

# Trabajo Fin de Master

## Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

### Mejora de la Resistencia a Fatiga por Fretting con el Tratamiento de Shot Peening

Autor: Vicente Martín Rodríguez

Tutores: Jesús Vázquez Valeo

Carlos Navarro Pintado

**Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Master  
Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

# **Mejora de la Resistencia a Fatiga por Fretting con el Tratamiento de Shot Peening**

Autor:

Vicente Martín Rodríguez

Tutores:

Jesús Vázquez Valeo

Carlos Navarro Pintado

Profesores titulares

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Master: Mejora de la Resistencia a Fatiga por Fretting con el Tratamiento de Shot Peening

Autor: Vicente Martín Rodríguez

Tutores: Jesús Vázquez Valeo  
Carlos Navarro Pintado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*



# 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).

A los tutores y director de tesis por el tiempo prestado a la labor de investigación que así me han otorgado. A familiares y amigos por el apoyo incondicional. A compañeros y compañeras de trabajo por la ayuda mutua prestada en todo este tiempo. Gracias.

*Vicente Martín Rodríguez*

*Sevilla, 2017*



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.





# 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.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xxi</b>
<b>Notación</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes históricos	1
<b>2 Fretting Fatiga</b>	<b>5</b>
2.1. Fretting Fatiga	5
2.1.1 Formas de reproducir el fenómeno en un laboratorio	5
2.1.2 Geometría y material de las probetas y contactos	6
2.1.3 Dispositivo de ensayos	7
2.1.4 Tratamiento superficial	8
2.1.5 Rugosidad característica	8
2.1.6 Tensiones residuales	10
2.1.7 Coeficiente de rozamiento	10
2.1.8 Caracterización de la rugosidad superficial	11
2.2. <i>Tensiones máximas en los ensayos</i>	13
<b>3 Resultados</b>	<b>15</b>
3.1. Vida a fatiga por fretting	15
3.2. Longitudes de grietas	16
3.3. Tamaños de huellas de contacto	24
<b>4 Conclusiones</b>	<b>38</b>
<b>5 Anexos</b>	<b>47</b>
<b>Referencias</b>	<b>40</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Unión eje cubo, álabe de rotor y roblonada. ....	11
Figura 2-1. Esquema ensayo fretting fatiga. ....	13
Figura 2-2. Geometría de probetas y contactos. ....	14
Figura 2-3. Esquema del dispositivo de fretting fatiga. ....	15
Figura 2-4 Superficie característica del shot peening tipo 9A 230-H 90° .....	16
Figura 2-5. Perfilometría óptica en elementos del grupo S-P. ....	18
Figura 2-6. Comparativa tensión residual entre agujero ciego y superficial mediante DRX	19
Figura 2-7. Ensayo coeficiente rozamiento de una probeta del grupo 1 para ambos lados A y B.	20
Figura 2-8. Perfil 1 obtenido con el método de variación de foco .....	21
Figura 2-9. Perfil 2 obtenido con el método variación de foco .....	21
Figura 2-10. Perfil 3 obtenido con el método variación de foco. ....	22
Figura 3-1. Vida experimental frente a combinación de cargas aplicadas según tabla 2-4.	25
Figura 3-2. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 1 .....	26
Figura 3-3. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 2. ....	26
Figura 3-4. Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 2 .....	26
Figura 3-5. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 3 .....	27
Figura 3-6. Ausencia de grietas en 2 probetas con shot peening y combinación 3	27
Figura 3-7. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 4 .....	27
Figura 3-8. Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 4. ....	28
Figura 3-9. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 5 .....	28
Figura 3-10. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 5, ensayo interrumpido a los 94000 ciclos	28
Figura 3-11. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 5, ensayo interrumpido a los 40000 ciclos.	29
Figura 3-12. Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 5 .....	29
Figura 3-13. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 6 .....	29
Figura 3-14. Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 6 .....	30
Figura 3-15. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 7 .....	30
Figura 3-16. Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 7 .....	30
Figura 3-17. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 8 .....	31
Figura 3-18. Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 8 .....	31
Figura 3-19. Longitud de grietas frente a ciclos de vida.....	32
Figura 3-20. Probetas Grupo 1 y combinación de carga 5 hasta rotura. A) Probeta 1 con 112165 ciclos	33
Figura 3-21. Probeta Grupo 1 y combinación 5. Ensayo interrumpido a los 93000 ciclos	33
Figura 3-22. Probeta Grupo G2 y combinación 5 hasta rotura con 99484 ciclos .	33
Figura 3-23 Longitud de grieta frente a vida en probeta del grupo G1 y G2 para combinación de carga 5	34
Figura 3-24 Contactos de probeta con shot peening y combinación 1 .....	35
Figura 3-25 Contactos en probetas lisas y combinación 1 .....	35

