

## INFLUENCIA DEL SHOT PEENING SOBRE LA VIDA EN ENSAYOS DE FATIGA POR FRETTING CON CONTACTO CILÍNDRICO

V. Martín\*, C. Navarro, J. Vázquez, J. Domínguez

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, Universidad de Sevilla, E.S.I., Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España.

\* Persona de contacto: [vmartin2@us.es](mailto:vmartin2@us.es)

### RESUMEN

En este trabajo se caracteriza la aleación de AL7075-T651 ante la fatiga por fretting. En concreto se estudia la influencia sobre la vida a fatiga por fretting del coeficiente de rozamiento, la rugosidad superficial y las tensiones residuales introducidas por un tratamiento de shot-peening. Este tratamiento, además de introducir tensiones residuales de compresión en el material, también modifica la rugosidad superficial debida a la deformación plástica producida por el tratamiento. De las probetas ensayadas, un grupo no ha sido tratado superficialmente. Otro grupo de probetas están tratadas con shot-peening para su comparación con ensayos con las mismas cargas aplicadas. En otro grupo de probetas se induce la rugosidad superficial que causa el tratamiento pero sin la deformación plástica y la consecuente tensión residual de compresión. En un último grupo de probetas tratadas con shot peening se altera la rugosidad superficial sin modificar la tensión residual de compresión. Para analizar cómo afectan a la vida en ensayos de fatiga por fretting las diferentes modificaciones producidas por el shot peening, se ha medido la rugosidad superficial, coeficiente de rozamiento y tensiones residuales para correlacionarlas con la vida a fatiga y lugar de iniciación de las grietas.

**PALABRAS CLAVE:** Fatiga por fretting, Contacto cilíndrico, Análisis experimental, Shot Peening.

### ABSTRACT

This work studies the influence of shot peening on fretting fatigue tests with cylindrical contact. The material studied is an alloy Al7075-T651. Specifically, the influence of different parameters is studied. Among others, surface roughness, friction coefficient and residual stresses. Shot peening introduces residual stresses due to the impact of small steel balls which also modifies roughness. Different groups of specimens are tested to compare the life. A group of shot peened specimens. A group of shot peened specimens polished to reduce the roughness. Finally, some specimens subjected to other surface treatment, which has the same roughness than shot peening, are tested. In order to compare the influence of shot peening several tests have been carried out with non-treated specimens. The parameters of surface roughness and residual stress are measured to correlate with the life on fretting fatigue tests.

**KEYWORDS:** Fretting Fatigue, Cylindrical contact, Test, Shot peening.

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 La fatiga por fretting

La fatiga por fretting es un tipo particular de fatiga que aparece cuando dos piezas, principalmente metálicas, están en contacto mecánico bajo presión. Si el par de contacto está sometido a esfuerzos variables, una pieza de estas tiende a deslizar parcialmente sobre la otra. Debido a esto, en la zona de contacto se pueden encontrar una serie de fenómenos como grietas tanto superficiales como internas, desgaste o corrosión. En el caso de las grietas, estas pueden crecer de tal forma que produzcan la rotura después de una serie de ciclos de cargas. En estas circunstancias la iniciación de grietas se produce de una forma más rápida que en fatiga simple. Debido a que

las uniones mecánicas están presentes en multitud de componentes, la fatiga por fretting es un tipo de fallo muy usual [1]. Por ellos se estudian de forma exhaustiva paliativos del fenómeno de fatiga por fretting para así aumentar la vida de los componentes. En este artículo se ha estudiado un método mecánico llamado shot peening en una geometría sencilla tipo cilindro-plano para reproducir el fenómeno de fatiga por fretting y analizar el efecto del shot peening. A esta probeta se le han aplicado fuerzas constantes y cíclicas para crear un estado tensional oscilatorio.

