

MEJORA DE LA RESISTENCIA A FATIGA POR FRETTING CON EL TRATAMIENTO DE SHOT PEENING

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

RESUMEN

En aplicaciones de la industria se aplica el tratamiento superficial de shot peening para introducir tensiones residuales de compresión y así aumentar la vida a fatiga. Este tratamiento es tanto más efectivo cuanto mayor y más profundo sea el campo de tensiones de compresión. Este artículo estudia el caso de fatiga por fretting con contacto cilíndrico, donde se tiene una alta concentración de tensiones debido al contacto. Se realizaron una serie de ensayos de este tipo con una aleación de aluminio 7075-T651, donde algunas probetas estaban tratadas y otras no. En cada ensayo se aplicaban valores distintos de la carga axial, la carga tangencial y la normal en el contacto. La carga normal es constante y la tangencial y axial varían en fase. De esta forma se puede ver hasta qué punto es beneficioso el tratamiento de shot peening y en qué casos es más o menos efectivo. Por otro lado, se sabe que una superficie con una cierta textura, en el caso de fatiga por fretting, puede ser beneficiosa. Para analizar este efecto se ensayó un tercer grupo de probetas con una rugosidad distinta y sin shot peening. En este artículo se intenta cuantificar el efecto de estos dos factores en la resistencia a fatiga por fretting.

PALABRAS CLAVE: Fatiga por fretting, Contacto cilíndrico, Experimental, Shot peening.

ABSTRACT

In a high variety of industrial applications a shot peening surface treatment is used to introduce compressive residual stresses to increase fatigue life. This treatment is more effective when this stress field is high and deep. This paper analyses the case of fretting fatigue with cylindrical contact, which has a high concentration of stress due to the contact. A series of this kind of test with aluminium alloy 7075-T651 have been performed, with and without the surface treatment to compare the results. Each test has different values of axial, tangential and normal load. The normal load is constant, and the others vary cyclically in phase. In this way it is possible to compare what benefits has the surface treatment and when it is more effective. Furthermore, it is known that a textured surface can be beneficial in fretting fatigue. To analyse this, a third group of specimens with a different roughness and without shot peening was tested. This paper attempts to quantify the effect of these two elements on the fretting fatigue resistance.

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

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Fatiga por fretting

La fatiga por fretting es un tipo de fatiga donde dos piezas están en contacto mecánicamente. Una pieza de éstas tiende a deslizar parcialmente sobre la otra debido a los esfuerzos variables con el tiempo a los que están sometidas, los que provocan tensiones adicionales. Por esto, en la zona de contacto se pueden encontrar una serie de fenómenos como grietas superficiales o internas, desgaste y corrosión que pueden llegar a provocar la rotura del material después de una serie de ciclos con dichas cargas. Debido al contacto la iniciación de estas

grietas aparecen de una forma más rápida que en fatiga simple y causa el fallo de muchos componentes industriales que están sometidos a dichos esfuerzos [1].

Existen varios tipos de geometrías sencillas para reproducir en ensayos y estudiar este fenómeno. Se diferencian por el tipo de contacto, según sea este esférico, plano, cilíndrico, etc. El estudiado en el artículo será el contacto cilindro-plano. Se caracteriza por estar en contacto un plano con una tensión global aplicada y un contacto cilíndrico con una carga aplicada de forma normal al plano. Durante el ensayo la carga global supondrá la aparición de una carga tangencial en el contacto debido al montaje de los cilindros. La fuerza

tangencial variará de forma cíclica y estando en fase con la carga global.

1.2 Geometría de probetas y material

En la figura 1 se muestra la geometría de las probetas y los contactos utilizados para este tipo de ensayo. Durante el ensayo tendrán un contacto cilíndrico en cada uno de los lados de 8mm, llamados A y B. Todas las probetas y contactos están fabricados de aluminio 7075-T651 a partir de una barra maciza. Solo una parte de todas las probetas fabricadas se tratará superficialmente para estudiar el efecto del tratamiento. Las propiedades mecánicas del material están expuestas en la tabla 1.