Figura 3-26 Contactos de probetas lisas y combinación 1 .....	35
Figura 3-27 Contactos de probetas con shot peening y combinación 2 .....	36
Figura 3-28 Contactos de probetas con shot peening y combinación 2 .....	36
Figura 3-29 Contactos en probetas lisas y combinación 2 .....	36
Figura 3-30 Contactos en probetas lisas y combinación 2 .....	37
Figura 3-31 Contactos en probetas con shot peening y combinación 3 .....	37
Figura 3-32 Contactos en probetas con shot peening y combinación 3 .....	37
Figura 3-33 Contactos en probetas lisas y combinación 3 .....	38
Figura 3-34 Contactos en probetas lisas y combinación 3 .....	38
Figura 3-35 Contactos en probetas con shot peening y combinación 4 .....	38
Figura 3-36 Contactos en probetas con shot peening y combinación 4 .....	39
Figura 3-37 Contactos en probetas lisas y combinación 4 .....	39
Figura 3-38 Contactos en probetas lisas y combinación 4 .....	39
Figura 3-39 Contactos en probetas con shot peening y combinación 5 .....	40
Figura 3-40 Contactos en probetas con shot peening y combinación 5 .....	40
Figura 3-41 Contactos en probetas lisas y combinación 5 .....	40
Figura 3-42 Contactos en probetas lisas y combinación 5 .....	41
Figura 3-43 Contactos en probetas lisas y combinación 5 .....	41
Figura 3-44 Contactos en probetas lisas y combinación 5 .....	41
Figura 3-45 Contactos en probetas con shot peening y combinación 6 .....	42
Figura 3-46 Contactos en probetas con shot peening y combinación 6 .....	42
Figura 3-47 Contactos en probetas con shot peening y combinación 6 .....	42
Figura 3-48 Contactos en probetas con shot peening y combinación 6 .....	43
Figura 3-49 Contactos en probetas con shot peening y combinación 7 .....	43
Figura 3-50 Contactos en probetas con shot peening y combinación 7 .....	43
Figura 3-51 Contactos en probetas lisas y combinación 7 .....	44
Figura 3-52 Contactos en probetas lisas y combinación 7 .....	44
Figura 3-53 Contactos en probetas con shot peening y combinación 8 .....	44
Figura 3-54 Contactos en probetas lisas y combinación 8 .....	45
Figura 3-55 Contactos en probetas lisas y combinación 8 .....	45
Figura 3-56 Contactos en probetas lisas y combinación 8 .....	45
Figura 3-57 Gráfica comparativa tamaño huella teoría y experimental .....	46
Figura 4-1. Fotografía prueba de ensayo correlación digital de imágenes	46
Figura 4-2. Esquema ensayo flexión 4 puntos	47
Figura 4-3. Ángulo de Bragg observado con un difractómetro de rayos X	48







# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 2-1. Propiedades mecánicas Al 7075-T651</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2-2. Rugosidad medida en probetas y contactos de los grupos G1, G2 y S-P.</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2-3. Valor promedio de los coeficientes de rozamiento medidos para los 3 tipos de probetas</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2-4. <math>\sigma_{xx}^{max}</math> Según las combinaciones de carga aplicadas y del grupo de probetas</i>	<i>24</i>



$A^*$	Conjugado
c.t.p.	En casi todos los puntos
c.q.d.	Como queríamos demostrar
■	Como queríamos demostrar
e.o.c.	En cualquier otro caso
e	número e
Re	Parte real
Im	Parte imaginaria
sen	Función seno
tg	Función tangente
arctg	Función arco tangente
sen	Función seno
$\sin^x y$	Función seno de $x$ elevado a $y$
$\cos^x y$	Función coseno de $x$ elevado a $y$
Sa	Función sampling
sgn	Función signo
rect	Función rectángulo
Sinc	Función sinc
$\partial y \partial x$	Derivada parcial de $y$ respecto
$x^\circ$	Notación de grado, $x$ grados.
$\Pr(A)$	Probabilidad del suceso $A$
SNR	Signal-to-noise ratio
MSE	Minimum square error
:	Tal que
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
\	Backslash
$\Leftrightarrow$	Si y sólo si



