

## Contribución del tratamiento de shot-peening y el tratamiento térmico en la vida a fatiga de los engranajes

Gurutz Cortabitarte Laucirica, Miren Larrañaga Serna, Iñigo Llavori Osa, Jon Larrañaga Amilibia, Aitor Arana Ostolaza, Jon Ander Esnaola Ramos, Ibai Ulacia Garmendia

Grupo de Diseño y Mecánica Estructural, Departamento de Mecánica y Producción Industrial, Mondragon Unibertsitatea, España. Email: gurutz.cortabitarte@alumni.mondragon.edu

### Resumen

Los engranajes son empleados en los sistemas de transmisión de muchos sectores diferentes, como la industria automovilística o aeroespacial, la elevación o la generación de energía. Debido a sus condiciones de trabajo, la fatiga por flexión de los dientes es uno de los modos de fallo más comunes en los engranajes. En este sentido, se suelen aplicar tratamientos de cementado y *shot peening* para mejorar las propiedades mecánicas de la superficie y, por tanto, la resistencia a la fatiga mecánica de estos componentes. No obstante, la contribución de estos tratamientos se suele tener en cuenta en base a normativas de forma muy conservadora, por lo que su efectividad y potencial no están totalmente contrastados.

En este trabajo se evalúa numéricamente la contribución del *shot peening* y del tratamiento térmico (cementado) en la resistencia a la fatiga de los engranajes, en condiciones de fatiga por flexión de un solo diente (STBF). Se trata de la primera parte de un trabajo más amplio en el que posteriormente se realizará la validación experimental.

El caso de estudio elegido es un engranaje de módulo normal 6, fabricado en acero 16MnCr5. Se han analizado cuatro condiciones diferentes: i) sin tratamiento, ii) cementado, iii) sólo con *shot peening*, y iv) cementado y *shot peening*.

En primer lugar, se ha modelado la aplicación de *shot peening* en el pie del diente para estimar la evolución del patrón de tensiones residuales generado. De la misma manera se ha procedido con el tratamiento de cementado en la capa superficial del engranaje. Posteriormente, se ha predicho numéricamente la resistencia a la fatiga de los cuatro engranajes considerando las tensiones residuales de cada caso, para diferentes casos de carga y considerando los parámetros de fatiga multiaxial. Finalmente, se ha evaluado la contribución de cada tratamiento a la resistencia del engranaje.

**Palabras clave:** Tensiones residuales, HCF multiaxial, Engranaje, *Shot peening*

### Abstract

Gears are used in transmission systems in many different industries, such as the automotive or aerospace industry, lifting or power generation. Due to their operating conditions, tooth bending fatigue is one of the most common failure modes in gears. In this regard, case hardening and shot-peening treatments are often applied to improve the mechanical properties of the surface and thus the mechanical fatigue resistance of these components. However, the contribution of these treatments is usually taken into account on the basis of standards in a very conservative way, so that their effectiveness and potential are not fully proven.

In this work, the contribution of shot peening and heat treatment (case hardening) to the fatigue resistance of gears under single tooth bending fatigue (STBF) conditions is numerically evaluated. This is the first part of a larger study, which will be followed by experimental validation.

The case study chosen is a gear of normal modulus 6, made of 16MnCr5 steel. Four different conditions have been analysed: i) virgin (without any treatment), ii) case-hardened, iii) shot-peened, iv) both case-hardened and shot-peened.

Firstly, the application of shot-peening on the tooth foot has been modelled to estimate the evolution of the residual stress pattern generated. The same procedure was used for the cementation treatment on the surface layer of the gear. Subsequently, the fatigue strength of the four gears has been numerically predicted considering the residual stresses of each case, for different load cases and considering the multi-axial fatigue parameters. Finally, the contribution of each treatment to the gear strength has been evaluated

**Keywords:** Residual stresses, Multiaxial HCF, Gear, Shot peening.

## 1. Introducción

Los engranes son elementos mecánicos ampliamente empleados en sistemas de transmisión de potencia para gran variedad de aplicaciones como la industria automovilística, aeroespacial, elevación o en la generación de energía, entre otros. Los dos principales modos de fallo que limitan la vida útil de éstos son i) la fatiga superficial por contacto conocido como *pitting/spalling* y ii) la fatiga a flexión en el pie del diente. De ambos modos de fallo, la fatiga en el pie del diente es el más limitante ya que impide la operatividad del sistema de transmisión [1, 2].

Con el objetivo de mejorar el comportamiento a fatiga tanto superficial como en el pie del diente, los engranajes suelen recibir diferentes tipos de tratamientos: i) tratamientos térmicos para incrementar la resistencia mecánica global o superficial, ii) tratamientos superficiales para eliminar imperfecciones y mejorar el acabado de la superficie, y iii) tratamientos mecánicos para crear tensiones residuales (TR) compresivas en la superficie.

Entre los tratamientos térmicos, el cementado es uno de los tratamientos más empleados en engranajes [3]. Dicho tratamiento consiste en introducir el componente de acero a tratar en una atmósfera rica en carbono a alta temperatura. Posteriormente el componente se enfría en un baño de aceite generando por un lado una capa superficial endurecida de cementita que incrementa la resistencia mecánica superficial [4] y, por otro lado, templando el núcleo [4]. De este modo, se ralentiza la etapa de iniciación de la fisura y, en consecuencia, se incrementa la vida a fatiga a altos ciclos o *High Cycle Fatigue* (HCF) [2, 5]. Asimismo, durante dicho proceso de enfriamiento el núcleo de la pieza tratada es templado incrementando también su resistencia mecánica. El espesor de la capa endurecida, que puede variar entre 1 y 2mm [3, 6], así como la dureza obtenida varían en función de las condiciones del tratamiento (temperatura, tiempo de permanencia, velocidad de enfriamiento [6]).