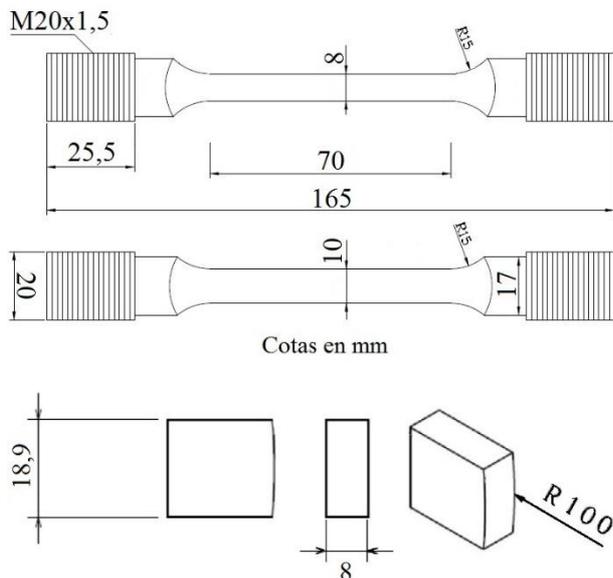


Figura 1. Geometría de probetas y contactos.

Tabla 1. Propiedades mecánicas Al 7075-T651

Propiedades estáticas		
Módulo de Young	E	71 GPa
Coef. Poisson	ν	0.33
Límite elástico	σ_y	503 MPa
Límite rotura	σ_u	572 MPa
Propiedades cíclicas		
Límite elástico	σ_y'	541 MPa
Coef. Endurec.	K'	694 MPa
Exp. Endurec.	n'	0.04
Coef. resist. fatiga	σ_f'	1231 MPa
Coef. duct. fatiga	ϵ_f	0.263
Exp. resist. fatiga	b	-0.122
Exp. duct. fatiga	c	-0.806

1.3 Dispositivo de ensayos

El dispositivo utilizado para la realización de estos ensayos está diseñado solo y únicamente para tal efecto [2]. Con controlador MTS y tarjeta de adquisición National Instruments se consigue reproducir la fatiga por fretting y guardar las cargas producidas durante cada ciclo del ensayo para un posterior estudio de las mismas. En la figura 2 se muestran en un esquema las fuerzas aplicadas y 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 un pistón servohidráulico longitudinalmente a la probeta. Las cargas Q se transmiten a través del sistema hasta los soportes ajustables. Éstos regulan la carga en función de la distancia que haya entre ellos. La fuerza tangencial y axial varían de forma senoidal y en fase, siendo la carga tangencial tanto más elevada cuanto más elevada sea la axial. Las cargas tangenciales máximas depende de la separación de los soportes y siendo el límite cuando $Q = \mu \cdot N$.

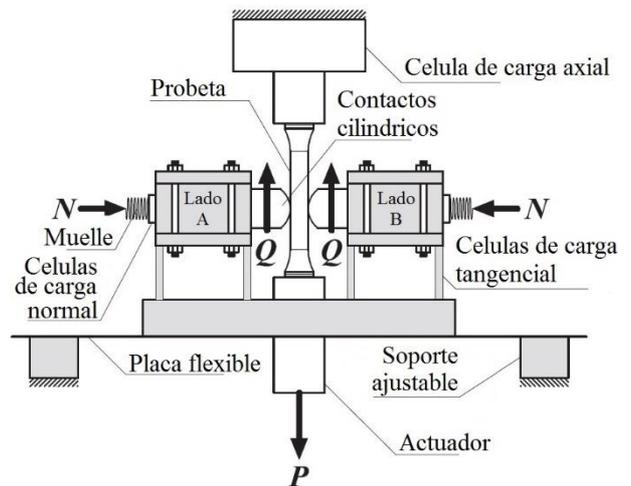


Figura 2. Esquema de máquina fatiga por fretting.

1.4 Tratamiento superficial

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 cerámicas o metálicas a alta velocidad que deforman el material plásticamente. Además este tratamiento deja una superficie con una textura la cual se sabe que puede ser beneficiosa para el caso específico de fatiga por fretting [3]. El tratamiento se realiza bajo norma la cual especifica la fuerza, trayectoria y diámetro de las bolas [4]. Este tratamiento solo se aplicará en las probetas. En la figura 3 se puede observar la deformación característica que deja el tratamiento en la superficie.

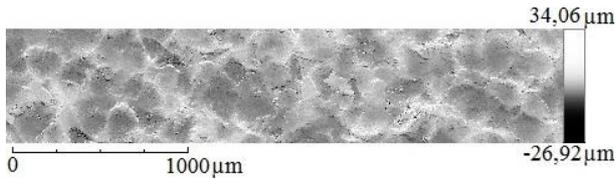


Figura 3. Superficie shot peening tipo 9A 230-H 90°.

