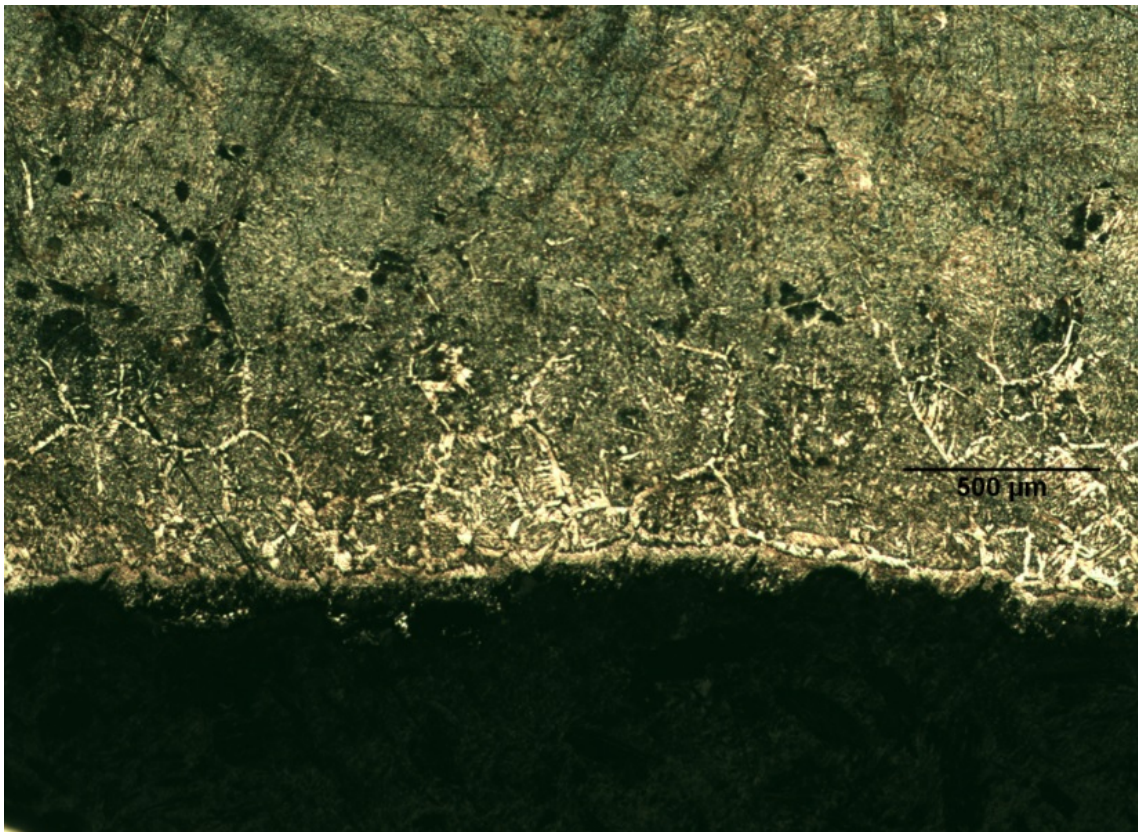


Micrografía 1. Probeta 0. Interior 50x.

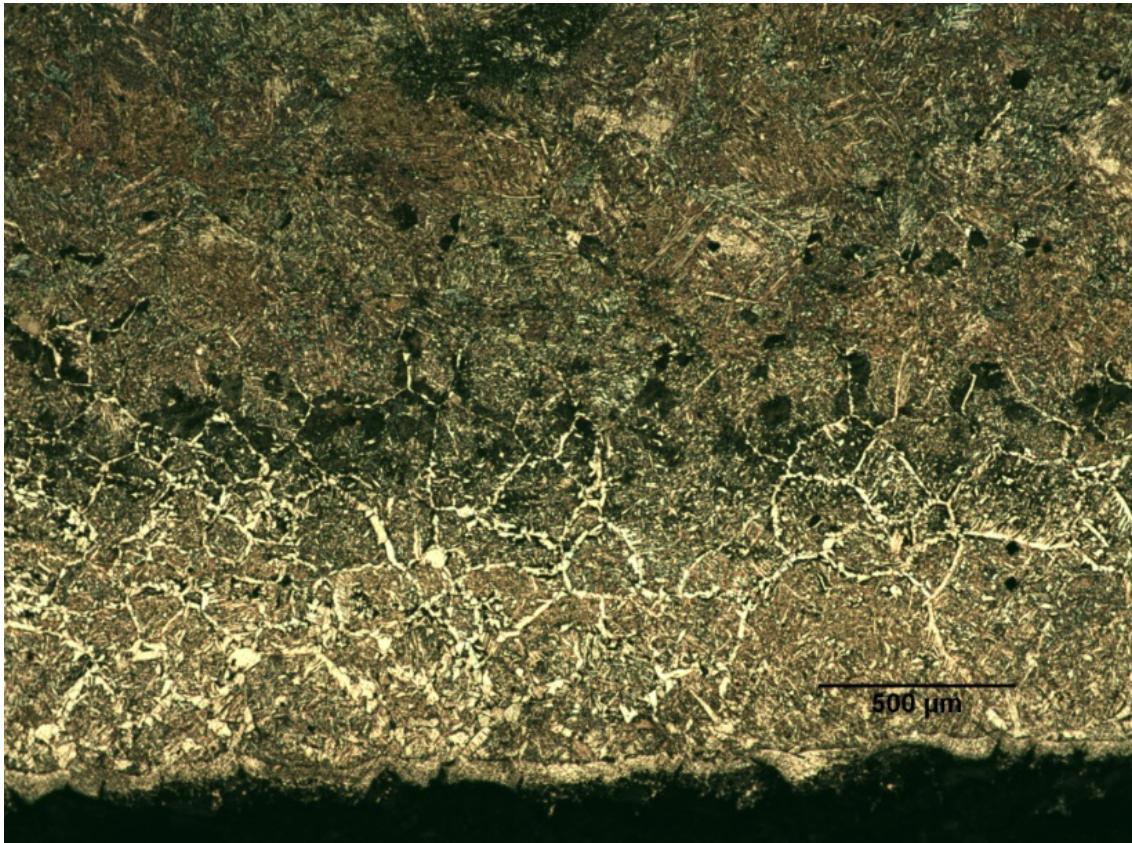
Se aprecia que tenemos una estructura ferrito-perlítica como corresponde a un acero hipoeutectoide (%C < 0,77). Los granos de color blanco que aparecen en las micrografías corresponden a ferrita proeutectoide mientras que el constituyente oscuro es la perlita formada en la reacción eutectoide. Las siguientes micrografías (micrografías 2 ,3 y 4) son superficiales de las 3 probetas.