Por otro lado, el tratamiento de *Shot Peening* (SP) es uno de los tratamientos superficiales mecánicos más empleados en engranajes [7] que, mediante el impacto de granalla de geometría esférica y dimensiones y dureza controladas, no sólo permite eliminar defectos y mejorar el estado de la superficie, sino que induce TRs compresivas que tienden a cerrar el frente fisuración, alargando la vida a fatiga a altos ciclos (HCF) [5]. La magnitud y el patrón de TRs obtenido depende tanto de las propiedades mecánicas del material base a tratar como de los parámetros de proceso empleados: i) la intensidad Almen, que depende del tamaño y dureza de las esferas, así como de la velocidad de impacto y ii) el grado de cobertura, que representa la relación entre el área cubierta por la influencia de SP con respecto a la superficie completa

tratada [8]. De este modo, a mayor intensidad Almen y grado de cobertura mayor será la magnitud y la profundidad del patrón de TRs de compresión. Sin embargo, una magnitud y profundidad excesivas de TR en la superficie pueden causar altas tensiones de tracción en la subsuperficie que pueden provocar la aparición de fallos en la misma [5, 9].

Debido a los numerosos parámetros que toman parte en el proceso de shot peening es difícil predecir el mapa de tensiones residuales que generara el proceso. Además de los parámetros del proceso, el mismo proceso no es repetitivo, la localización de los impactos de un tratamiento a otro varía, y el ángulo de impacto de cada esfera es diferente, estos factores dan lugar a variaciones en el mapa de tensiones residuales [10]. En la bibliografía, se encuentran diferentes métodos para estimar el patrón de TRs generado mediante SP. De este modo, a mediados de los 80 Guechichi et al. [11] presentaron un modelo analítico para predecir las TR generadas en base a la teoría de contacto de Hertz y el método de cálculo elastoplástico presentado por Zarka y Inglebert en 1985 [12]. Posteriormente, en 1989 Khabou et al. [13] presentaron una versión modificada del modelo de Guechichi, considerando distintas leyes constitutivas del material de la pieza a tratar. A comienzos de los 90, Li et al. [14] presentaron un modelo analítico que fue posteriormente complementado por Shen et al. [15] a comienzos de los 2000, introduciendo la ecuación del movimiento de sólido rígido de las esferas impactando con la pieza perfectamente rígida y plástica. Paralelamente, a partir del 2000, el salto tecnológico de los ordenadores dio lugar a la utilización de modelos de elementos finitos (EF), el cual permite considerar en mayor detalle las complejidades geométricas y de proceso. De este modo, en el 2005 Rouhaud et al. [16] evaluaron la utilización del modelo de endurecimiento cinemático en el material al recibir impactos severos en una misma zona. En 2008, Hong et al. [17] realizaron un estudio paramétrico mediante un modelo 3D de EF para analizar el efecto del diámetro de las esferas metálicas, la velocidad de impacto, el ángulo de incidencia y las propiedades del material de la pieza tratada en el mapa de tensiones residuales resultante. Recientemente, en 2016 R. Seddik et al. [18] acoplaron técnicas de optimización de parámetros de proceso en base a superficie de respuesta acoplado al modelo de EF del *shot peening*. De este modo, evaluaron el efecto de la velocidad de las esferas metálicas, el diámetro de las esferas y la cobertura, junto con la resistencia a la fatiga de las piezas tratadas con *shot peening*. Por lo tanto, aunque el tratamiento de shot peening es utilizado en la industria para mejorar la vida a fatiga de engranajes, a día de hoy no existe una metodología para cuantificar su efecto en piezas complejas. Los modelos numéricos existentes en la literatura científica para simular el proceso de shot peening se limitan a geometrías planas y simples. Y, aunque existen trabajos que cuantifican el estado tensional en

probetas tratadas mediante shot peening, no existen trabajos que muestren las diferentes TRs obtenidas al aplicar distintos tratamientos. En cuanto a las metodologías para estimar la vida a fatiga ninguna tiene en cuenta estos efectos.

Por ello, en el presente estudio se analiza mediante EF la contribución del tratamiento de *shot peening* y del tratamiento térmico de cementado en el comportamiento a fatiga de engranajes fabricados en acero 16MnCr5, tanto de forma individual como combinada.

## 2. Metodología

El caso de estudio seleccionado para el presente trabajo consiste en una pareja de engranajes rectos de espesor 10 mm, 18 dientes, módulo 6 y ángulo de presión normal de 20° fabricados en 16MnCr5, los cuales se han evaluado bajo cuatro condiciones diferentes:

- i. **Pareja de engranajes sin tratar (RAW).** Se evalúa el comportamiento a fatiga de la pareja de engranajes de 16MnCr5 sin tratamiento considerado como referencia en el presente estudio.
- ii. **Pareja de engranajes cementados (TT).** Se evalúa la influencia de un tratamiento de cementado con una profundidad de capa cementada de 1,5 mm y dureza de 600 HV.
- iii. **Pareja de engranajes tratados mediante shot peening (RAW+SP).** Se considera el efecto del tratamiento de *shot peening* sobre material base en las condiciones mostradas en la Tabla 1.
- iv. **Pareja de engranajes cementados y tratados mediante shot peening (TT+SP).** Se considera el efecto del tratamiento de *shot peening* especificado en el caso iii. RAW+SP sobre engranes cementados bajo las condiciones del caso ii. TT.