1.5. Rugosidad

La rugosidad 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. Este debe ser analizado y medido para el estudio de la influencia de la rugosidad en las vidas de los ensayos a rotura. Además influye en el análisis de tensiones máximas producidas en el contacto por cargas aplicadas.

La rugosidad se ha medido en varias probetas de cada tipo de superficie para tener un promedio del valor obtenido. Este ensayo se realiza mediante dos métodos. Un rugosímetro Mitutoyo surfest-500 con rango 600µm, y cut-off 0.8, en el que se obtiene rugosidad media aritmética Ra, ISO 4287, el valor máximo pico-pico Ry, y la media de la alturas máximas en 5 tramos, Rz, ISO 4768. El segundo método es mediante un perfilómetro óptico 3D sin contacto que utiliza la técnica de variación de foco, marca Sensofar S-NEOX. Este último se utiliza para saber el perfil obtenido por el tratamiento superficial de shot peening y así comparar la rugosidad medida con el rugosímetro. También se toman medidas de los contactos cilíndricos y probetas sin tratamiento superficial para saber su estado.

Estos ensayos se dividirán en 3 grupos. El grupo 1 (G1) son probetas sin tratamiento superficial. El grupo 2 (G2) hace referencia a los resultados obtenidos en [5]. El grupo S-P es el tercer grupo donde las probetas tienen el tratamiento superficial de shot peening. La geometría y el material de las probetas y elementos de contactos era el mismo en los tres grupos de ensayo.

En la figura 4 se observan los perfiles de rugosidad obtenidas con el microscopio de variación de foco. Esta figura tiene dos partes, una primera donde se aprecia el mapa de colores que indica la altura de cada zona del estudio con respecto a un plano de referencia y se puede observar la forma obtenida por el proceso de mecanizado y tratamiento superficial. La segunda representa en una gráfica 2D el perfil superficial del elemento estudiado donde una línea celeste interseca con dicho mapa superficial. La medida se toma en tramos de 4 mm, al igual que el rugosímetro.

En la tabla 3 se pueden observar los resultados obtenidos de la rugosidad calculados con las gráficas anteriores en comparación con los obtenidos con el rugosímetro.

Tabla 3. Rugosidad medida en probetas y contactos de los grupos G1, G2 y S-P.

MEDICIÓN	Ra (µm)	Ry (µm)	Rz (µm)
Grupo 1	0.1	0.767	0.5
Grupo 2	1.2	10.2	9
Contactos Grupo 1	0.2	1.72	1.28
Contactos Grupo 2	1.5	16.1	11.2
SP Rugosímetro	5.6	37.2	29.3
SP Perfilómetro	5.1	38.1	27.3

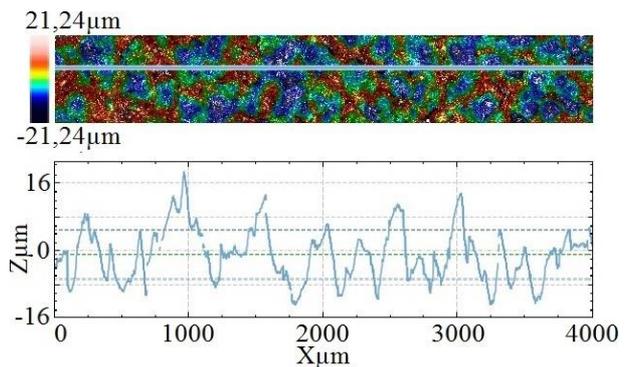


Figura 4. Perfilometría óptica en elementos del grupo S-P.

2. TENSIONES MÁXIMAS DE FRETTING TENSIONES RESIDUALES Y COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

En los siguientes apartados se expondrán los resultados de mediciones y análisis teóricos como preámbulo de los resultados de los ensayos de fatiga por fretting.

2.1. Tensiones máximas durante ensayos

En este apartado se realiza un estudio de las tensiones máximas superficiales en dirección axial que se obtienen teóricamente a partir de la combinación de todas las fuerzas que intervienen durante un ensayo. Esta tensión se utilizará para realizar una comparación de la tensión con respecto a las vidas de los ensayos realizados posteriormente. Para este cometido se han utilizado las expresiones teóricas mostradas en [6]. En la tabla 2 se ven los resultados obtenidos según las combinaciones de carga que se utilizaron en los grupos de ensayos. Estas tensiones máximas aparecen en el borde del contacto entre cilindro y plano. Se han utilizado para su cálculo el coeficiente de rozamiento de cada grupo, que se expondrán posteriormente. Los valores de las tensiones están medidos en MPa y N y Q en N/mm.