#### 1.2 Geometría de probetas y material

Para la realización de los ensayos se han utilizado probetas de tipo dog-bone con una sección rectangular de

8x10mm. Los elementos de contacto cilíndricos tienen un radio de 100mm y están situados a cada lado de la probeta. Todas las probetas y elementos de contacto están fabricados en aluminio 7075-T651. Las principales propiedades mecánicas de este material se pueden consultar en [2].

1.3 Dispositivo de ensayos

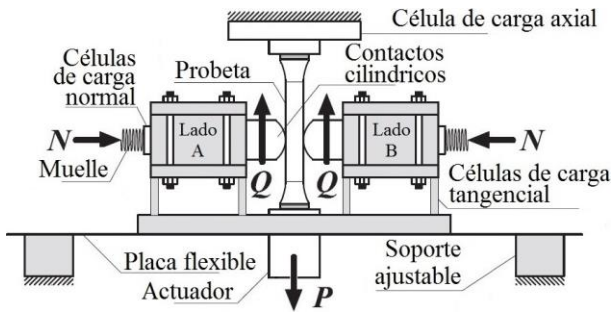


Figura 1. Esquema de la máquina de fatiga por fretting.

El dispositivo utilizado para la realización de estos ensayos está diseñado para reproducir la fatiga por fretting [3]. En la figura 1 se muestran en un esquema las fuerzas aplicadas que intervienen durante un ensayo. Las cargas normales,  $N$ , son las primeras en aplicarse y son constantes durante todo el ensayo. Las cargas tangenciales,  $Q$ , aparecen como consecuencia de la axial,  $P$ , que ejerce a la probeta un pistón servohidráulico y crea un estado tensional  $\sigma$ . Las cargas  $Q$  se transmiten a través del sistema hasta los soportes ajustables. Éstos regulan la carga tangencial en función de la distancia que haya entre ellos. La fuerzas tangencial y axial varían de forma senoidal y en fase, pero en dirección contraria, siendo la carga tangencial proporcional a la carga axial. Las cargas tangenciales máximas tienen su límite cuando  $Q = \mu \cdot N$ .

1.4 Tratamiento superficial de shot peening

En muchas aplicaciones de la industria en la que aparece el efecto de la fatiga se aplica el tratamiento superficial de shot peening como medio de paliar la iniciación de grietas y alargar la vida de estas piezas. Este tratamiento introduce tensiones residuales de compresión en el material tratado mediante el impacto de pequeñas bolas a alta velocidad que deforman el material plásticamente. El tratamiento elegido es el tipo 9A 230-H 90°, donde 9A es la intensidad generada medida en probetas Almen, 230 es el tamaño de las bolas en milésimas de pulgada y H es la dureza de las bolas empleadas, entre 55-62 Rockwell C. Por último, 90° indica la inclinación a la que se proyectan las bolas. Este tratamiento deja una superficie con una textura la cual se sabe que puede ser beneficiosa para el caso específico de fatiga por fretting [4]. El tratamiento se realiza bajo la norma especificada en [5] y solo se aplicará en las probetas y no en los elementos de contacto.

En la figura 2 podemos observar un mapa topográfico obtenido mediante el método de variación de foco. Sobre

este mapa se puede trazar una línea (mostrada en celeste) y obtener una gráfica bidimensional que nos muestra el perfil obtenido por el tratamiento.

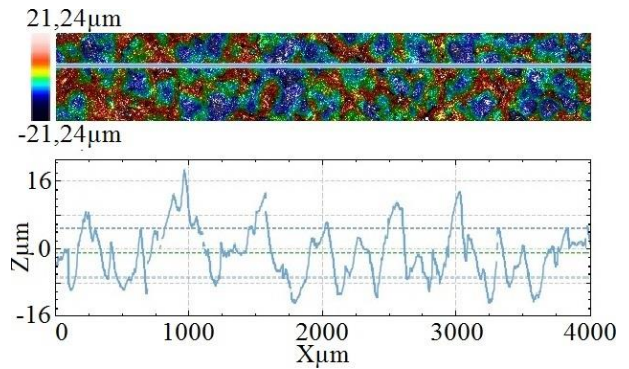


Figura 2. Superficie shot peening tipo 9A 230-H 90°.