**Tabla 1.** Condiciones de tratamiento de *Shot Peening*

Tipo de bola	Alambre cortado
Tamaño de bola	0,6 mm
Dureza de bola	60 HRc
Caudal	20 kg/min
Presión	1,5 kg/cm <sup>2</sup>
Intensidad de Almen	0,185 mm A
Cobertura	100%

Fuente: Elaboración propia

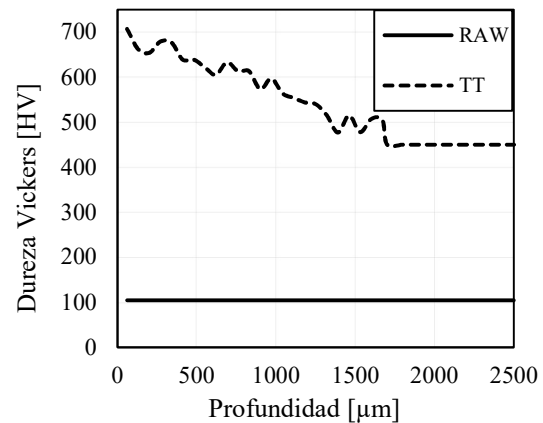
El procedimiento numérico consiste en dos etapas. En primer lugar, se modeliza mediante EF el tratamiento de *shot peening* sobre el caso iii. RAW+SP engranaje sin tratar y sobre el caso iv. TT+SP engranaje cementado, con el objetivo de predecir el patrón de TR correspondientes caso de

estudio. A continuación, se evalúa el comportamiento a fatiga para diferentes niveles de carga considerando el patrón de TR de shot peening estimado en la etapa anterior para los casos iii. RAW+SP y iv. TT+SP.

### 2.1. Propiedades mecánicas

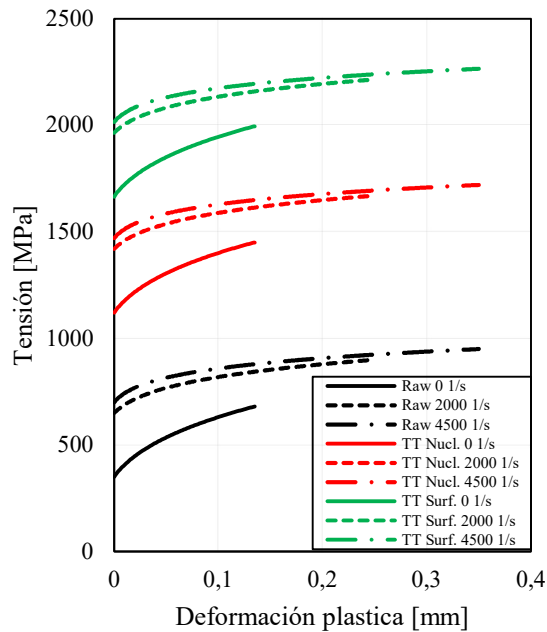
Durante el proceso de *shot peening*, la granalla de geometría esférica impacta a gran velocidad sobre la superficie tratada. Debido a ello, el modelado mediante elementos finitos de dicho proceso requiere la curva tensión deformación real del material tratado en función de la velocidad de deformación [19]. De este modo, las propiedades mecánicas para modelar dicho proceso en ambos casos se han considerado del siguiente modo:

1. **Propiedades mecánicas del acero 16MnCr5.** Se han utilizado las curvas tensión deformación publicados por Mardoukhi et al. [19] para diferentes velocidades de deformación (0, 2000 y 4500s<sup>-1</sup>).
2. **Propiedades mecánicas de la capa cementada y del núcleo.** Para estimar las propiedades mecánicas de la capa cementada se han realizado mediciones de microdurezas Vickers (Figura 1) y se ha estimado el límite de rotura de acuerdo con la norma ISO 18265:2014 [20], a partir del cual se han estimado las propiedades mecánicas de la capa cementada basado en el modelo de material sin tratar.



**Figura 1.** Dureza Vickers de la capa cementada a lo largo de la profundidad

La Figura 2 muestra las propiedades mecánicas del material base, de la capa cementada y del núcleo tras el cementado considerados en la modelización numérica. Asimismo, para la evaluación a fatiga para los diferentes casos de carga se ha utilizado un modelo de endurecimiento cinemático que considere la evolución de las propiedades mecánicas al ser sometido a cargas cíclicas de plastificación, especialmente para los casos de carga dentro del rango de fatiga a bajos ciclos o LCF.



**Figura 2.** Curvas tensión deformación reales en función de la velocidad de deformación

## 2.2. Modelización numérica del proceso de *shot peening*

En este apartado se describe el procedimiento numérico llevado a cabo para la modelización del proceso de *shot peening* tanto para el caso del material base (caso iii) como para el caso del material cementado (caso iv).

La técnica de modelización del proceso de *shot peening* se basa en el procedimiento presentado por Mylonas et al. en 2011 [21]. La configuración de proceso utilizada consiste en el uso de granalla esférica S230 (según el Manual SAE de Shot Peening [10]) de diámetro nominal de 0,6 mm, un ángulo de impacto de 90° y una velocidad de impacto de 50 m/s. El tratamiento se aplica con una boquilla de 4 mm de diámetro con un caudal másico medio de 11 kg/min y una velocidad de desplazamiento de 175 mm/s. Según el estudio llevado a cabo por Hong et al. en 2008, [17] el porcentaje de disparos que impactan en la superficie tratada con una velocidad superior a 20 m/s es aproximadamente el 86%. Por lo tanto, según su estudio, para considerar un grado de cobertura del 100% es suficiente con considerar 238 disparos/mm<sup>2</sup>. No obstante, considerar 238 impactos por mm<sup>2</sup> supone un coste computacional elevado. Por ello Labeas et al. 2008 [22] propuso la utilización de un número equivalente de impactos orientado a simulaciones FEM, el cual fue validado en 2011 por Mylonas et al. [21]. Aplicando dicho método el número de impactos equivalente mínimo para el caso de estudio del presente trabajo son 10 impactos/mm<sup>2</sup>. Para asegurar el grado de cobertura, el número de impactos considerado fue de 152 impactos/mm<sup>2</sup>. La Tabla 2 recoge el número total de impactos estimados en un proceso real [9], el número de impactos reducido estimado en base al estudio de Hong et al.