Tabla 2. σ_{xx}^{max} según las combinaciones de carga aplicadas y del grupo de probetas

	$N/Q/\sigma_a$	σ_{xx} G1	σ_{xx} G2	σ_{xx} S-P
1	828.6/121.4/70	474.16	465.34	496.84
2	527.1/192.9/110	591.77	581.04	619.34
3	678.6/192.9/110	600.79	589.87	628.88
4	678.6/157.1/110	563.37	553.22	589.55
5	678.6/124.4/110	526.61	517.21	550.8

2.2. Tensiones residuales

Para el grupo de probetas con shot peening se han realizado varios ensayos para la medición de la tensión inducida por el tratamiento superficial. Se han realizado dos tipos de ensayo, uno destructivo y otro no. El primero es mediante el sistema automático de medición de tensiones residuales marca SINT Technology que utiliza el método del agujero ciego. Éste se realiza, según la norma ASTM E837-13a (tensiones no uniformes) [7]. Con este método se consigue medir las tensiones hasta una profundidad de 1 mm. El segundo es mediante el método de difracción de rayos X, midiendo el ángulo de Bragg con el que el haz se refleja en el material. El ensayo se realizó con el equipo D8 Discover A25 de la marca Bruker utilizando un tubo de cobre, $K\alpha_1 = 1,5406 \text{ \AA}$; $K\alpha_2 = 1,5444 \text{ \AA}$ excitación a 40 kV y 40 mA y un detector de área Vantec500. En este último método solo se midió la tensión en la superficie. Estos métodos realizados arrojan los resultados expuestos en la figura 5.

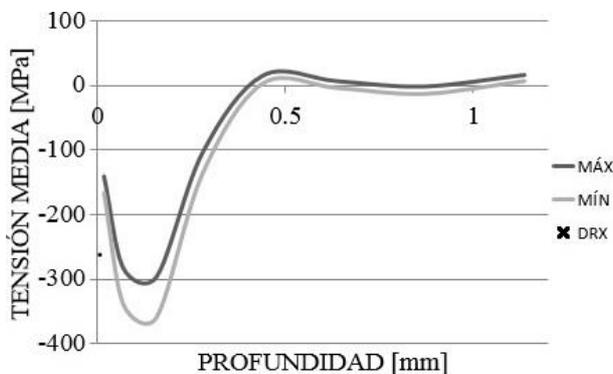


Figura 5. Comparativa tensión residual entre agujero ciego y DRX

En la gráfica 5 se aprecia el gradiente de tensiones según la profundidad obtenida con el agujero ciego. Los valores máximos y mínimos de la gráfica representan las tensiones principales con respecto a los ejes con los que se tomaron las medidas durante el ensayo del agujero ciego. Su similitud refleja que el tratamiento ha sido aplicado por igual en todas direcciones. El valor superficial obtenido con el método DRX aparece en la gráfica para su comparación. La diferencia del valor en la superficie se puede explicar por los diferentes métodos de obtención utilizados. La diferencia de resultados

observada según el método usado es acorde a las observadas en [8].

2.3. Coeficiente de rozamiento

El coeficiente de rozamiento se ha estudiado con una serie de probetas elegidas al azar de entre todas las fabricadas para tener una media de la medida. El método utilizado para la obtención del coeficiente es el aplicado en estudios anteriores y del que se tiene experiencia en el grupo para su realización [3]. Este método consiste en realizar un ensayo de fatiga por fretting aumentando la carga axial P progresivamente partiendo de un valor muy pequeño. Los contactos A y B tienen una carga normal de 1000 N. La figura 6 representa en una gráfica los datos obtenidos durante un ensayo en la que se relacionan los ciclos de carga con los valores máximos y mínimos del valor adimensional Q/N para cada ciclo. Este valor es el referente de la carga tangencial Q ya que la normal N es constante. Se diferencia entre lado A y B para la medición por separado de cada contacto. El rozamiento va aumentando ciclo tras ciclo. Hay instantes en los que el deslizamiento es global y la carga Q se ve caer bruscamente a un valor más bajo, que seguidamente retornará hacia valores más altos por el aumento del coeficiente de rozamiento por la fricción, volviendo al deslizamiento parcial. El ensayo termina cuando después de haber bajado Q bruscamente por entrar en deslizamiento global, el coeficiente de rozamiento ya no puede aumentar más y no se vuelve al deslizamiento parcial. Para este ensayo se toman 3 probetas de cada tipo y las medidas dan una media de todo el conjunto de probetas fabricadas. La tabla 4 muestra los valores promedios de los coeficientes de rozamiento medidos para los 3 tipos de probetas y en ambos lados, A y B.