Micrografia 2. Probeta 0. Superficie 50x.



Micrografia 3. Probeta 1. Superficie 50x.



Micrografía 4. Probeta 2. Superficie 50x.

Se puede apreciar la evolución de la superficie de estas probetas desde la probeta 0, en la que no se aprecia decarburación, pasando por la probeta 1 (1 hora a 1200°C, hasta llegar a la probeta 2 (2 horas a 1200°C), donde la decarburación es apreciablemente más profunda.

Se ha conseguido entonces el efecto buscado, tres probetas de un mismo acero, una sin decarburación apreciable y las otras dos con dos grados diferentes de decarburación. La permanencia del acero a 1200°C en contacto con aire (atmósfera oxidante) provoca que parte del carbono presente salga del acero hacia la atmósfera, con lo que la superficie de la pieza de acero se enriquece progresivamente en ferrita. Como se ha comprobado antes con los perfiles de dureza, la consecuencia de esto es una caída de la dureza superficial en las probetas tratadas térmicamente, debido a que la ferrita es mucho más blanda que la perlita.

4.2 Tratamiento de temple y revenido :

Las tres probetas utilizadas en ese trabajo fueron posteriormente sometidas a un tratamiento de temple y revenido, ya que es este el tratamiento que sufre el eje de camión que ha sido objeto de estudio en este trabajo. Una vez se realizó el tratamiento se realizaron perfiles de microdurezas. El gráfico 2 muestra de manera conjunta el perfil de dureza de las tres probetas.

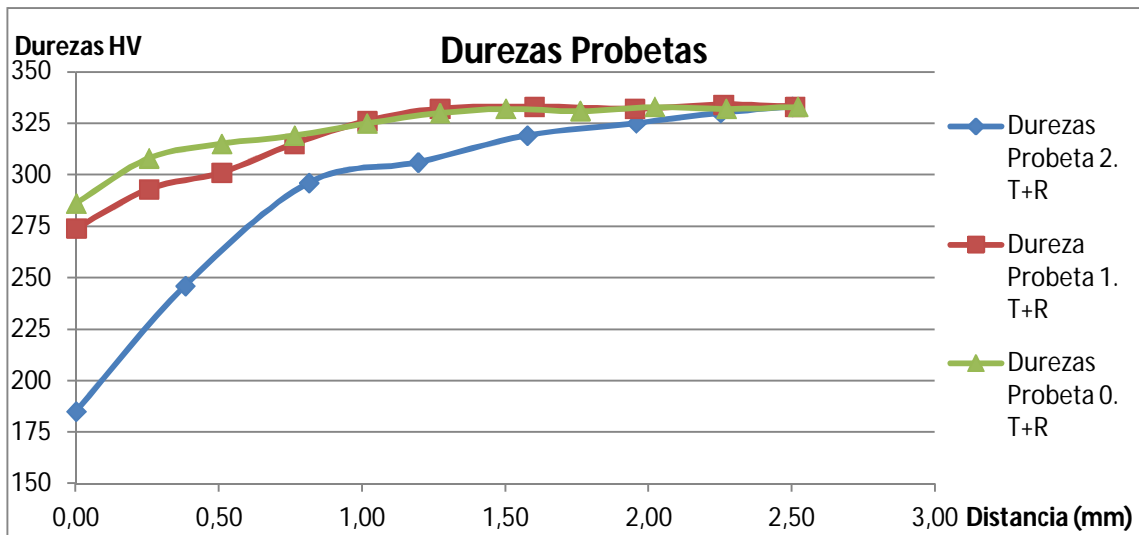
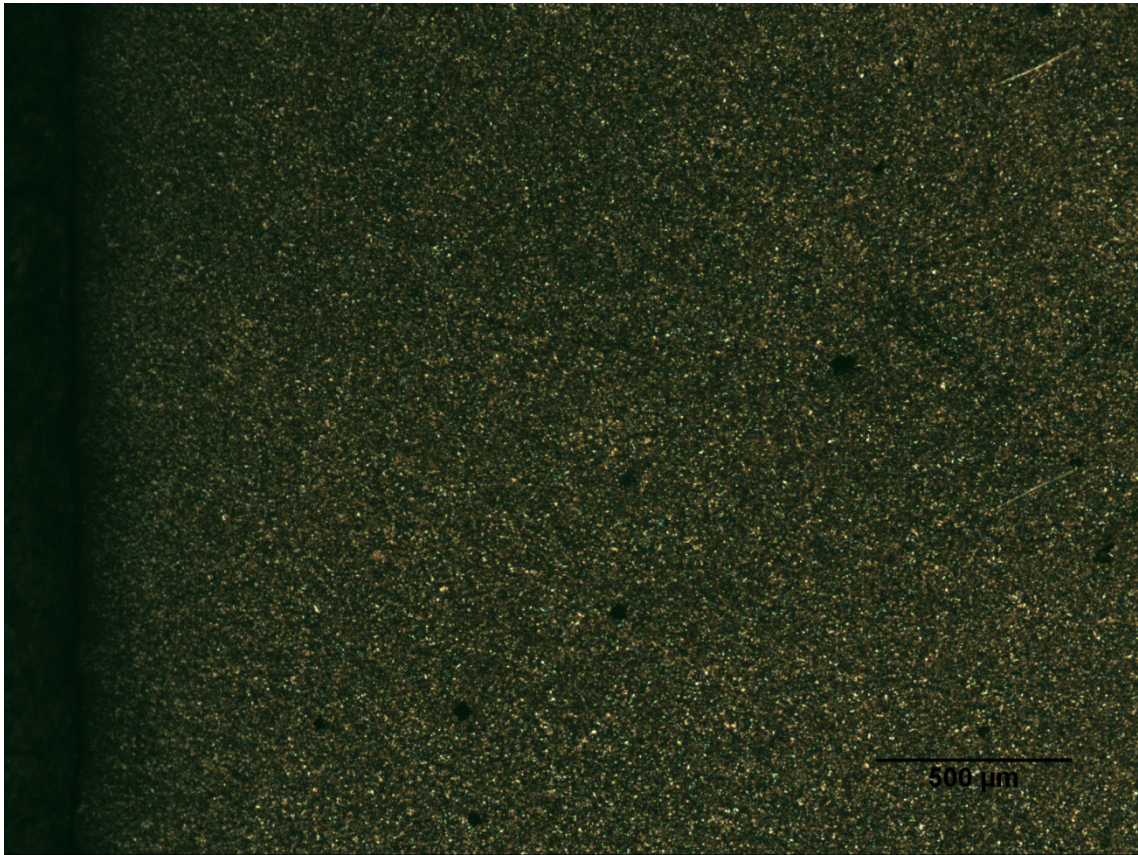


Gráfico 4. Perfil de durezas las 3 probetas.