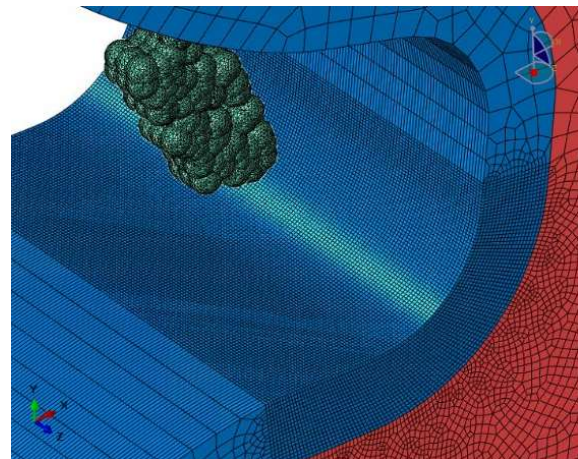
[9], el grado de cobertura, el número de impactos mínimo equivalente para EF estimado en base al procedimiento de Labeas et al. [10], el número de impactos considerado en el modelo de EF y la velocidad de impacto.

**Tabla 2.** Condiciones de tratamiento, número total de impactos real [9], reducido [9], mínimo equivalente para EF [10] y considerado en modelo EF.

Tipo de esfera	S230
Grado de cobertura	100%
v impacto (m/s)	50
Num. total impactos/mm <sup>2</sup>	2370
Num. impactos reducidos/mm <sup>2</sup>	238
Num. impactos min. eq. EF/mm <sup>2</sup>	10
Num. impactos/mm <sup>2</sup> modelo EF	152

Fuente: basado en [8-10]

Debido a la naturaleza del tratamiento de *shot peening*, cuyo efecto es localizado, se ha modelado el tratamiento únicamente en la zona crítica a fatiga, lo cual permite reducir de forma considerable el coste computacional. Para considerar las propiedades mecánicas correspondientes a la capa cementada y del núcleo el modelo geométrico se divide en dos regiones continuas: i) la correspondiente a la capa cementada de 1,5mm de profundidad y ii) la correspondiente al núcleo del engranaje. La malla utilizada para la primera región, donde además posteriormente se llevará a cabo la evaluación a fatiga, es hexaédrica lineal de 80µm. Por otro lado, la malla utilizada para la segunda región es tetraédrica cuadrática de 1,5mm. Para asegurar la continuidad de la malla entre ambas regiones se ha utilizado un *growth rate* del 10%. En todos los casos modelados se ha empleado la misma malla de forma que en función del caso modelado, iii) *shot peening* sobre engrane sin tratar o iv) *shot peening* sobre engrane cementado, a cada región se le han asignado las propiedades de material correspondientes. La Figura 3 muestra el mallado aplicado sobre las dos regiones del engranaje y las esferas empleadas para modelar el proceso de *shot peening* localizado en la zona crítica.



**Figura 3.** Detalle modelo EF de *shot peening*

### 2.3. Modelización numérica bajo carga cíclica

Para llevar a cabo la evaluación del comportamiento a fatiga de los cuatro casos de estudio especificados, se llevó a cabo un modelo de EF estructural utilizando el mallado definido para el tratamiento de *shot peening*. El contacto entre los dientes de la pareja de engranajes se ha modelado con una región local correspondiente a la zona de contacto entre ambos, tal y como se muestra en la Figura 4. Se ha considerado un coeficiente de fricción de Coulomb de 0.2. Para los casos de estudio iii) y iv), donde se considera el efecto del tratamiento de *shot peening* sobre engranaje sin tratar y cementado, se han mapeado las TR estimadas en el apartado anterior para cada caso. Los cuatro casos de estudio se han evaluado bajo las mismas condiciones de carga (Tabla 3) en configuración R=0, donde se han modelado dos ciclos de carga y descarga para cada nivel. Debido a la contribución de los diferentes tratamientos abarcan el rango desde el régimen de fatiga a bajos ciclos (LCF) hasta el régimen de fatiga a altos ciclos (HCF).

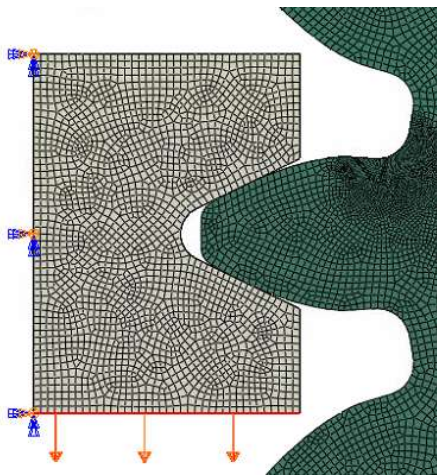


Figura 4. Modelo EF de carga cíclica

Tabla 3. Casos de carga

CASOS DE CARGA			
10kN	13kN	15kN	17kN

Fuente: Elaboración propia

### 2.4. Evaluación de vida a fatiga multiaxial

En este trabajo, la zona crítica se ha evaluado utilizando el parámetro Smith-Watson-Topper (1) (SWT) como parámetro indicador de fatiga (FIP) [23]. El SWT es un criterio de fallo de tipo modo I definido como el producto de la tensión normal máxima ( $\sigma_{n,max}$ ) y la amplitud de la deformación normal ( $\epsilon_{n,a}$ ):

$$SWT = (\sigma_{n,max} \epsilon_{n,a})_{max} = \frac{\sigma_f^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (1)$$