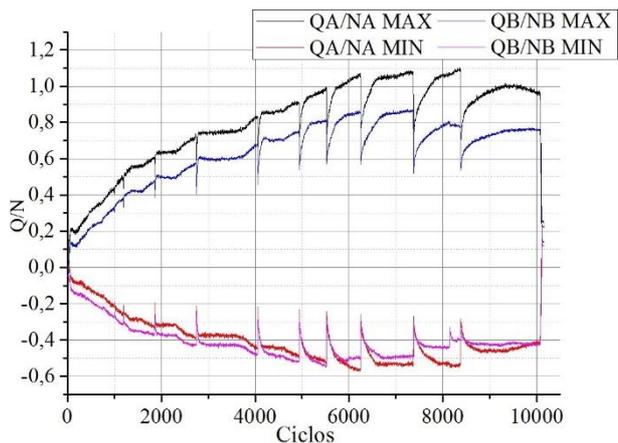


Figura 6. Ensayo coeficiente rozamiento de una probeta del grupo 1 para ambos lados A y B.

Tabla 5. Valor promedio de los coeficientes de rozamiento medidos para los 3 tipos de probetas

	Coef Roz G1	Coef Roz G2	Coef Roz SP
μ	0.75	0.72	0.83

3. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga por fretting para los diferentes tipos de probetas y sus acabados superficiales. Cada combinación de carga tiene dos ensayos en cada grupo, a menos que en el primero se obtenga límite de vida infinito. También se muestran las superficies de fractura y huellas de contactos obtenidas durante los ensayos.

3.1 Vida de los ensayos

La figura 7 representa de forma gráfica una comparación de las vidas obtenidas para las 5 combinaciones de carga mostradas en la tabla 2 y los 3 grupos de probetas.

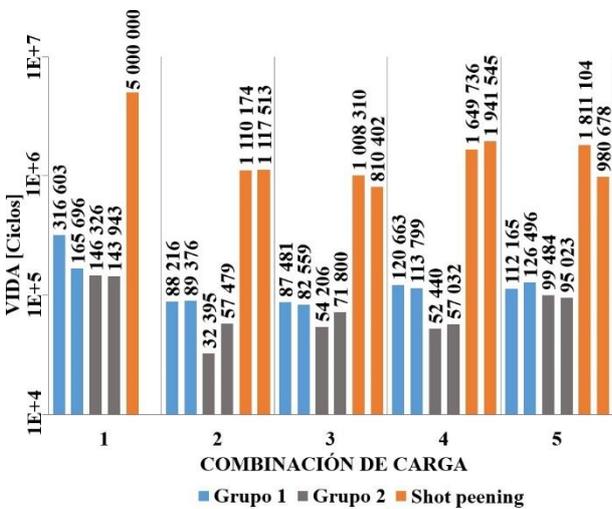


Figura 7. Vida experimental frente a combinación de cargas aplicadas según tabla 2.

La figura 8 representa la tensión máxima σ_{xx} en el contacto calculada en el apartado 2.1 para todas las combinaciones de carga. Estas tensiones se representan frente a la vida obtenida de forma experimental, dando lugar a tres grupos claramente separados

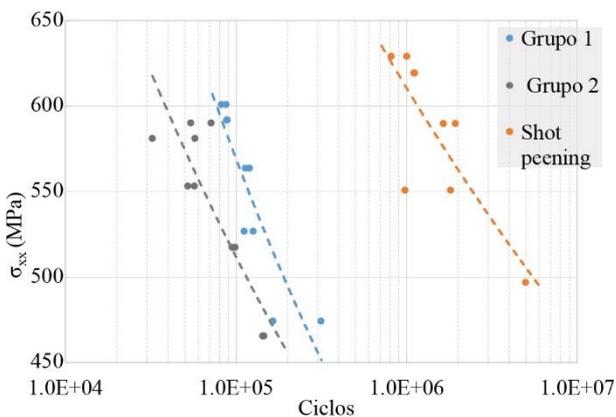


Figura 8. σ_{xx}^{max} frente a vida experimental.