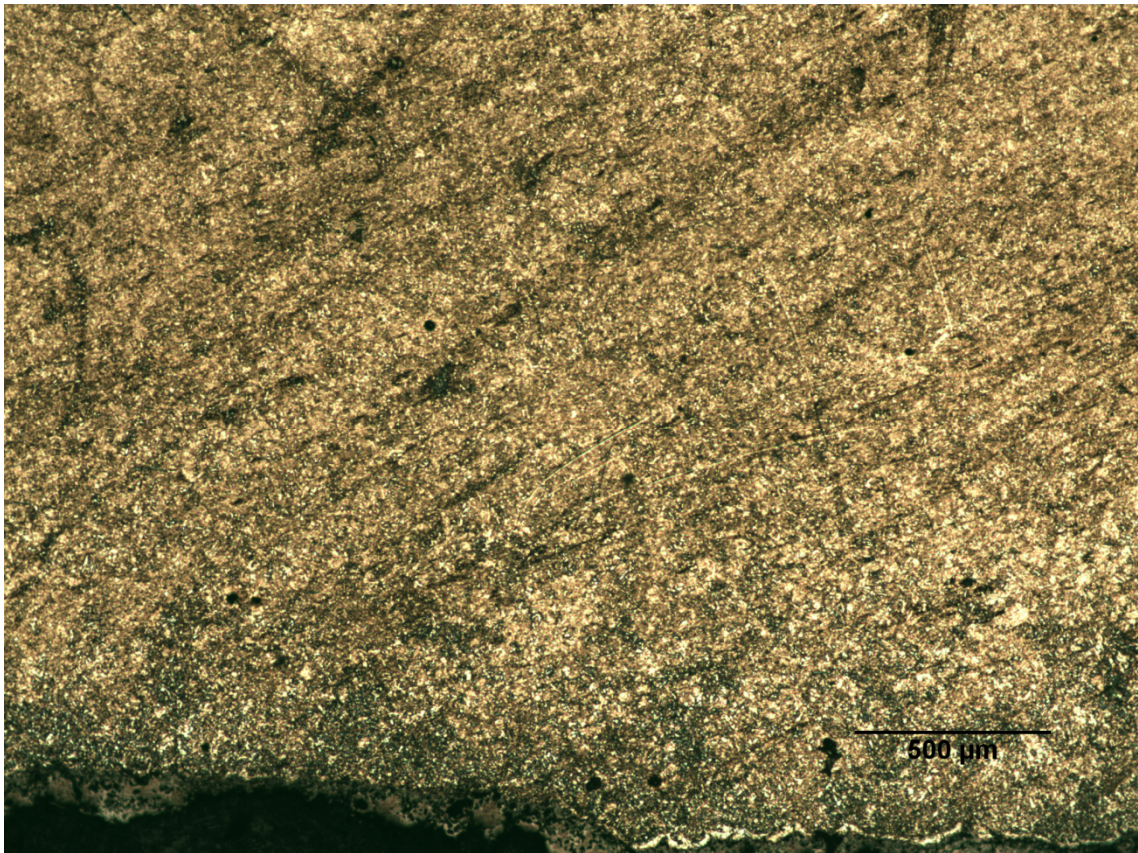
Si se comparan las 3 curvas se puede apreciar claramente el efecto de la decarburación inducida en el tratamiento anterior. Tomando como base la dureza del acero tras el tratamiento de temple y revenido que se observa en la región interna de las tres probetas (en torno a 330 HV), se aprecia nítidamente un cierto descenso de la dureza en la región más superficial, que es tanto más significativo cuanto mayor ha sido la decarburación practicada previamente. La probeta 0 muestra una pequeña decarburación que sin duda tuvo lugar en el tratamiento de temple, pero la caída de dureza es más acentuada en la probeta 1 y especialmente intensa en la probeta 2. Nótese también que la profundidad afectada por la disminución de la dureza es similar a la distancia decarburada que se había medido anteriormente (1,5 y 2,25 mm, respectivamente en las probeta 1 y 2, véase la Tabla 2).

Se hace notar el fuerte descenso de la dureza superficial de la probeta que ha sufrido la mayor decarburación (probeta 2), en la que se ha medido una dureza en la región más próxima a la superficie ligeramente por encima de 180 HV, que es inferior a la dureza de la cero en su estado original de estructura ferrito-perlítica.