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

2.1. Rugosidad superficial

La rugosidad superficial es el conjunto de irregularidades debido a la deformación plástica por arranque de material en el proceso de fabricación o por un tratamiento superficial posterior que deforme plásticamente la superficie. Estudios previos muestran el efecto de este parámetro en la fatiga por fretting [4], lo que lleva a pensar en la importancia que tiene en el campo de las tensiones debidas al contacto. La rugosidad superficial se ha medido en 3 probetas para tener un promedio del valor obtenido. En la tabla 1 podemos ver los resultados de las mediciones en el que se obtiene rugosidad media aritmética  $Ra$ , según [6], el valor máximo pico-pico  $Ry$ , y la media de las alturas máximas en 5 tramos,  $Rz$ , según [7]. También se toman medidas de los elementos de contacto y de las probetas sin tratamiento superficial.

Tabla 1. Rugosidad superficial medida.

MEDICIÓN	$Ra$ ( $\mu m$ )	$Ry$ ( $\mu m$ )	$Rz$ ( $\mu m$ )
Probetas sin SP	0.1	0.77	0.5
Probetas con SP	5.6	37.2	29.3
Contactos	0.2	1.72	1.28

2.2. Coeficiente de rozamiento

Tabla 2. Valor promedio de los coeficientes de rozamiento medidos.

	Coef. Roz. sin SP	Coef. Roz. con S-P
$\mu$	0.75	0.83

El coeficiente de rozamiento se ha estudiado con una serie de 2 probetas de cada grupo elegidas al azar para tener una media en la medida. El método utilizado para la obtención del coeficiente de rozamiento es similar al aplicado en estudios anteriores y del que se tiene

experiencia en el grupo para su realización [8, 9]. La tabla 2 muestra los valores promedios de los coeficientes de rozamiento medidos para los diferentes tipos de probetas.

2.3. Estructura cristalográfica.

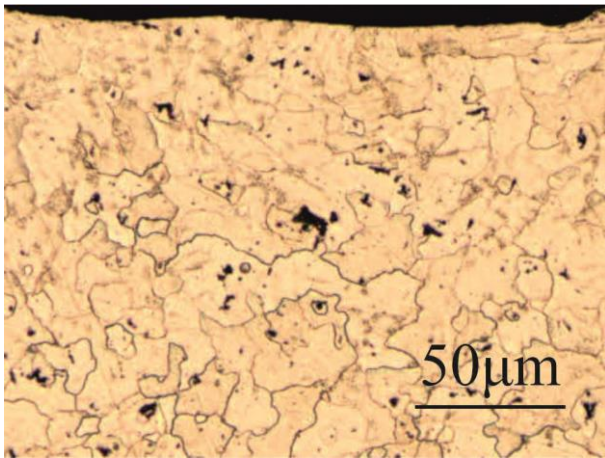


Figura 3. Estructura cristalográfica de la sección de una probeta tratada con shot peening.

En la figura 3 podemos ver la estructura cristalográfica de la sección de una probeta tratada con shot peening. En esta figura se puede observar cómo quedan deformados los granos cercanos a la superficie y cómo toman una regularidad geométrica conforme se avanza en la profundidad. Esta zona con importantes deformaciones plásticas de los granos cercana a la superficie corresponde con la profundidad a la que se producen las máximas tensiones residuales de compresión inducidas por el tratamiento superficial y alcanzan una profundidad de aproximadamente 100 micras.