# 1 INTRODUCCIÓN

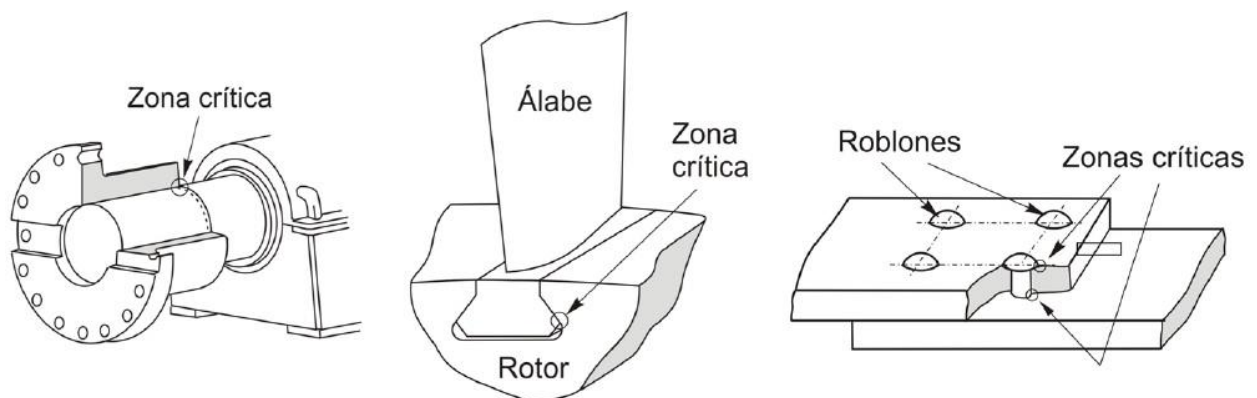
*La pereza anda tan despacio que la pobreza no tarda en alcanzarla.*

*- Benjamin Franklin -*

Este trabajo fin de master va relacionado al proyecto de investigación con el nombre Nuevos Métodos de Predicción de Vida a Fatiga por Fretting subvencionado por la Junta de Andalucía con el código (P12-TEP-2632). Uno de los objetivos principales del trabajo son una serie de ensayos de laboratorio para el estudio de la vida con fretting fatiga según los estados de carga aplicados, las características de las probetas y condiciones del material. Además se caracterizará con diferentes tipos de ensayos y de forma independiente el coeficiente de rozamiento, la influencia de la rugosidad superficial y las tensiones residuales introducidas por el efecto del shot peening. Las probetas son tratadas superficialmente con un tratamiento de shot peening el cual introduce estas tensiones residuales de compresión en el material además de una rugosidad producida por la deformación plástica que produce el granallado utilizado en el tratamiento.

Este trabajo fin de master es una parte de los ensayos necesarios para la finalidad del proyecto global. Este tiene la finalidad de desarrollar nuevos métodos para la predicción de vida a fatiga por fretting. Estos ensayos se explicaran detalladamente en los siguientes apartados. Habrá casos en los que se realizaran ensayos similares para contrastar los resultados obtenidos por dos vías diferentes de estudio. Posteriormente se expondrán los resultados obtenidos.

La fatiga es una de las primeras causas de fallos en una gran cantidad de componentes industriales como: uniones atornilladas o roblonadas, álabes de turbinas, uniones de eje, cables metálicos trenzados, rotores de generadores, rodamientos, implantes dentales. Esto es debido a la aplicación de cargas cíclicas que causan el daño prematuro de las piezas. Por ello se estudian de forma exhaustiva formas y métodos de paliar la rotura de componentes debido al fretting fatiga.



*Figura 1-1: Unión eje cubo, álabe de rotor y roblonada.*

Dentro de la fatiga de materiales se diferencia la fatiga por fretting que 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, además de las tensiones constantes debidas al propio contacto y una tensión global oscilatoria que tenga uno de los componentes. Por esto, en la zona de contacto se pueden encontrar una serie de fenómenos como grietas superficiales, grietas internas, desgaste de la zona en contacto y corrosión. Estos fenómenos pueden llegar a provocar la rotura de los componentes después de una serie de ciclos de la carga global. Debido al contacto la iniciación de estas grietas aparecen de una forma más rápida que en fatiga simple ante el mismo valor de tensión global. El fallo de muchos componentes industriales que están sometidos a dichos esfuerzos es debido a que las fuerzas del contacto actúan de forma parecida al de los concentradores de tensión.