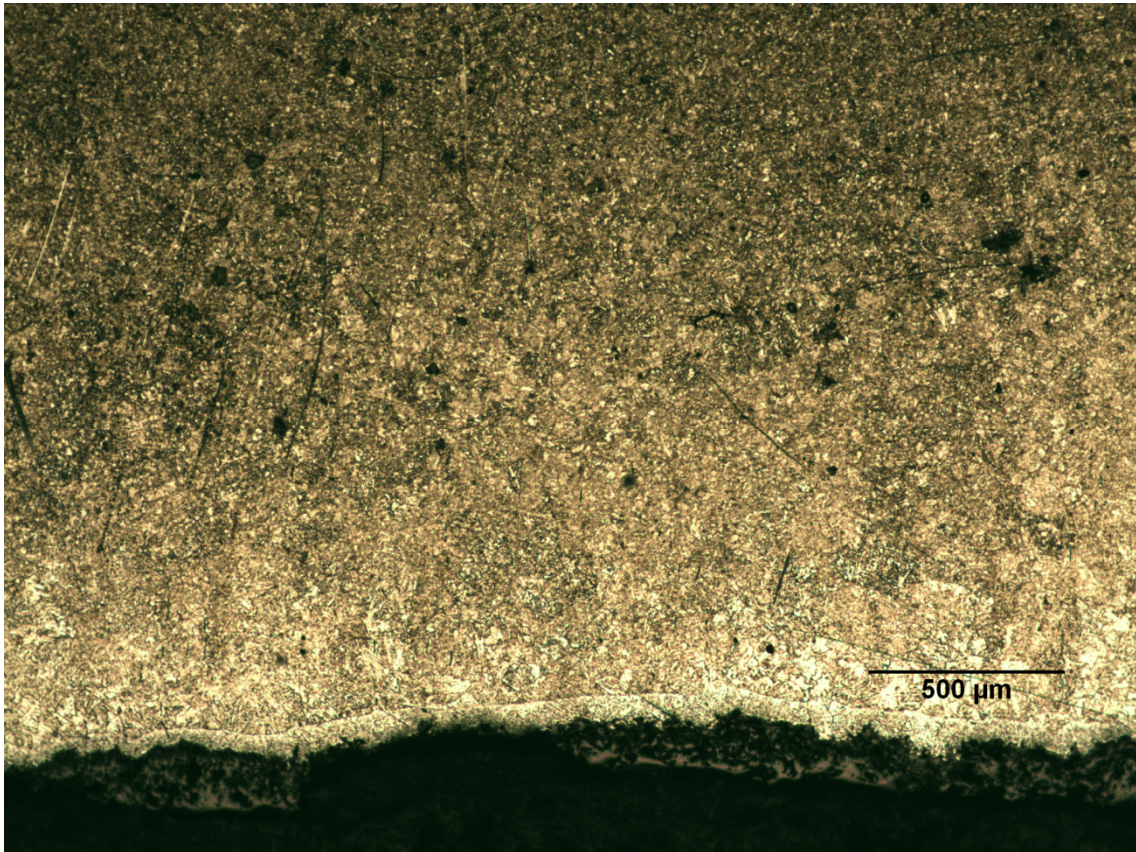
A continuación se muestran las micrografías (micrografías 5, 6 y 7) de la superficie de estas tres probetas tras el tratamiento de temple y revenido:



Micrografía 5. Probeta 0 superficial. 50x



Micrografía 6. Probeta 1 superficial. 50x



Micrografía 7. Probeta 2 superficial. 50x

La decarburación se pone de manifiesto tras el temple y el revenido por una menor respuesta ataque metalográfico, región más clara.

4.3 Tensiones de compresión medidas en el difractómetro:

Los perfiles de tensiones residuales de compresión se muestran en las figuras siguientes. En los gráficos 5, 6 y 7 se pueden observar los perfiles obtenidos en las 3 direcciones en las que fueron medidos, -45° , 0° y $+45^{\circ}$, mientras que en los gráficos 8, 9 y 10 aparecen comparados los perfiles de tensiones para cada dirección de las 3 probetas y en los gráficos 11, 12 y 13 se aprecian los perfiles correspondientes a las tensiones principales.

Los perfiles obtenidos se pueden considerar independientes de la dirección de medida, ya que las diferencias mostradas son siempre menores de 50 MPa, correspondiendo este valor a la incertidumbre asociada a estas medidas.

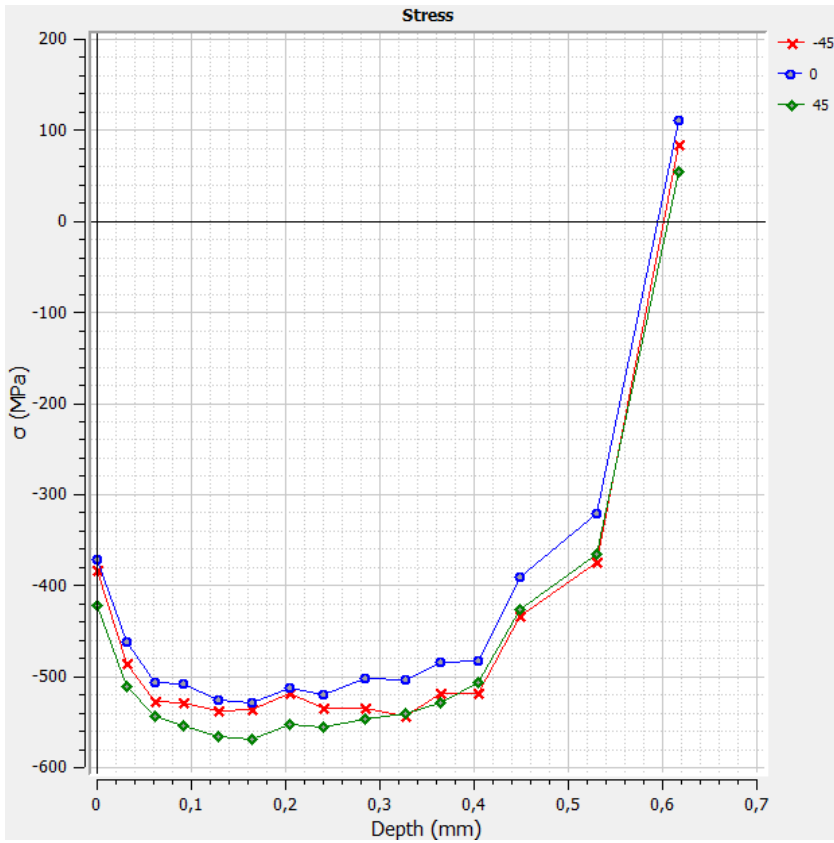


Gráfico 5. Perfil de tensiones en las direcciones -45° , 0° y 45° tras shot peening. Probeta 0