2.4. Dureza Vickers.

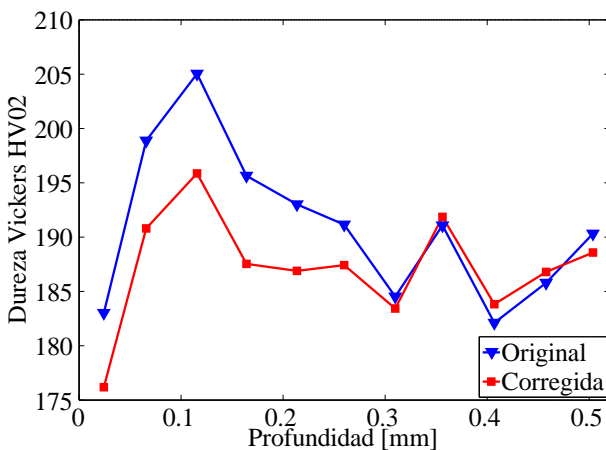


Figura 4. Dureza Vickers HV02.

Se sabe que el shot peening produce alteraciones en la dureza del material [10]. Es por ello que se ha realizado un estudio de la dureza del material en una sección de una probeta para obtener resultados de dureza en el interior.

En la figura 4 podemos observar una gráfica con los resultados de dureza Vickers para una fuerza de 2N. En estas medidas se han realizado la corrección propuesta por Tsui *et al* [11] para considerar el efecto de las tensiones residuales en la medida de la dureza.

2.5. Tensiones residuales

Para analizar el campo de tensiones residuales producido se han realizado dos tipos de ensayos semidestructivos. El primero es mediante el método del agujero ciego realizado según la norma [12]. El segundo es mediante el método de difracción de rayos X, realizado según la norma [13] que utiliza una reconstrucción de las medidas en profundidad con el método expuesto en [14].

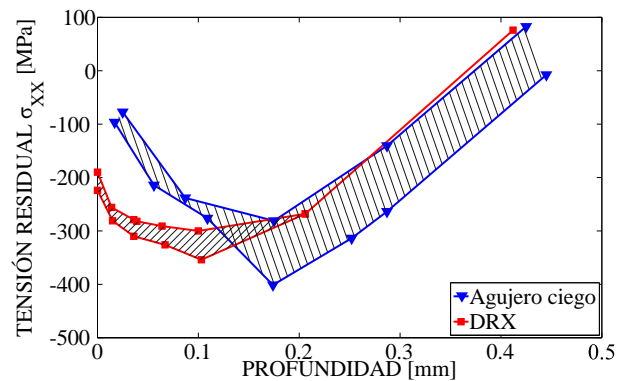


Figura 5. Tensiones residuales medida por agujero ciego y difracción de Rayos X.

Los resultados de ambos métodos podemos verlos en la figura 5 en forma de dos áreas que delimitan los valores en los que se encuentran las medidas. Estas se realizaron en 3 probetas para cada método. Las notables diferencias observadas en las medidas de tensiones residuales dependiendo del método utilizado han sido estudiadas en [15]. De hecho, el método del agujero ciego se realiza en una probeta con las medidas límites para su uso según la norma [12]. Por el contrario, el método de difracción de rayos X y su reconstrucción de tensiones residuales según las ecuaciones expuestas en [14] se realizan para un medio infinito cosa que no es real en nuestro caso. En este caso la mayor repetitividad es la que nos hace elegir el método de difracción de rayos X.

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

3.1 Relajación de tensiones residuales

Para estudiar el comportamiento frente a la fatiga por fretting de probetas tratadas superficialmente con shot peening se ha medido la relajación de las tensiones residuales debido a cargas cíclicas. Esta relajación ha sido observada en anteriores trabajos [16]. Se han seleccionado 7 combinaciones de carga para el estudio que se pueden ver en la tabla 3.

Tabla 3. Combinaciones de carga elegidas.