## 1. Antecedentes históricos.

Partiendo de que el fretting fatiga es un tipo específico de fatiga simple. Los primeros estudios de fatiga simple comenzaron sobre el 1829 con el alemán W.A.J. Albert [1], Poncelet 1839 y Braithwaite (1854) utilizaron por primera vez el término fatiga. Entre 1850 y 1870, Wöhler [2], que trabajaba en la industria ferroviaria, realizó una serie de ensayos con los que consiguió relacionar las cargas aplicadas con el número de ciclos hasta la rotura, introduciendo los conceptos de curva S-N y el límite de fatiga. Estos ensayos los realizó en una máquina de flexión rotativa que construyó para reproducir el fenómeno.

En particular sobre fretting fatiga uno de los primeros documentos que se conoce data de 1911 de los autores Eden, Rose y Cunningham [3], que observaron la corrosión en forma de óxido que se formaba en las mordazas que sujetaban las probetas para ensayos de fatiga. Posteriormente a Eden et al., en 1924 Gillet y Mack [4] mostraron en un trabajo la reducción considerable de vida a fatiga de estas mordazas. En 1927 Tomlinson [5] realizó de forma exhaustiva una investigación sobre el suceso. Utilizó máquinas donde inducía pequeños desplazamientos relativos entre las piezas en contacto y en donde se producía fretting corrosión. Efecto que distinguía el propio autor de la corrosión que comúnmente se conoce, la cual es un efecto químico del material. Estos desplazamientos relativos eran muy pequeños y el autor los relacionó estrechamente con el fretting. En 1935 Peterson [6] realizó un estudio de uniones eje-cubo en la empresa eléctrica Westinghouse donde detecta el fallo por este hecho en las uniones. En 1937, Almen [7] estudia la corrosión en los rodamientos de automóviles en su transporte por ferrocarril. Esto se debía a que eran transportados sin neumáticos que amortiguaran las vibraciones producidas por el tren en su trayecto por Estados Unidos. En 1939, Tomlinson et al. [8] continua su trabajo anteriormente mencionado donde la conclusión era que el efecto era mecánico asociado al desplazamiento micrométrico que existía aunque no concluía la reducción de vida. En 1941, Warlow-Davies [9] realizó una serie de ensayos mixtos en los que primeramente ensayaba fretting fatiga y posteriormente simplemente a fatiga hasta que rompieran las probetas de acero. Este tipo de ensayo redujo la vida entre un 13% y un 17% en comparación de haber sido fatiga pura. Godfrey [10] en 1950 concluyó en su trabajo microscópico que además de la corrosión de las partículas desprendidas había adhesión en la zona del contacto. El mismo año, Bowden y Tabor [11] se publicó la primera parte del libro *The Friction and Lubrication of Solids*, que trata el fenómeno de corrosión por fretting. McDowell [12], en 1953, reafirmó el trabajo realizado años antes por Warlow y Davies, donde concluyó que la acción conjunta de fretting y fatiga reducía la vida mucho más que la acción únicamente del fretting. Esta situación es muy usual. Se producían reducciones del límite de fatiga de entre 2 y 5 veces o más. En 1954, Uhlig y Ming Feng [13], realizaron ensayos de fretting wear donde Uhlig [14] propuso un mecanismo de desgaste combinando factores mecánicos y químicos. El autor exponía que la oxidación y posterior eliminación del óxido por el contacto hacía que nuevo material quedase expuesto a la oxidación. Donde además ese desprendimiento de óxido producía una erosión. En 1960, Fenner y Field [15] trabajaron en el daño producido por el fretting, siendo dos de los pioneros en utilizar un puente para poner dos superficies planas en contacto con la probeta.