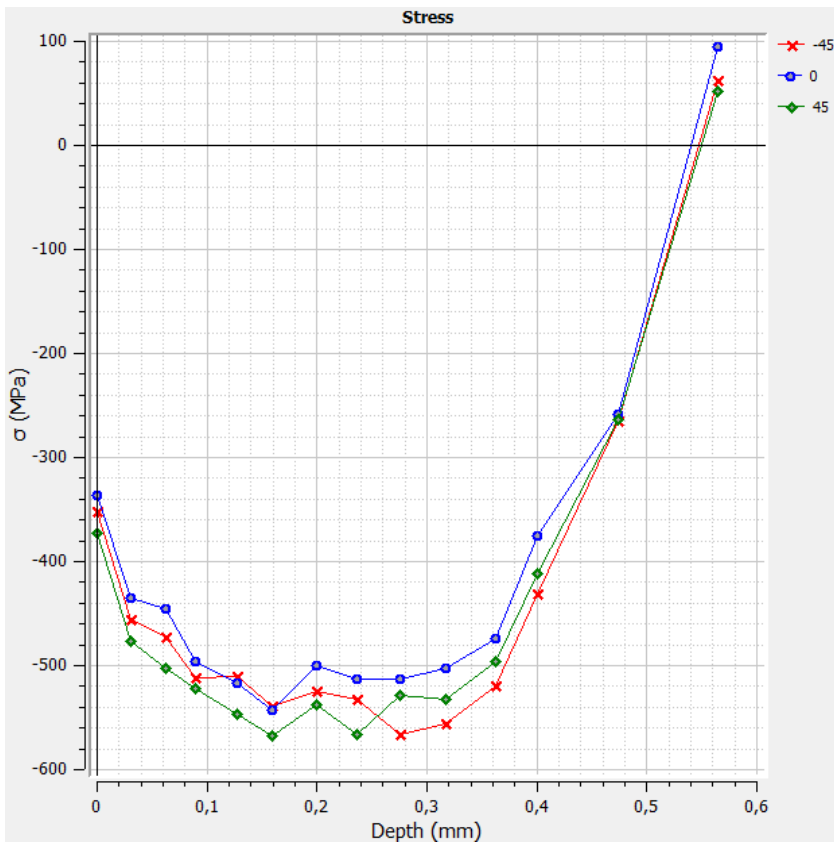


Gráfico 6. Perfil de tensiones en las direcciones -45° , 0° y 45° tras shot peening. Probeta 1

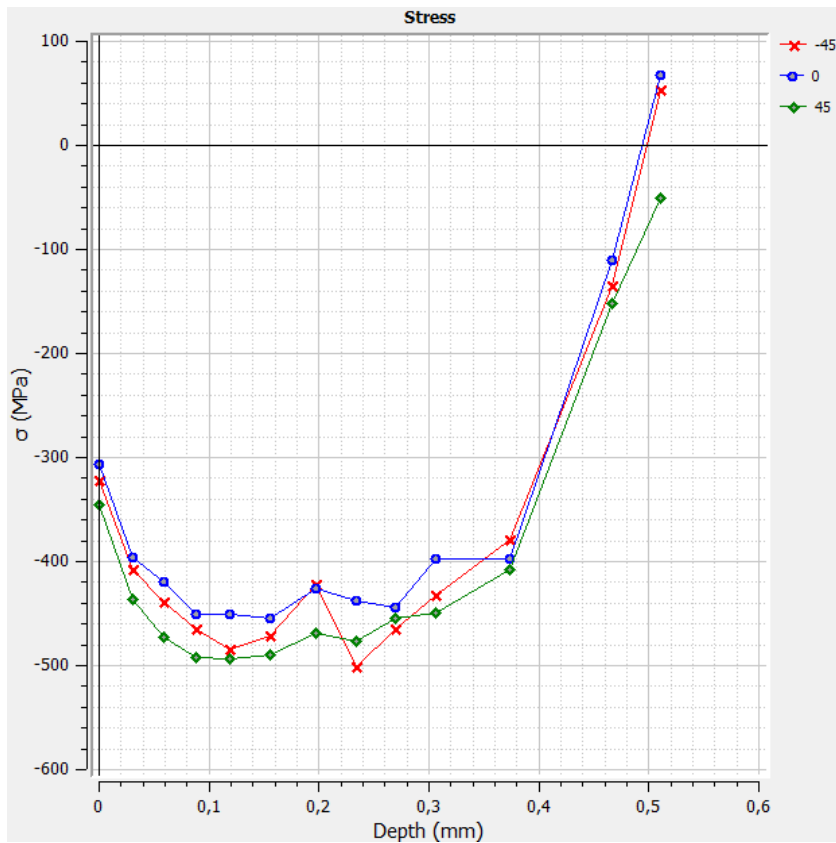


Gráfico 7. Perfil de tensiones en las direcciones -45°, 0° y 45° tras shot peening. Probeta 2

A continuación, en los gráficos 8, 9 y 10 se observan respectivamente los perfiles comparados de tensiones medidas en las tres probetas para las direcciones de -45°, 0°, y 45°. Se ponen claramente de manifiesto diferencias significativas en los niveles de la tensión residual alcanzada y en la profundidad afectada.

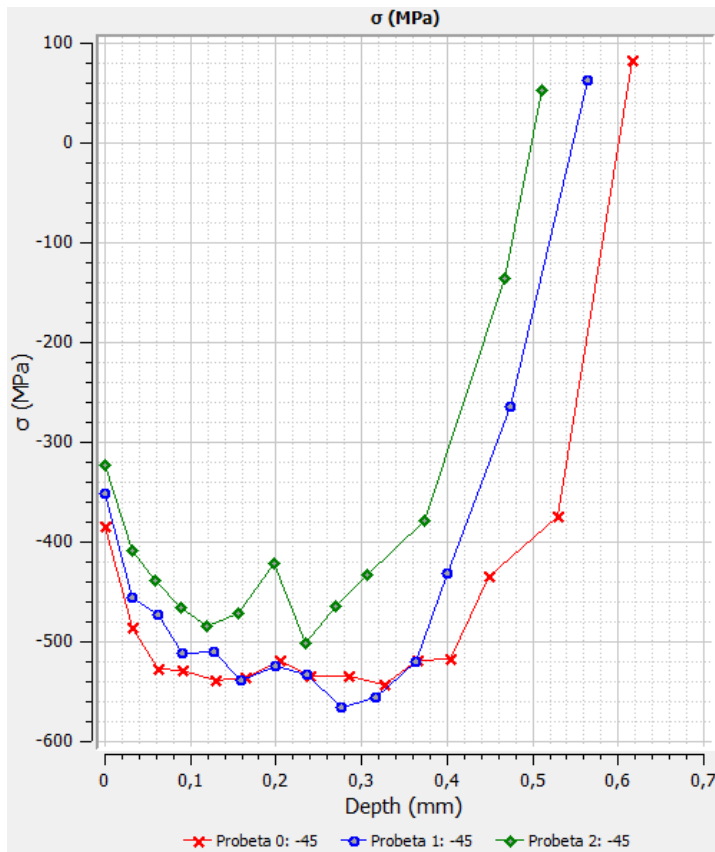


Gráfico 8. Perfil de tensiones en la dirección -45° tras shot peening para las 3 probetas