3.2 Longitudes de grieta

De todos los ensayos realizados se han elegido aquellos con la combinación de carga 5 para estudiar las diferentes longitudes de grietas dependiendo del número ciclos aplicado. Se elige esta combinación por tener mayor número de ensayos y además ser dos de ellos interrumpidos para el estudio de los inicios de grieta. En la figura 9 se muestran las superficies de fractura de dos probetas ensayadas a fatiga hasta la rotura. La figura 10 muestra una imagen de la superficie de fractura de un ensayo interrumpido donde la probeta posteriormente se fracturó sometida a una carga de tracción por encima del límite de rotura del aluminio. La figura 11 es la superficie de fractura producida por una probeta del grupo 2 con la misma combinación de cargas. Estas grietas corresponden al lado de la probeta opuesto a la rotura por ser donde se diferencian mejor las grietas.

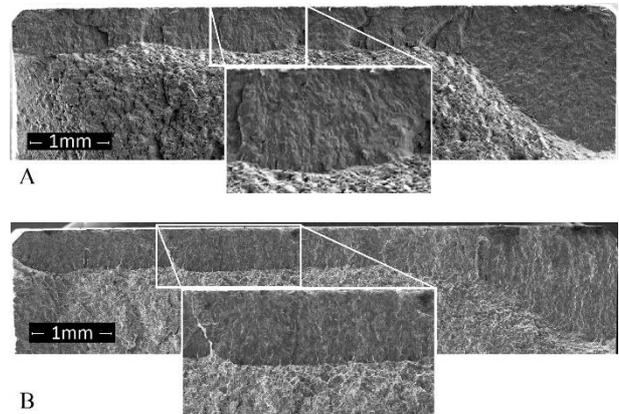


Figura 9. Probetas Grupo 1 y combinación de carga 5 hasta rotura. A) Probeta 1 con 112165 ciclos B) probeta 2 con 126496 ciclos.

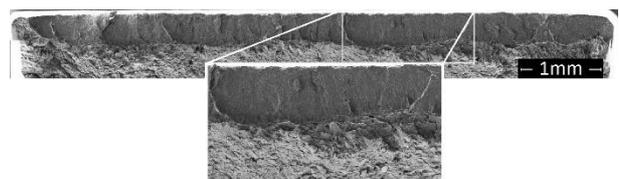


Figura 10. Probeta Grupo 1 y combinación 5. Ensayo interrumpido a los 93000 ciclos.

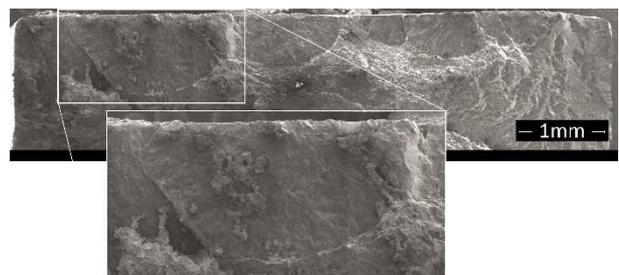


Figura 11. Probeta Grupo G2 y combinación 5 hasta rotura con 99484 ciclos.

Como se puede ver, el acabado superficial interviene en la vida de las probetas y en la forma de crecimiento de sus grietas. En las probetas del grupo G1 con mejor acabado superficial que las del grupo G2 se inician grietas a todo lo largo del contacto y alcanzan una longitud similar siendo prácticamente un frente recto. La probeta del grupo G2 tiene varias grietas perfectamente reconocibles y de diferentes tamaños, siendo estas más grandes e irregulares. Las grietas se han medido y representado en función de los ciclos obtenidos experimentalmente en la figura 12. Las probetas de ensayos interrumpidos tienen dos valores al tener un frente de grieta a cada lado. Las probetas de ensayos hasta rotura muestran la grieta que creció más lentamente, ya que la de la otra cara fue la que creció más rápidamente y dio lugar a la fractura final.

Esta figura muestra cómo en los ensayos del grupo 1 la grietas deben iniciarse prácticamente a la vez en ambos contactos dado que las longitudes son muy similares. Serían necesarios más ensayos de este tipo pero también se intuye que a medida que crecen la grietas, aunque se hayan iniciado a la vez, las longitudes a ambos lados van divergiendo hasta que la grieta que parte de uno de los contactos rompe la probeta. También se comprueba que en el grupo 2 las grietas eran más largas seguramente por haberse iniciado antes.