donde  $\sigma_f'$  es el coeficiente de resistencia a la fatiga,  $b$  es el exponente de fatiga,  $E$  es el módulo elástico,  $N_f$  es el número de ciclos hasta el fallo,  $\epsilon_f'$  es el coeficiente de ductilidad a la fatiga y  $c$  es el exponente de ductilidad a fatiga. Como se ha dicho anteriormente, los parámetros FIP suelen evaluarse en base a la identificación del plano crítico. En este aspecto, es bien sabido que la evaluación de la vida a fatiga en el *hot spot* da resultados conservadores en los problemas de entallas debido al efecto del gradiente de tensiones. Para superar este problema, en la literatura se han desarrollado varios métodos no locales siendo la teoría de la distancia crítica (TCD) el método más utilizado [24]. La idea original fue desarrollada por Neuber et al. en 1958 [25], pero no fue hasta décadas más tarde cuando fue ampliada por Taylor et al. en 2008 [24]. A pesar de que dicha teoría puede implementarse de varias formas, el método de puntos (PM), el método de líneas (LM) y el método de volumen/área (VM/AM) son los métodos más empleados en la bibliografía [26]. En el presente trabajo se ha empleado el método LM, en el cual el valor de tensión de cada nodo se promedia en función del radio de influencia definido a partir del umbral de propagación de grieta del material  $K_{th}$ . En este trabajo el radio de influencia utilizado es de 0,462mm.

Una vez determinado el parámetro SWT máximo en el *path* crítico en base al método LM, se ha estimado la vida a fatiga del componente para la carga correspondiente en base a las curvas SWT-N tanto del material base como de la capa cementada (Figura 5). Dichas curvas se han estimado en base a datos bibliográficos correspondientes tanto al material base [19] como para el cementado [20].

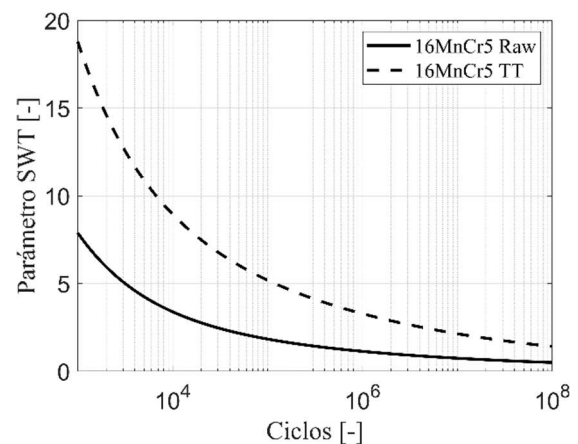


Figura 5. Curvas SWT-Ciclos (Raw-TT) basado en [19, 20].

## 3. Resultados

### 3.1. Patrón numérico de TR de *shot peening*

Las Figuras 6 y 7 muestran el patrón de TR de *shot peening* aplicado al caso de engranaje sin tratar y al caso cementado respectivamente. Tal y como se detalla en la gráfica de la Figura 8 se observa que

debido a la elevada resistencia mecánica y baja ductilidad de la capa cementada, la magnitud de las TRs inducidas mediante el tratamiento son mayores para el caso cementado (-2050MPa vs.-800MPa) mientras que el grado de penetración alcanzado es menor (0,2mm vs. 0,8mm).

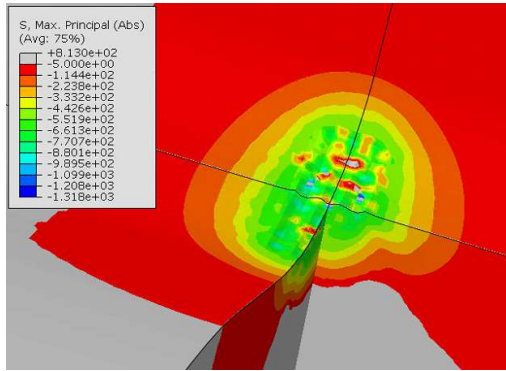


Figura 6. Patrón de TR de shot peening estimado para el caso del engranaje sin tratamiento previo (RAW+SP).

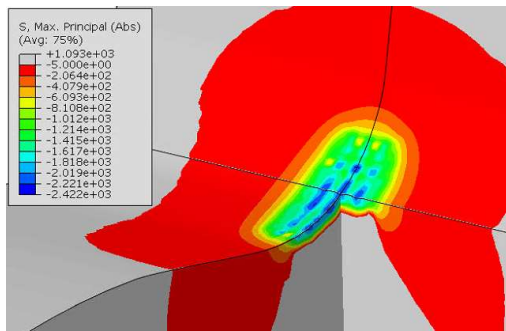


Figura 7. Patrón de TR de shot peening estimado para el caso del engranaje cementado (TT+SP).

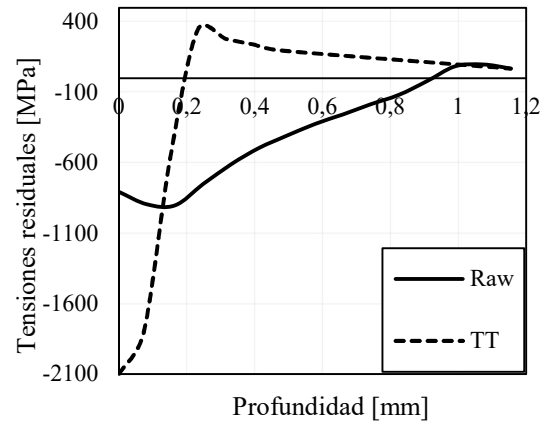


Figura 8. Evolución de la magnitud de tensiones residual perpendicular al plano crítico (modo I) en profundidad

### 3.2. Modelización numérica de los casos de carga

La Figura 9 muestra como ejemplo el patrón de tensiones al aplicar una carga cíclica de 13kN para cada uno de los cuatro casos de estudio (i. RAW, ii. TT, iii. RAW+SP y iv. TT+SP). Se observa que en el caso RAW las tensiones generadas por la carga alcanzan el régimen plástico ( $>S_y=350\text{MPa}$ ) mientras que en el caso TT dichas tensiones no alcanzan el límite elástico. En los casos tratados con SP se observa que, por un lado, en el caso RAW+SP, las tensiones compresivas generadas inicialmente pasan a ser tractivas por el efecto de la carga, pero alcanzan magnitudes inferiores al caso RAW (42% del RAW). Sin embargo, en el caso TT+SP las tensiones tras la carga siguen siendo compresivas, aunque su magnitud disminuye un 18,75%.