	Fuerza Normal $N$ [N]	Fuerza Tangencial $Q$ [N]	Tensión axial $\sigma_a$ [MPa]
1	6629	971	70
2	3006	2113	150
3	5429	2113	150
4	3006	971	175
5	5429	971	175
6	3006	2113	175
7	5429	2113	175

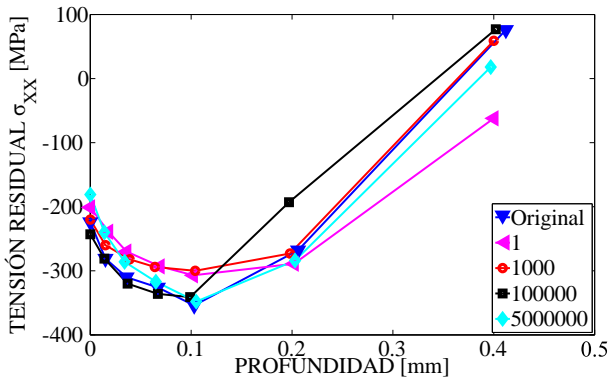


Figura 6. Tensiones residuales de combinación 1 según ciclos aplicados.

En primer lugar, se ha estudiado la relajación según los ciclos aplicados. Para ello se eligió la combinación de cargas más baja y más alta entre todos los ensayos realizados. Estas son las combinaciones 1 y 7 respectivamente de la tabla 3. Como se puede observar en la figura 6, con la combinación 1 no se aprecia una correlación entre los ciclos aplicados y la tensión relajada. Encontramos una relajación máxima de 54MPa a una profundidad de 0.1mm dada entre la probeta con 1000ciclos y la curva de tensiones original. Entre ellos se encuentran las tensiones de probetas con mayores ciclos.

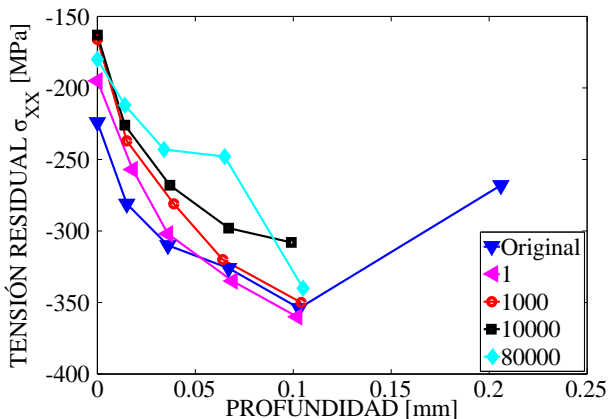


Figura 7. Tensiones residuales de combinación 7 según ciclos aplicados. Medición por difracción de Rayos X.

En la figura 7 podemos ver las tensiones residuales relajadas para la combinación 7, donde las cargas son mucho más altas. En este caso por dificultades en la toma

de medidas por DRX, no se pudo llegar a profundidades mayores de 0.1mm quedando así limitada la profundidad máxima de medición. Con esta combinación de carga mucho más alta que la anterior se puede observar cierta correlación entre el número de ciclos y la tensión residual relajada.

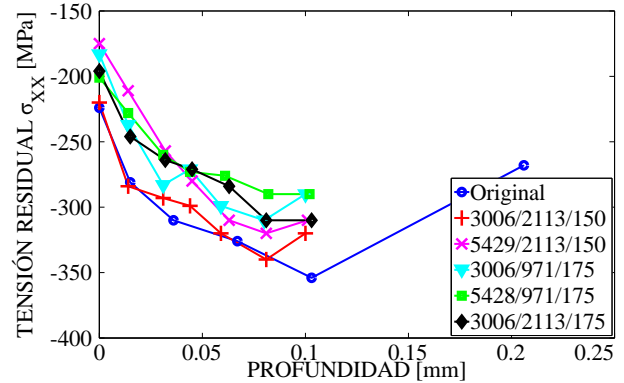


Figura 8. Tensiones residuales según la combinación.