## 2 PROBLEMA DE LA FATIGA

### 2.1. Fretting fatiga

#### 2.1.1 Formas de reproducir el fenómeno en un laboratorio

Existen varios tipos de geometrías sencillas para reproducir mediante ensayos de laboratorio lo ocurrido durante el proceso de fretting fatiga y estudiar así este fenómeno obteniendo datos durante dichos ensayos. Estos tipos de ensayos se diferencian básicamente por el tipo de contacto que tienen, según sea el contacto una esfera, un plano o un cilíndrico contra un plano o un eje con un cubo, etc. Además estos son económicos para su fabricación, de fácil montaje y de fácil análisis teórico de las tensiones y deformaciones, aunque no representen fielmente la realidad. Obteniendo conclusiones de estos ensayos sencillos se podrán extrapolar a casos reales. Sabiendo esto el tipo de contacto que se reproducirá en este trabajo será el contacto cilindro-plano. Se caracteriza por estar en contacto un plano con una tensión global oscilatoria aplicada y un contacto cilíndrico con una carga constante aplicada de forma normal al plano que mantiene unidas las dos piezas. Debido a la carga global aparecerá en el contacto una carga tangencial de dirección contraria debido al montaje de los cilindros y a la deformación de la probeta. Esta fuerza tangencial variará de forma cíclica y estando en fase con la carga global. En la figura 2-1 se aprecia un esquema simple de las fuerzas que actúan en un ensayo de laboratorio de fretting fatiga donde las principales cargas son N, Q y P.

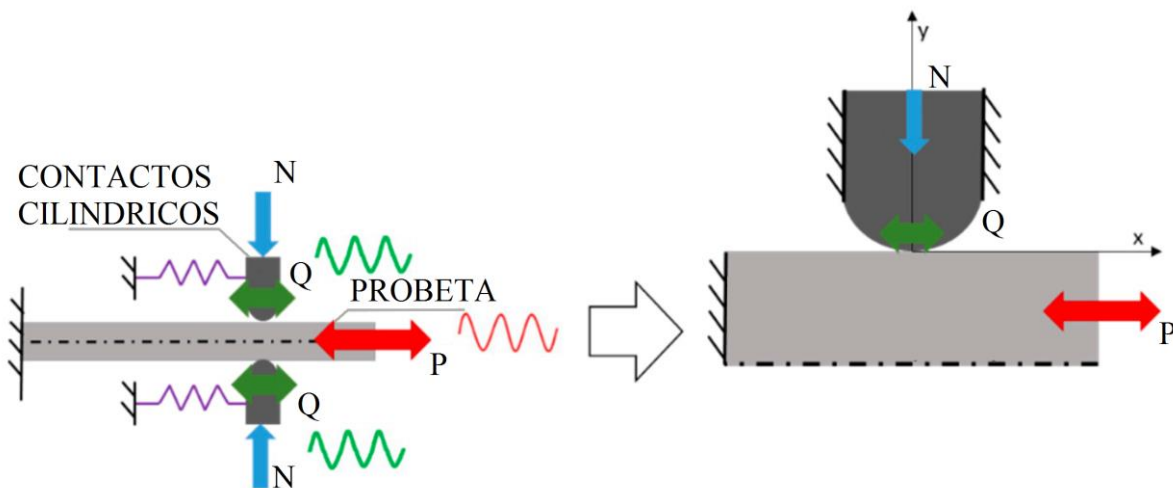


Figura 2-1. Esquema ensayo fretting fatiga.

#### 2.1.2 Geometría y material de las probetas y contactos

En el grupo de investigación se han realizado con anterioridad trabajos exhaustivos del contacto esférico. También se han estudiado casos de contacto cilíndrico de los que utilizaremos los resultados para contrastar con

los obtenidos en este que trabajo posteriormente. Así se podrán comparar las características que intervenían en cada trabajo y poder obtener una comparativa de los resultados.

En la figura 2-2 se observa la geometría tanto de las probetas, como de los contactos cilíndricos utilizados para este tipo de ensayo. El material elegido para esta vía de investigación ha sido el aluminio de la serie 7, más específicamente el modelo con tratamiento térmico 7075-T651 del cual podemos ver las características mecánicas estáticas y cíclicas en la tabla 1. Uno de los motivos por los que se ha elegido este material es por la fuerte aparición en la industria aeroespacial donde la mayor parte de sus componentes trabajan a fatiga. Durante el ensayo la probeta de sección rectángula de 8x10mm tendrá un contacto cilíndrico de radio 100mm en cada uno de los lados de 8mm, llamados A y B. Todas las probetas y contactos están fabricados en aluminio 7075-T651 y a partir de una barra maciza. Solo una parte de todas las probetas fabricadas se tratará superficialmente para estudiar el efecto del tratamiento de shot peening en comparación con probetas sin dicho tratamiento. Posteriormente se estudiarán las características que induce este tratamiento y se intentará caracterizar por separado.