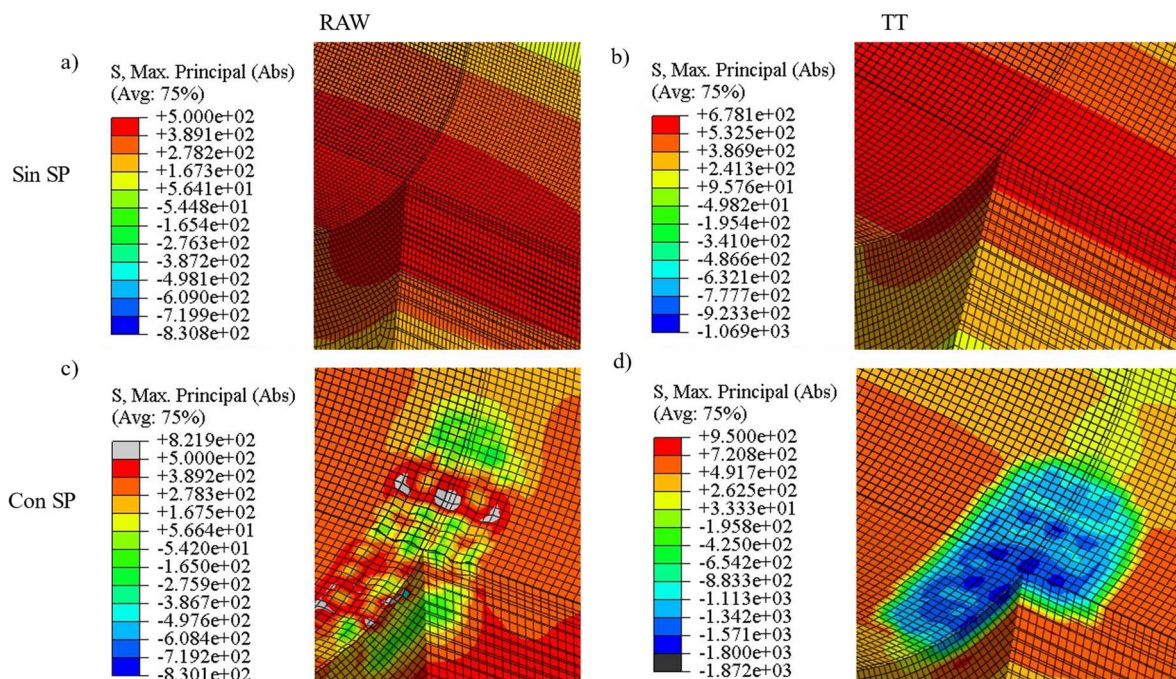
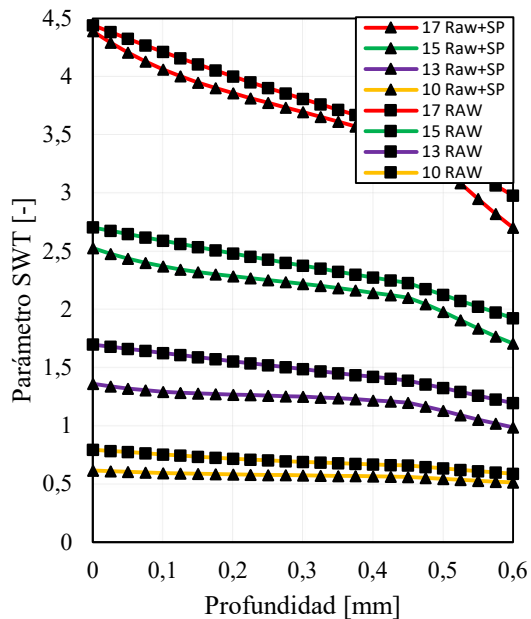


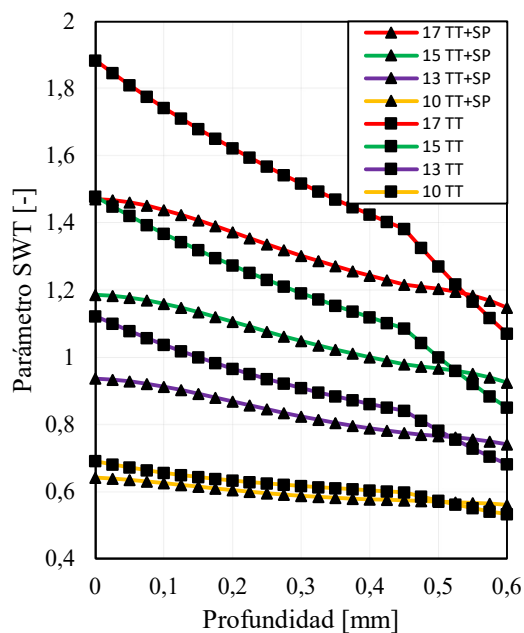
Figura 9. Tensión principal para el caso de carga de 13kN a) engrane sin tratar (RAW), b) engrane cementado (TT), c) engrane con SP (RAW+SP) y d) engrane cementado con SP (TT+SP)

### 3.3. Evaluación de la vida a fatiga

Las gráficas de las Figuras 10 y 11 muestran respectivamente la influencia del tratamiento de SP en la evolución del parámetro de SWT promediado en base a TCD-LM en el espesor para material base (RAW) y para material cementado (TT) respectivamente para los casos de carga definidos