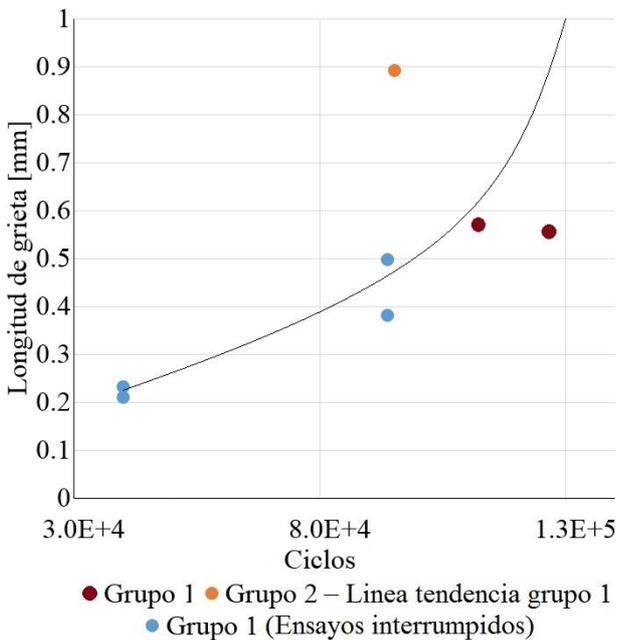


Figura 12. Longitud de grieta frente a vida en probeta del grupo G1 y G2 para combinación de carga 5.

3.3 Huellas del contacto

En las probetas ensayadas se observa que las huellas debidas al fretting cambian según el acabado superficial de estas. Denotan irregularidades como picos donde se producen mayores tensiones o rozamiento y quedan oscurecidos de forma más intensa. En las figuras 13, 14

y 15 se pueden ver las huellas producidas en los ensayos de los tres grupos con la misma combinación de cargas. El ancho de la huella varía dependiendo del coeficiente de rozamiento y de la rugosidad característica de cada probeta.

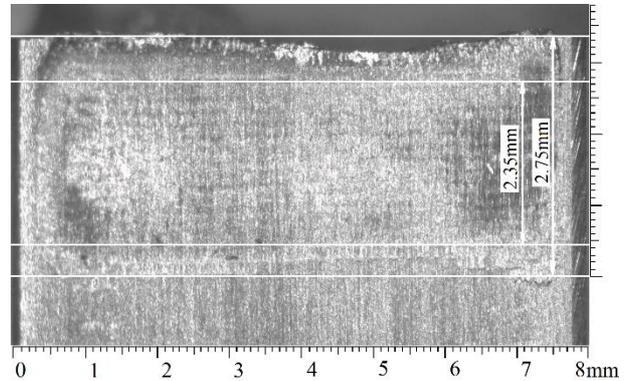


Figura 13. Huella del contacto en probeta del Grupo 1 y combinación de carga 5.

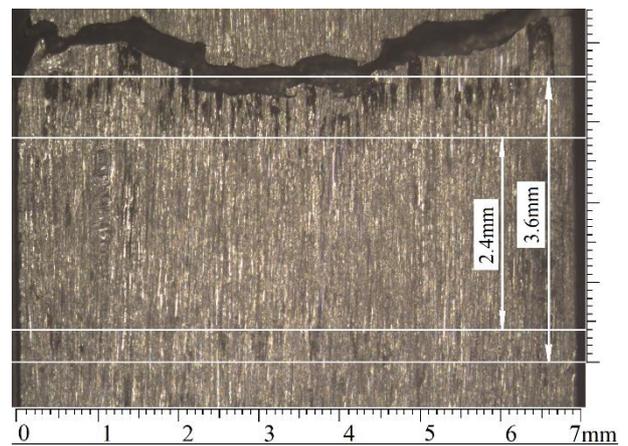


Figura 14. Huella del contacto en probeta del Grupo G2 y combinación de carga 5.

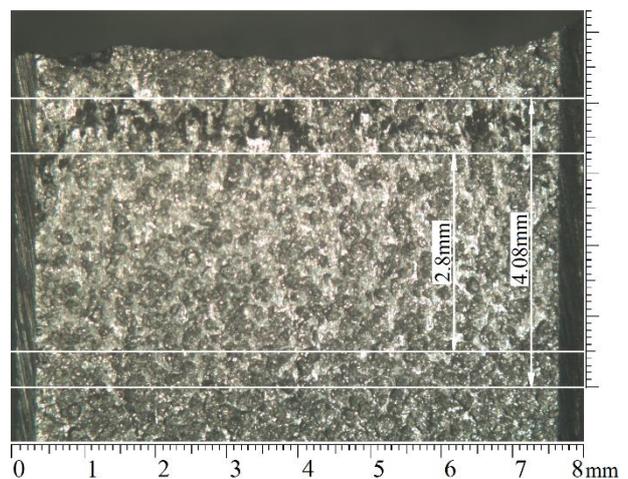


Figura 15. Huella del contacto en probeta del S-P y combinación de carga 5.