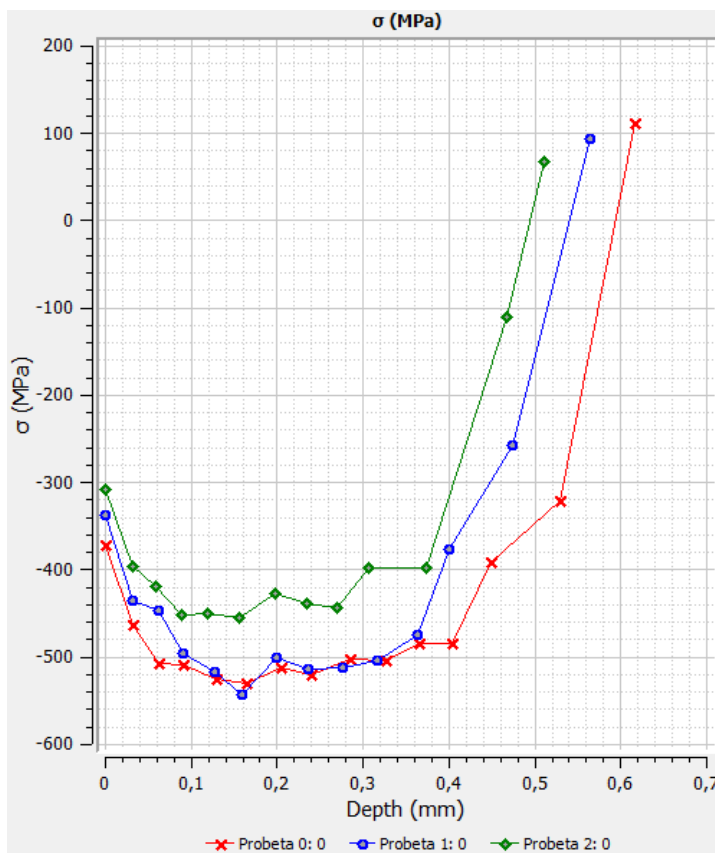


Gráfico 9. Perfil de tensiones en la dirección 0° tras shot peening para las 3 probetas

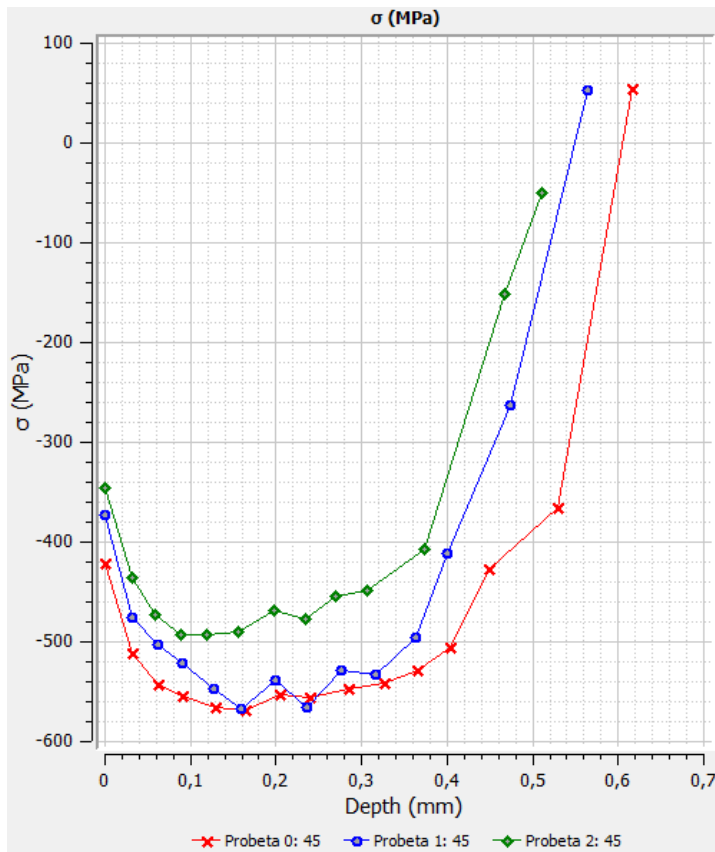


Gráfico 10. Perfil de tensiones en la dirección 45° tras shot peening para las 3 probetas

Finalmente en los gráficos 11, 12 y 13 se han representado los valores de los perfiles correspondientes a las tensiones principales en el plano de la probeta, que han sido obtenidas a partir de las medidas efectuadas en las tres direcciones, -45, 0 y +45°. Los valores de las tensiones principales son, como cabía esperar, muy parecidos, por lo que puede considerarse que el estado de tensiones residuales que genera el tratamiento de shot peening es una expansión biaxial.