Siendo difícil la medición de las tensiones residuales según altos ciclos de cargas aplicados debido al desgaste del material en el contacto hemos realizado el resto de ensayos aplicando solo 10 ciclos para la comparación entre las diferentes combinaciones de carga. En la figura 8 podemos observar los resultados de las mediciones de tensiones residuales relajadas para las diferentes combinaciones de carga. Si las analizamos y comparamos combinaciones similares donde solo cambie una variable, podemos observar la influencia sobre la relajación que esta variable tiene. Así podemos ver en un primer caso que para combinaciones de carga con iguales fuerzas normales y tangenciales vemos una influyente relajación de las tensiones cuando mayor es la tensión axial. En un segundo caso también podemos ver las combinaciones con igual fuerza normal y tensión axial y ver como diferentes fuerzas tangenciales influyen levemente en la relajación de tensiones residuales. Por último, se pueden observar las combinaciones con iguales tensión axial y tangencial y ver que una mayor fuerza normal implica una mayor relajación de tensiones, siendo esta más influyente cuando menor es la tensión axial. Este hecho se contradice con el aumento de vida a fatiga cuando mayor es la carga normal.

### 3.2 Caracterización superficial

Como hemos visto anteriormente en el apartado 2.1, una serie de probetas tratadas con shot peening tienen modificada la rugosidad superficial con respecto al estado original. Para analizar el efecto de la rugosidad producida por el shot peening en la fatiga por fretting, se han realizado dos ensayos alternativos. Para estos ensayos se han utilizado las mismas combinaciones de cargas de la tabla 3. Uno de estos ensayos se realiza con probetas sin tratamiento superficial de shot peening al que le hemos inducido con electroerosión una rugosidad similar a la que produce el shot peening. Se intentaba



realizar este proceso sin introducir tensiones residuales por la plastificación, pero en este caso el tratamiento de electroerosión dejaba una tensión residual de tracción en las primeras 50 micras. En la figura 9 podemos observar las tensiones residuales del tratamiento de electroerosión. En la figura 10 podemos ver como afectan a las vidas obtenidas, siendo estas menores en comparación con probetas sin shot peening. Esto es debido a las tensiones residuales de tracción observadas.

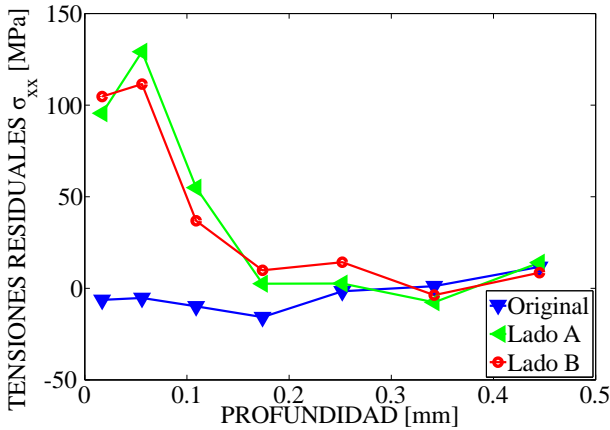


Figura 9. Tensiones residuales en probetas con electroerosión.

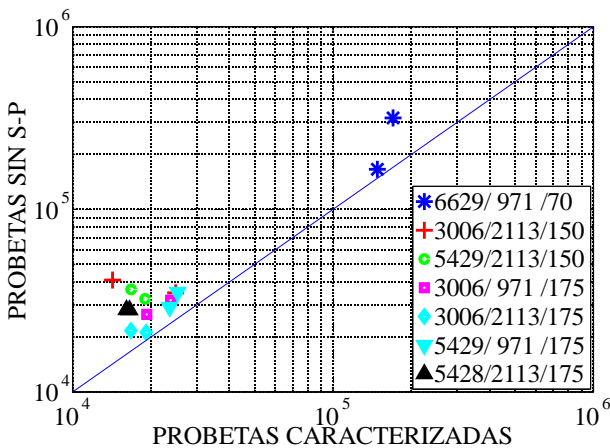


Figura 10. Vidas con probetas sin shot peening frente a probetas con electroerosión.