En la figura 16 se puede observar el factor de mejora en la vida a fatiga por fretting del grupo S-P con respecto al grupo 1. El número al lado de cada punto indica la combinación de cargas mostrada en la tabla 2. La vida a fatiga se aumenta en todos los casos en un factor mayor de 10, y en un caso por encima de 22 veces. Este último es el que se marca con una flecha hacia arriba indicando que en el ensayo con shotpeening se llegó a 5 millones de ciclos sin que se hubiera producido la rotura de la probeta, con lo que el factor de mejora es mayor todavía. En esta gráfica también se observa que el factor de mejora es mayor cuanto más alta es la vida en los ensayos sin shot peening.

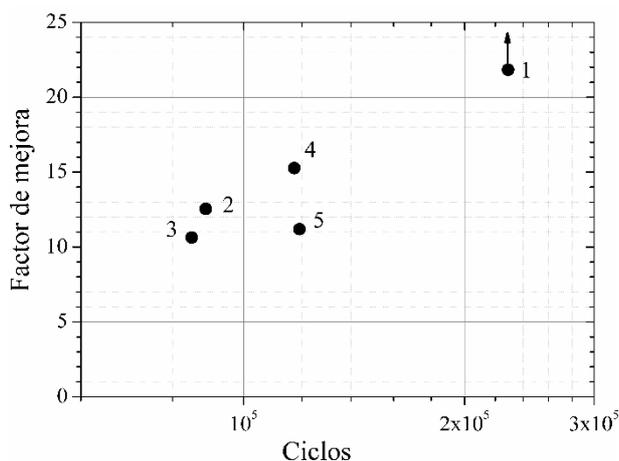


Figura 16. Factor de mejora del grupo S-P con respecto al G1. En cada punto se indica el número de la combinación de cargas utilizada.

4. CONCLUSIONES

La principal conclusión obtenida tras la realización de este trabajo es el considerable aumento en la vida a fatiga por fretting que produce el tratamiento superficial de shot peening.

Por otro lado se concluye que un mejor acabado superficial (menor rugosidad) también aumenta la vida, puesto que hay un reparto de tensiones mejor distribuido en toda la superficie del contacto. Esto se puede observar tanto en las vidas experimentales de los ensayos como en las fotografías de las huellas y las grietas, donde el grupo con mejor acabado superficial crea más grietas pero más pequeñas que el grupo con peor acabado superficial donde menos grietas se hacen más grandes e irregulares en menos ciclos.

Como continuación de este trabajo se realizará dos baterías de ensayos, una con shot peening en los que se aumentarán las cargas para así conseguir vidas más cortas y otra sin shot peening donde se reducirán y aumentarán las cargas para crear una curva de vidas. Así se podrá estudiar de forma más exhaustiva la superficie de fractura y límites de vida a fatiga por fretting.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación de la Junta de Andalucía y la Consejería de Economía y Conocimiento por la financiación del proyecto Nuevos Desarrollos para la Predicción de Vida a Fatiga por Fretting (P12-TEP-2632).

REFERENCIAS

- [1] R. B. Waterhouse, T. C. Lindley (Eds.). *Fretting Fatigue*,ESIS Publication 18, Mech. Eng. Publ, 1994.
- [2] 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, 323-328, 2011.
- [3] 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, 23–35, 2013.
- [4] AMS-2430: Shot peening, automatic, SAE Standards, AMS B Finishes Processes And Fluids Committee, 2009.
- [5] R. Tam-Amaya, J. Vázquez, C. Navarro, J. Domínguez, Ensayos y estimación de vida en fatiga por fretting con contacto cilíndrico. *Grupo Español de Fractura*, Vol. 1, 159, 2012
- [6] D. Nowell, D.A. Hills, Mechanics of fretting fatigue tests, *Ins. J. Mech. Sci.* Vol. 29, No. 5, 355-365, 1987.
- [7] ASTM E837-13a (tensiones no uniformes), Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.
- [8] F. A. Kandil, J. D. Lord, A. T. Fry, P. V. Grant, Review of Residual Stress Measurement Methods, *A guide to technique selection*, 2001.