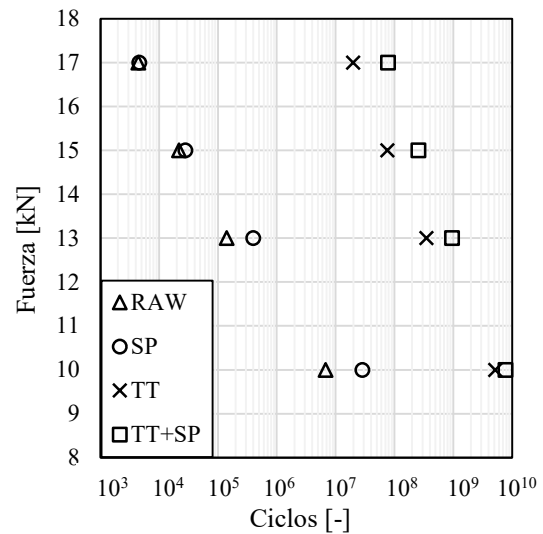


**Figura 10.** Evolución del parámetro SWT promediado en base a TCD-LM para material base (RAW) y material base tratado con SP (RAW+SP)



**Figura 11.** Evolución del parámetro SWT promediado en base a TCD-LM para engrane cementado (TT) y cementado con SP (TT+SP)

La Figura 12 muestra la vida teórica estimada para cada uno de los casos de estudio para los cuatro niveles de carga analizados.



**Figura 12.** Estimación de vida a fatiga

Se observa que el TT de cementado presenta una contribución muy superior al incremento de la vida a fatiga en comparación al tratamiento de SP para todos los niveles de carga estudiados, con una contribución media del 203.026% frente a 233%. La contribución de dicho tratamiento es especialmente notoria para los niveles de carga más altos (hasta 434.302%) debido al incremento de resistencia mecánica de la capa cementada, de modo que la vida del engranaje pasa del rango LCF (4.390 ciclos) al rango de vida infinita en HCF (19.713.3006 ciclos). A medida que disminuye la carga de ensayo y el nivel de tensiones se sitúa por debajo del límite elástico su contribución disminuye hasta el 18.176%, siendo todavía muy superior a la contribución máxima del SP de 420%.

En cuanto al tratamiento de SP se refiere, su contribución para los niveles de carga más altos, situados en el rango de LCF es muy reducida, debido a que la plastificación cíclica superficial originada por las elevadas cargas libera el patrón de TR compresivo inducido y su efecto favorable. Sin embargo, en el rango de HCF, donde las tensiones superficiales generadas por los casos de carga son inferiores al límite elástico su contribución al incremento de la vida del componente es de hasta el 420%.

Al aplicar el tratamiento de SP sobre engranaje cementado lo contribución media del incremento de vida de dicho tratamiento es del 288%. Sin embargo, al contrario de lo observado en el caso de material base, en este caso la contribución disminuye a medida que disminuye la carga ensayada desde un 390% hasta un 150%. La causa de dicho efecto es que la vida del engranaje cementado sin SP ya se encuentra entre el rango de HCF y VHCF. Como es sabido, mientras que en el rango de HCF la iniciación de la fisura se produce en la superficie mientras que en el rango de VHCF sucede en la subsuperficie [27]. Por ello, a medida que disminuye el nivel de carga y

se produce una transición en el modo de fallo del rango de HCF al rango de VHCF, el efecto del tratamiento de SP disminuye ya que es un tratamiento superficial que pierde su efecto con la profundidad. Además, en el caso del engrane cementado, debido a la elevada resistencia mecánica de dicha capa el grado de penetración logrado es muy inferior al caso del engranaje de material base y, por lo tanto, dicho fenómeno es todavía más patente.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha evaluado numéricamente la contribución de los tratamientos de cementado y SP tanto por separado como de forma combinada al incremento de la vida a fatiga de engranajes.

Se ha observado que el TT de cementado es el que mayor contribución proporciona de forma individual con una contribución media del 203.026% y una contribución máxima de 434.302% para los casos analizados.

Asimismo, se ha observado que la contribución del tratamiento de SP se diluye en el rango de LCF, debido a que las plastificaciones generadas por las cargas cíclicas liberan las tensiones compresivas inducidas por el tratamiento. Sin embargo, a medida que disminuye el nivel de carga, en el rango de HCF, las tensiones son inferiores al límite elástico y, por lo tanto, a cargas más bajas más patente es el efecto del SP. No obstante, pasar del rango de HCF al rango de VHCF, las tensiones son muy inferiores al límite elástico y la iniciación de la fisura se produce en la subsuperficie. Por lo tanto, como el SP es un tratamiento superficial pierde su efecto para el caso de VHCF, especialmente en el caso cementado donde el grado de penetración del tratamiento es menor.

Finalmente, se ha observado que la aplicación del tratamiento sobre engrane cementado contribuye a un incremento adicional de la vida a fatiga medio del 288% y una contribución máxima para las cargas más altas situados en el rango de HCF del 390%, y su contribución mínima para las cargas más bajas dentro del rango de VHCF siguen siendo elevada (150%). Por lo tanto, la aplicación combinada de ambos tratamientos tiene una contribución media con respecto al engrane sin tratar del 930.030% con una contribución máxima para el nivel de carga más alto estudiado de 1.752.587% incrementando su vida teórica desde los 4390 ciclos (LCF) a 76.938.613 ciclos (HCF).

Por lo tanto, se concluye que la aplicación combinada de dichos tratamientos es especialmente interesante en aplicaciones de elevados niveles de carga donde el incremento del dimensionamiento del engranaje para cumplir los requerimientos de vida penaliza la funcionalidad del sistema de transmisión.