El segundo tipo de ensayo se realiza con probetas tratadas con shot peening a las que se ha eliminado entre 20 y 25 micras de material en la superficie mediante un pulido. Este proceso altera levemente las tensiones residuales del material, pero disminuye significativamente la rugosidad superficial. Con este ensayo podemos ver cómo influye la rugosidad superficial en probetas con tensiones residuales. Según vemos en la figura 11, obtenemos similares vidas tanto para shot peening pulido como para las probetas con shot peening y su característica rugosidad superficial, con lo que no se aprecia gran diferencia entre las vidas de los diferentes ensayos [4].

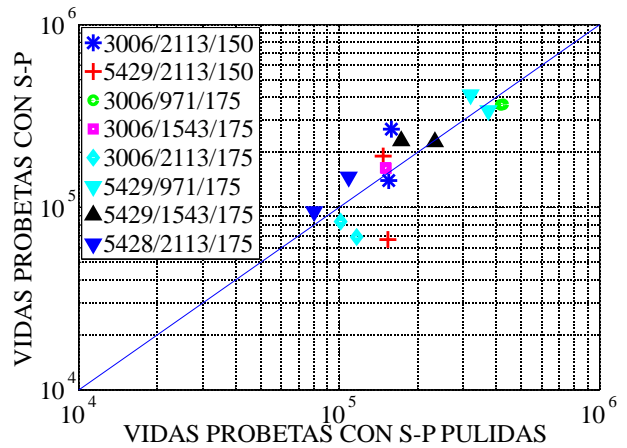


Figura 11. Vidas con probetas con shot peening frente a probetas con shot peening pulido.

### 3.3 Ensayos

En este apartado se exponen los resultados de las vidas para las probetas de referencia sin el tratamiento de shot peening en comparación a las probetas con shot peening. En la figura 12 podemos ver la mejora de la vida en tanto por ciento. En el eje de abscisas encontramos 4 tramos de carga axial que corresponde con las diferentes combinaciones de carga que en relación con la leyenda se pueden ver las fuerzas normales según el color y las fuerzas tangenciales según el símbolo utilizado.

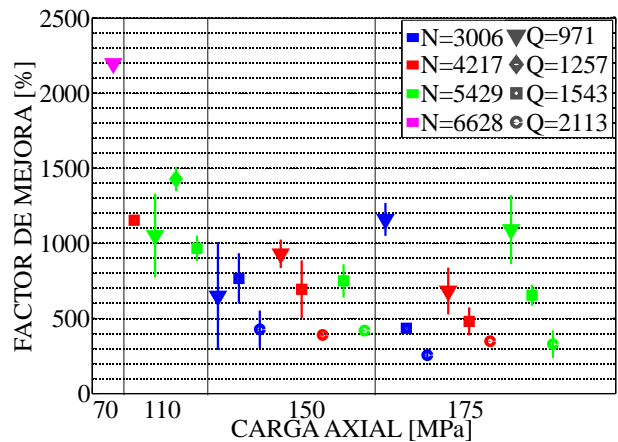


Figura 12. Porcentaje de mejora de vida para las probetas con shot peening según su carga axial.

El porcentaje de mejora comienza, en los casos menos relevantes, en un aumento de un 217% de vida con respecto a la vida sin shot peening. El caso donde mayor porcentaje de mejora se obtiene es con la combinación de menor carga axial,  $\sigma$ , y tangencial,  $Q$ , y la mayor carga normal,  $N$ . Esta combinación da un resultado del 2200% de mejora en la vida con respecto al caso sin shot peening, donde la probeta con shot peening alcanzó un run-out de 5000000 de ciclos y el ensayo paró. También se observa que fijando la carga axial,  $\sigma$ , y tangencial,  $Q$ , el porcentaje de mejora de vida aumenta conforme aumenta la carga normal.

## CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo se han constatado diversos hechos sobre la fatiga por fretting que se enumeran a continuación.

-Evaluando los diferentes valores obtenidos entre los dos métodos de medidas de tensiones residuales utilizados, se concluye que la difracción de rayos X tiene una mayor repetitividad en comparación con el método del agujero ciego. Ambos métodos difieren en la profundidad a la que alcanzan las máximas tensiones residuales, siendo éste un punto de interés.