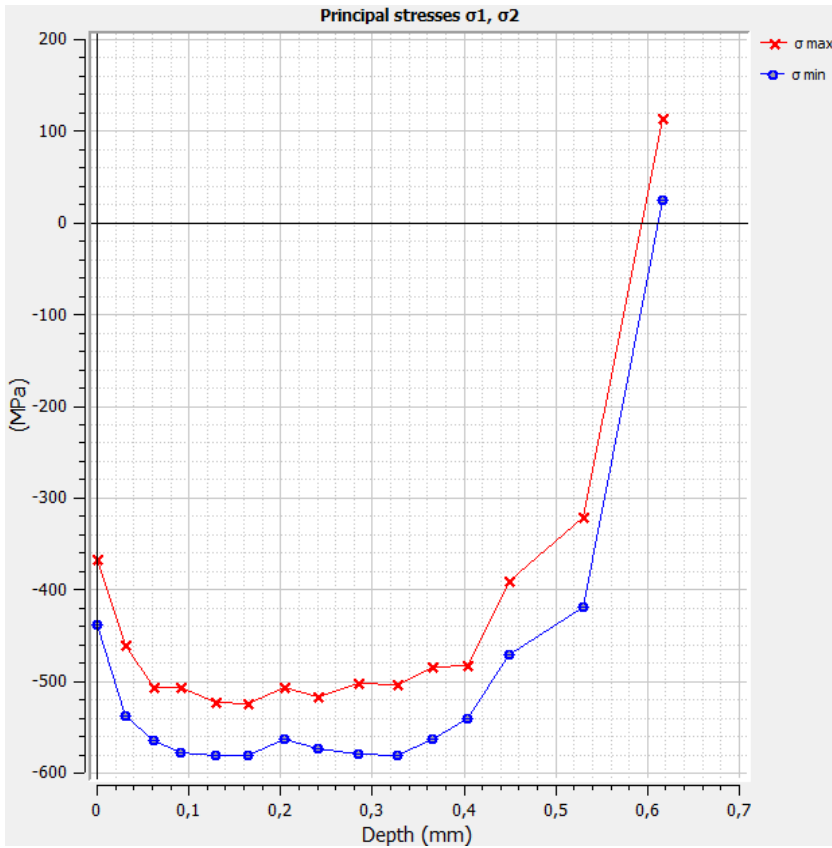


Gráfico 11. Perfil de tensiones principales tras shot peening. Probeta 0

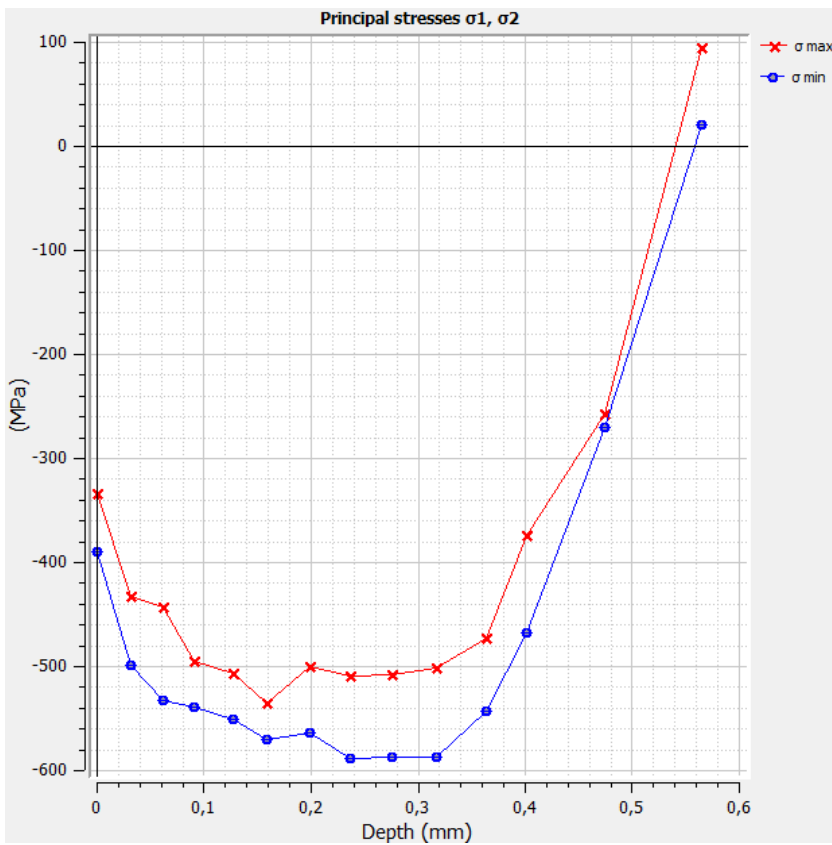


Gráfico 12. Perfil de tensiones principales tras shot peening. Probeta 1

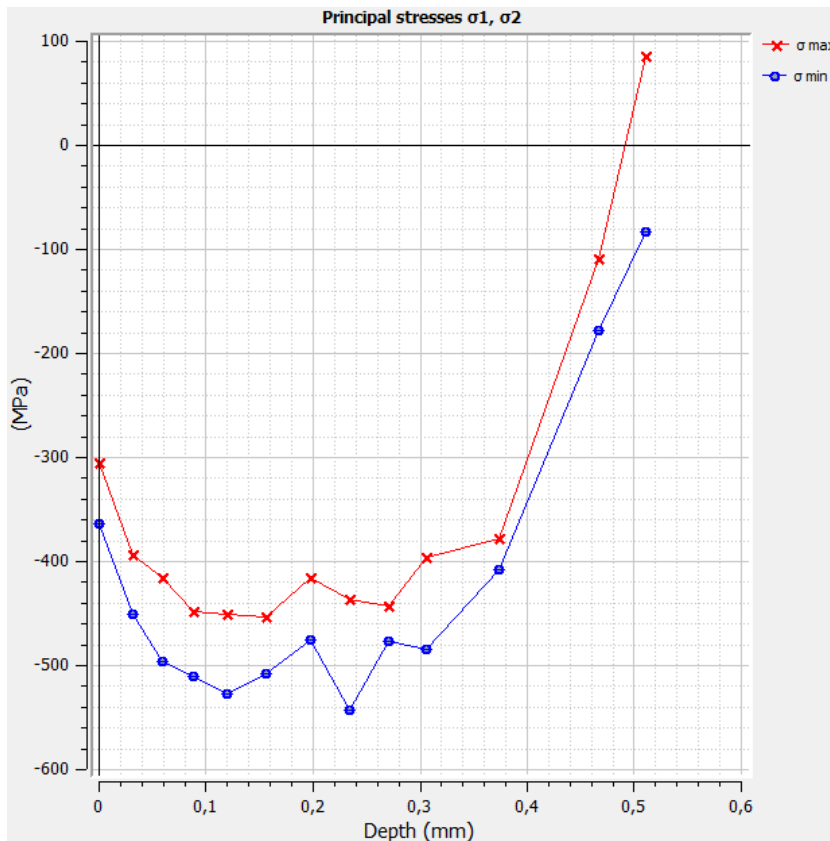


Gráfico 13. Perfil de tensiones principales tras shot peening. Probeta 2

La Tabla 4 muestra a título comparativo los parámetros característicos de los perfiles obtenidos: tensión residual superficial, tensión a una profundidad de 50 μm , tensión residual de compresión máxima, profundidad con una tensión residual mayor en valor absoluto de 400 MPa (valor arbitrario representativo de una tensión de magnitud considerable) y profundidad total de la región sometida a compresión. Para la determinación de todos estos valores hemos tomado la media de la tensión determinada a $-45, 0$ y 45° .

	Probeta 0	Probeta 1	Probeta 2
Tensión superficial (MPa)	-400	-350	-325
Tensión a una profundidad de 50 μm (MPa)	-525	-460	-440
Tensión de compresión máxima (MPa)	-550	-550	-475
Profundidad con TR > -400 MPa	0,45	0,4	0,35
Profundidad comprimida (mm)	0,6	0,55	0,5

Tabla 4. Resumen tensiones-profundidad tras el shot peening.