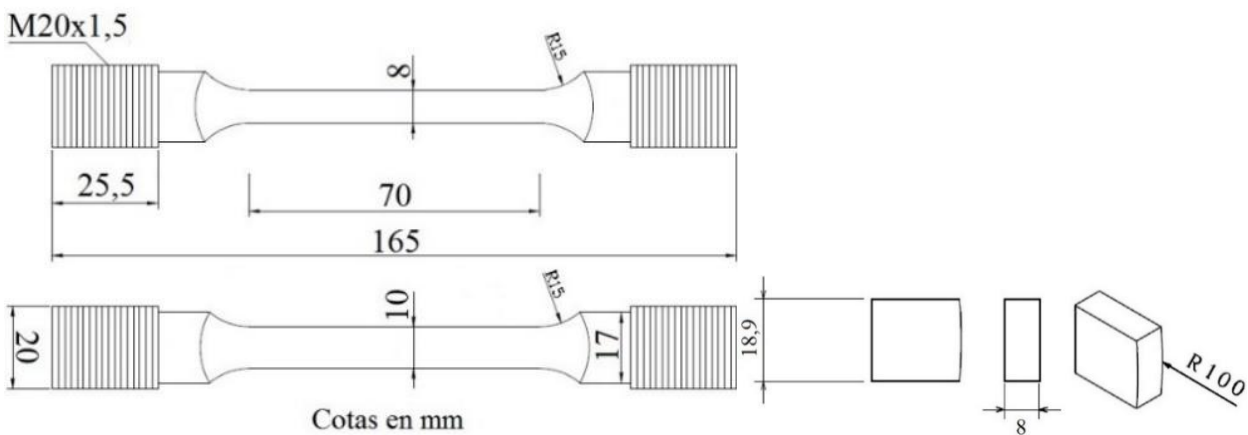


Figura 2-2. Geometría de probetas y contactos

Tabla 2-1. Propiedades mecánicas Al 7075-T651

Propiedades estáticas		
Módulo de Young	$E$	71 GPa
Coef. Poisson	$\nu$	0.33
Límite elástico	$\sigma_y$	503 MPa
Límite rotura	$\sigma_u$	572 MPa
Propiedades cíclicas		
Límite elástico	$\sigma_y'$	541 MPa
Coef. Endurec.	$K'$	694 MPa
Exp. Endurec.	$n'$	0.04
Coef. resist. fatiga	$\sigma_f'$	1231 MPa
Coef. duct. fatiga	$\epsilon_f$	0.263
Exp. resist. fatiga	$b$	-0.122
Exp. duct. fatiga	$c$	-0.806



### 2.1.3 El dispositivo de ensayos

El dispositivo utilizado para la realización de estos ensayos se diseñó para que un pistón servohidráulico ejerciera una tensión global a la probeta de forma longitudinal a esta. Un puente de fretting es el encargado de soportar los contactos cilíndricos a los laterales de la probeta y poder ejercer con ellos una fuerza normal al plano de la probeta y además soportar las cargas tangenciales que aparecen debido a las tensión global [16].

En la figura 2-3 se muestran en un esquema del dispositivo las fuerzas aplicadas y que intervienen durante un ensayo. Estas cargas son las siguientes: las primeras en actuar sobre la probeta son las cargas normales  $N$  transmitidas a través de un muelle para que sean constantes durante todo el ensayo, además de evitar la separación de los contactos, crean un estado de tensiones normales a la superficie que se pueden calcular de forma analítica mediante la teoría de Hertz [24]. La carga  $P$  es aplicada por el pistón servo-hidráulico, cuyo eje longitudinal coincide con el de la probeta. Un controlador de servo válvulas actúa sobre el pistón haciendo que aplique esta carga  $P$  de forma cíclica y senoidal. Posteriormente, las cargas tangenciales  $Q$  aparecen como consecuencia de la axial  $P$  y debido al rozamiento entre los contactos y la probeta. El puente donde están acoplados los contactos ejerce una fuerza a través de ellos y de dirección contraria a la carga  $P$ . Estas cargas  $Q$  se transmiten a través de dicho puente hasta los soportes ajustables. Estos soportes regulan la carga  $Q$  en función de la distancia que haya entre ellos. Las fuerzas tangenciales  $Q$  y axial  $P$  varían de forma senoidal y están 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, la flexibilidad de estos y el coeficiente de rozamiento, siendo el límite máximo cuando  $Q = \mu \cdot N$ . Con varias células de carga se consigue extraer datos a través de una tarjeta de adquisición para guardar las cargas producidas durante cada ciclo del ensayo. La combinación de estas cargas formará un estado de tensiones en la probeta y podrán producir la rotura de esta.