-Para un estado de cargas bajo no se obtiene una correlación entre los ciclos de carga y la relajación de tensiones residuales. Con altos estados de carga se encuentran dificultades para la medición mediante difracción de rayos X a mucha profundidad, aunque si se obtiene una tendencia entre los ciclos de cargas aplicados y las tensiones residuales relajadas.

-Hemos comprobado que la rugosidad superficial es poco influyente en probetas con tensiones residuales de compresión. También hemos podido ver cómo influye negativamente en la vida una tensión residual de tracción.

-La mejora en la vida de probetas tratadas con shot peening en comparación al caso sin shot peening comienza en un 217% de mejora, llegando hasta un run-out en el que paramos el ensayo a 5m de ciclos donde se obtuvo un 2200% de mejora en comparación.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Junta de Andalucía por la financiación del proyecto código (P12-TEP-2632).

## REFERENCIAS

[1] R. B. Waterhouse, T. C. Lindley (Eds.). *Fretting Fatigue*, ESIS Publication 18, Mech. Eng. Publ, (1994).

[2] Boller CHR, Seeger T. Material data for cyclic loading-part D: aluminum and titanium alloys. Material science monographs. New York: Elsevier; (1987).

[3] R. Tam-Amaya, J. Vázquez, C. Navarro, J. Domínguez, Caracterización de una máquina para realizar ensayos de fretting fatiga con contacto cilíndrico, *Anales de Mecánica de Fractura* 28, Vol. 1, (2011) 323-328.

[4] J. Vázquez, C. Navarro, J. Domínguez, Analysis of the effect of a textured surface on fretting fatigue, *Wear and international journal on the science and*

*technology of friction lubrication and wear* 305, (2013) 23–35.

[5] AMS2430: Shot peening, automatic, SAE Standards, AMS B Finishes Processes and Fluids Committee, (2009).

[6] ISO4287: Surface texture: Profile method, Terms, definitions and surface texture parameters

[7] ISO4768: Determination of values of surface roughness parameters  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{ax}$  using electrical contact (stylus) instruments.

[8] C. Navarro, S. Muñoz, J. Domínguez, On the use of multiaxial fatigue criteria for fretting fatigue life assessment, *International Journal of Fatigue*, 2007, 30 (2008) 32–44.

[9] BU. Wittkowsky, PR. Birch, J. Domínguez, S. Suresh. An apparatus for quantitative fretting-fatigue testing. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* (1999) 22:307–20.

[10] C. S. Montross, T. Wei, L. Ye, G. Clark, and Y.-W. Mai, Laser Shock Processing and its Effects on Microstructure and Properties of Metal Alloys: a Review, *International Journal of Fatigue*, 24, pp. (2002); 1021-1036.

[11] T. Y. Tsui, W. C. Oliver, and G. M. Pharr, Influences of Stress on the Measurement of Mechanical Properties Using Nanoindentation: Part I. Experimental Studies in an Aluminum Alloy, *J Mater. Res.*, 11, (1995) pp. 752-759.

[12] ASTM E837: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage.

[13] UNE-EN 15305. Método de ensayo para el análisis de la tensión residual por difracción de rayos X.

[14] M.G. Moore, W.P. Evans, Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis. *SAE International*. 66; (1958) 340-345)

[15] V. Fontanari, F. Frenzo, Th. Bortolamedi1, and P. Scardil, Comparison of the hole-drilling and X-ray diffraction methods for measuring the residual stresses in shot-peened aluminium alloys, *The Journal Strain Analysis for Engineering Design*, (2004) pág. 199-209

[16] J. Vázquez, C. Navarro, J. Domínguez, Experimental results in fretting fatigue with shot and laser peened specimens. En: *Anales de Mecánica de la Fractura*. Vol. 27. (2010) Pag. 729-734