Como se aprecia tanto en los gráficos 8, 9, y 10 y en la tabla 4, la decarburación provocada por la permanencia a 1200°C afecta de forma negativa al resultado del tratamiento de shot peening. Tomando como referencia la probeta 0, que fue la que no se trató térmicamente, por lo que sería la probeta representativa de este acero en ausencia de decarburación, se pone de manifiesto:

- Probeta 1 (decarburation ligera): disminuye ligeramente la tensión residual superficial, sin apenas modificarse la tensión residual máxima a compresión. Sin embargo, disminuye también tanto la profundidad a la que existen unas tensiones de compresión de magnitud considerable, como la región que finalmente ha quedado bajo tensiones residuales de compresión.
- Probeta 2 (decarburation excesiva): en esta probeta se ha detectado una disminución ya más significativa de la tensión residual superficial y también de la tensión residual máxima y asimismo disminuye la profundidad sometida a tensiones de compresión importantes y la de la región sometida a tensiones de compresión.

A la vista de estos resultados, cabe concluir que el tratamiento de shot peening será menos efectivo en las piezas decarburadas, ya que el cierre de las grietas de fatiga promovido por la acción de las tensiones residuales de compresión será menos intenso (tensiones de menor valor absoluto) y además la región afectada por el efecto de cierre es también más pequeña. Por otro lado, la menor dureza superficial de la superficie decarburada, que también se había puesto de manifiesto, dará lugar a un endurecimiento superficial menor y a una mayor deformación plástica superficial en los impactos que podrían incluso llegar a inducir un daño real en la superficie del producto. Por todo ello, cabe esperar que el comportamiento a fatiga de las piezas decarburadas y posteriormente tratadas mediante shot peening sea claramente inferior al de las mismas piezas convenientemente tratadas.

4.4 Análisis de la rugosidad de las probetas sometidas a shot peening:

Finalmente se muestran los resultados de los parámetros Ra y Rmax representativos de la rugosidad medida sobre la superficie sometida a shot peening de las tres probetas (Tabla 5). El parámetro Rmax es el que normalmente se considera como más representativo de cara a estimar el factor concentrador de la tensión vinculado a la rugosidad.

Probeta 0	Ra (μm)	Rmáx (μm)
1	5,56	35,47
2	5,32	32,8
3	6,91	43,73
4	5,94	34,2
Media	5,93	36,55

Probeta 1	Ra (μm)	Rmáx (μm)
1	5,48	37,33
2	5,72	47,2
3	6,32	35,47
4	5,91	34,67
Media	5,86	38,67

Probeta 2	Ra (μm)	Rmáx (μm)
1	7,53	42,4
2	6,97	44,53

3	6,68	38,67
4	6,18	41,33
Media	6,84	41,73

Tabla 5. Ra y Rmáx de los probetas sometidas a shot peening

Se aprecia claramente como al pasar de la probeta 0 a la 2, es decir a medida que aumenta la decarburación superficial, al ser cada vez la superficie más blanda, el parámetro Rmax aumenta (las huellas son más profundas), lo que se traducirá en un mayor factor concentrador de la tensión bajo las cargas de fatiga y en el descenso de la resistencia a la fatiga del producto.

5. Conclusiones:

Los resultados de este trabajo se pueden concretar en las siguientes conclusiones:

- Mantenimientos continuados a la temperatura de forja (1200°C) de una y dos horas de duración dan lugar a decarburaciones significativas en el acero de 0,3-0,35% de carbono utilizado en la fabricación de ejes de camión en la empresa CIE Galfor. Se han medido respectivamente profundidades de decarburación de 1,5 y de 2,25 mm tras los mantenimientos de 1 y 2 horas a la temperatura de forja.
- La decarburación del eje del camión se traduce tras el tratamiento final de temple y revenido en una pérdida notoria de dureza en la superficie de la pieza, que pasa de un valor de 330 HV a 275 HV tras una hora de mantenimiento a la temperatura de forja (1200°C) y a 180 HV tras dos horas a esta misma temperatura.
- La decarburación inducida en la forja tiene efectos significativos en la magnitud de las tensiones residuales inducidas en el tratamiento final de shot peening y también en la profundidad afectada por este tratamiento mecánico. Se ha apreciado la disminución de la tensión residual superficial, de la tensión residual medida a 50 μm de profundidad y, también, de la tensión residual de compresión máxima inducida. Al mismo tiempo, la decarburación disminuye la profundidad sometida a tensiones de compresión importantes y la de la región sometida a tensiones de compresión.
- También se ha apreciado un aumento de la rugosidad superficial tras el tratamiento de shot peening tanto mayor cuanto mayor es la decarburación del producto, lo que se traducirá en la presencia de un factor concentrador de la tensión superior.
- El efecto final de la decarburación inducida por un mantenimiento excesivo a la temperatura de forja se traducirá finalmente en una pérdida significativa de efectividad del tratamiento de shot peening. Los fenómenos de cierre durante el crecimiento de las grietas por fatiga serán menos intensos y su campo de actuación más corto, por lo que cabría esperar un peor comportamiento a fatiga.

6. Bibliografía:

Cammett J., ``The effect of shot peening coverage on residual stress, cold work and fatigue in a Ni-Cr-Mo low alloy steel'', Lambda Research Proceedings International Conference on Shot Peening, 2002

Monsalve M., López E., Meza J. y Vargas F., ``Estudio mediante difracción de rayos X de las tensiones residuales producidas durante el depósito de películas delgadas de TiN sobre sustratos metálicos'', Rev.fac.ing.univ. Antioquia no.54 Medellín July/Sept. 2010

Torres M.A.S. , Voorwald H.J.C., ``An evaluation of shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel'', International Journal of Fatigue 24 (2002) 877–886

Kobayashi M., Matsui T., Murakami Y., ``Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening'', International Journal of Fatigue, Volume 20, Number 5, May 1998 , pp. 351-357(7)

Tekeli S., ``Enhancement of fatigue strength of SAE 9245 steel by shot peening'', Materials Letters 57 (2002) 604–608

Farrahi G.H., Lebrijn J.L., Couratin D., ``Effect of shot peening on residual stress and fatigue life of a spring steel'', Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol. 18, No. 2, pp.211-220, 1995.

Wang S., Li Y., Yao M., Wang R., ``Compressive residual stress introduced by shot peening'', Journal of Materials Processing Technology 73 (1998) 64-73.

Prevey P.S., ``X-Ray diffraction residual stress techniques'', Metals Handbook, 10, Metals Park, OH:American Society for Metals, 1986, pp. 380-392

Gómez-Acebo T., Castro F., ``Análisis termodinámico de la decarburación de aceros, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio'', Vol. 39 Núm. 3 Mayo-Junio 2000

Prevey P.S., ``A method of determining elastic properties of alloys in selected crystallographic directions for X-Ray diffraction residual stress measurement'', Advances in X-ray Analysis, University of Denver 1997