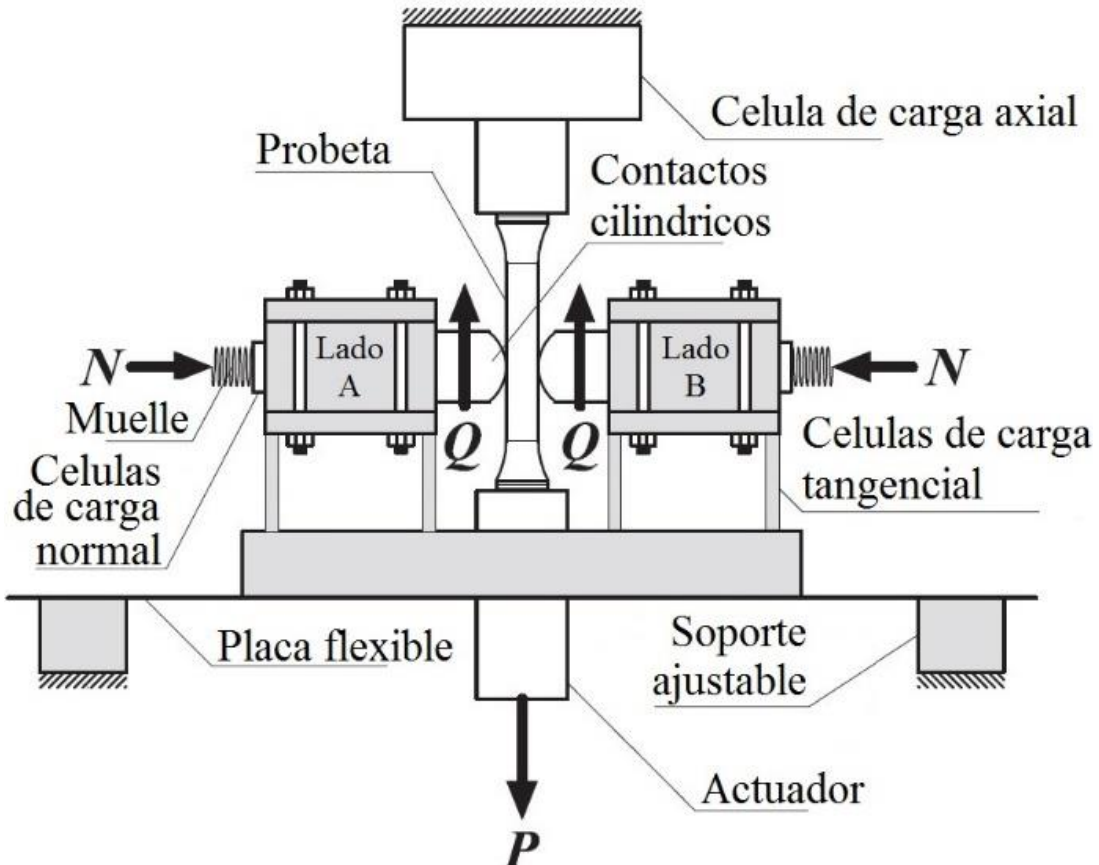


Figura 2-3. Esquema del dispositivo de fretting fatiga.