#### 5. Agradecimientos

Los investigadores quieren agradecer a la Diputación Foral de Guipúzcoa por el soporte proporcionado el proyecto SHOTPEN (referencia 481/2021), dentro de las de ayudas del Programa Red Guipuzcoana de Ciencia, Tecnología e innovación, en el cual se ha desarrollado el presente trabajo. Asimismo, también quieren agradecer a la empresa de tratamientos Iparblast por su colaboración en el presente proyecto.

#### 6. Referencias

- [1] J. Patel, G. Sahu, and P. Kumar Sen, "A study on common failure of gears," 2015.
- [2] S. Nick Bretl, T. Schurer, K. Tobie, P. Stahl, and B.-R. Höhn, "Thermal processing for gear solutions investigations on tooth root bending strength of case-hardened gears in the range of high cycle fatigue," 2014.
- [3] N. Bugliarello, B. George, and D. Giessel, "Heat treat process for gears," 2010.
- [4] R. Weber, J. Rötting, B. Scholtes, and M. Bacher-Höchst, "Load stresses and residual stresses in the tooth interior," in *International Gear Conference 2014: 26th–28th August 2014, Lyon*, Elsevier, 2014, pp. 804–813. doi: 10.1533/9781782421955.804.
- [5] M. Benedetti, V. Fontanari, B.-R. Höhn, P. Oster, and T. Tobie, "Influence of shot peening on bending tooth fatigue limit of case-hardened gears," 2002. [Online]. Available: [www.elsevier.com/locate/ijfatigue](http://www.elsevier.com/locate/ijfatigue)
- [6] S. A. Pakhomova, M. v. Unchikova, and R. S. Fakhurtdinov, "Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization," in *Materials Science Forum*, 2016, vol. 870, pp. 383–391. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383.
- [7] W. Zinn and B. Scholtes, "Mechanical Surface Treatments of Lightweight Materials-Effects on Fatigue Strength and Near-Surface Microstructures," 1998.
- [8] Hong Y. M., "Numerical and theoretical study of shot peening and stress peen forming process, PhD dissertation, University of Montreal," 2010.
- [9] T. Gurova, J. R. Teodósio, J. M. A. Rebello, and V. Monin, "Model for the variation of the residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 33, no. 5, pp. 367–372, 1998, doi: 10.1243/0309324981513066.
- [10] SAE, *Manual on Shot Peening, Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA, Fourth Edition*. SAE International, 2011.
- [11] H. Guechichi, "Prévision des contraintes résiduelles dues au grenailage de précontrainte, PhD thesis, ENSAM," 1986.
- [12] J. Zarka and G. IngleberT, "Simplified analysis of inelastic structures, In Simplified



- Analysis of Inelastic Structures Subjected to Static or Dynamical Loadings, CISM Seminar,” 1985.
- [13] M. T. Khabou, L. Castex, and G. Inglebert, “The effect of material behavior law on the theoretical shot peening results, European Journal of Mechanics,” 1989.
- [14] J. K. Li, Y. Mei, W. Duo, and W. Renzhi, “Mechanical approach to the residual stress field induced by shot peening,” 1991.
- [15] S. Shen, Z. D. Han, C. A. Herrera, and S. N. Atluri, “Assessment, development, and validation of computational fracture mechanics methodologies and tools for shot-peened materials used in rotorcraft principal structural elements, Final Report-U.S. Department of Transportation: Federal Aviation Administration,” 2004.
- [16] E. Rouhad, A. Ouakka, C. Ould, J. L. Chaboche, and M. François, “Finite elements model of shot peening, effects of constitutive laws of the material,” 2005.
- [17] T. Hong, J. Y. Ooi, and B. Shaw, “A numerical simulation to relate the shot peening parameters to the induced residual stresses,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 15, no. 8, pp. 1097–1110, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.11.017.
- [18] R. Seddik, A. Bahloul, A. Atig, and R. Fathallah, “A simple methodology to optimize shot-peening process parameters using finite element simulations. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,” 2016.
- [19] A. Mardoukhi, J. Rämö, T. Vuoristo, A. Roth, M. Hokka, and V. T. Kuokkala, “Effects of microstructure on the dynamic strain aging of ferriticpearlitic steels at high strain rates,” in *EPJ Web of Conferences*, Sep. 2018, vol. 183. doi: 10.1051/epjconf/201818303009.
- [20] E. A. E. Documento and H. de Dirigirse, “UNE-EN ISO 18265:2014,” 2014. [Online]. Available: www.aenor.esTel.:902Fax:913
- [21] G. I. Mylonas and G. Labeas, “Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: Residual stress, surface roughness and cold work prediction,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, no. 19, pp. 4480–4494, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.03.080.
- [22] D. Spinner, C. A. Rodopoulos, and G. Labeas, “Relating Shot Peening Process Parameters to Residual Stresses-A computational/ Stochastic Marriage.”
- [23] R.N. Smith, P. Watson, and T.H. Topper., “J. Mater. 5,No. 4, pp. 767-778,” 1970.
- [24] D. Taylor, “The theory of critical distances,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, no. 7, pp. 1696–1705, May 2008, doi: 10.1016/j.engfracmech.2007.04.007.
- [25] H. Neuber, “Theory of Notch Stresses: Principles for Exact Calculation of Strength with Reference to Structural form and Material, second ed., Springer Verlag, Berlin,” 1958.
- [26] K. Tserpes *et al.*, “A review on failure theories and simulation models for adhesive joints,” *Journal of Adhesion*. Bellwether Publishing, Ltd., 2021. doi: 10.1080/00218464.2021.1941903.
- [27] B. Pyttel, I. Brunner, B. Kaiser, C. Berger, and M. Mahendran, “Fatigue behaviour of helical compression springs at a very high number of cycles - Investigation of various influences,” *International Journal of Fatigue*, vol. 60, pp. 101–109, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.01.003.