### 2.1.4 Tratamiento superficial

En muchas aplicaciones de la industria en la que aparece el efecto de la fatiga se aplican diferentes tratamientos superficiales para evitar la pronta aparición de grietas en la superficie y alargar la vida de estas piezas. Este método es ampliamente utilizado en la industria aeronáutica por su sencillez. Estos tratamientos inducen ciertas características al material. Algunos tratamientos utilizados tratan de alterar la capa superficial mediante tensiones residuales de compresión y pueden ser tales como el láser peening, roll peening o el tratamiento superficial aquí estudiado de shot peening. Este tratamiento introduce las tensiones residuales de compresión en la superficie del material tratado teniendo más o menos profundidad según el tratamiento y las condiciones de este. El shot peening se realiza mediante el impacto de pequeñas bolas cerámicas o metálicas a alta velocidad y con cierto ángulo, dejando una huella de deformación plástica en el material. Dependiendo del tipo de shot peening estas bolas pueden ser de mayor o menor tamaño y ser diferente la velocidad de impacto. Estas huellas producidas por los impactos dejan la superficie con una textura que se sabe es beneficiosa para el caso específico de fatiga por fretting [17]. El tratamiento se realiza bajo norma que especifica la fuerza, trayectoria y diámetro de las bolas [18]. Este tratamiento solo se aplicará en las probetas y no así en los contactos. Este tratamiento es calificado como 9A-230H-90° donde 9A significa un solo bombardeo 230H es la dureza de la bola, y 90 son los grados a los que se bombardea la superficie. Este tratamiento se aplica al 100% de la superficie. En la figura 2-4 se puede observar un esquema del proceso de bombardeo y como el material actúa en compresión frente a la deformación plástica. También se observa en la parte inferior de la imagen la rugosidad característica que deja el tratamiento en la superficie.

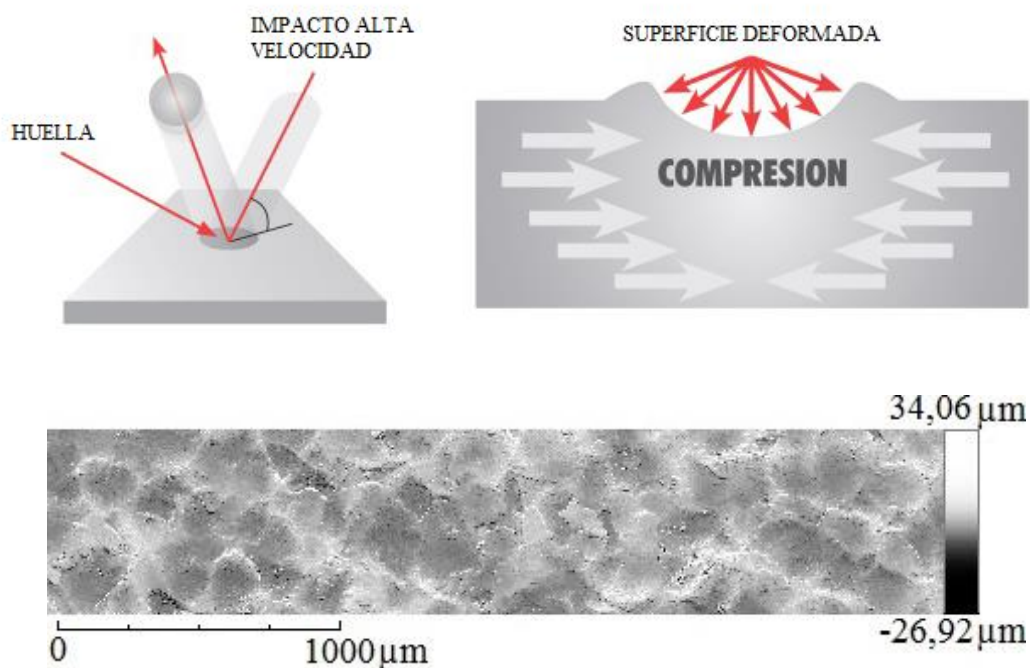


Figura 2-4 Esquema tratamiento y Superficie característica del shot peening tipo 9A 230-H 90°.

### 2.1.5 Rugosidad característica

La definición teórica de 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 hecho debe ser analizado y medido para el estudio de la influencia de la rugosidad en la vida de los ensayos a rotura. Además influye en el análisis de tensiones máximas producidas en el contacto por cargas aplicadas ya que la distribución de cargas cambia dependiendo la regularidad de la superficie.

Para la medición de la rugosidad se han elegido un número determinado de probetas de cada grupo de ensayo de los descritos seguidamente. La rugosidad se ha medido en dichas probetas para tener un promedio del valor

obtenido. Este ensayo se realiza mediante dos métodos. Un rugosímetro Mitutoyo surfest-500 con rango 600 $\mu\text{m}$ , y cut-off 0.8, en el que se obtiene rugosidad media aritmética  $R_a$ , bajo norma ISO 4287, el valor máximo pico-pico  $R_y$ , y la media de la alturas máximas en 5 tramos,  $R_z$ , bajo norma 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 y obtener un perfil de la superficie del tratamiento. También se toman medidas de los contactos cilíndricos y probetas sin tratamiento superficial para saber su estado final de fabricación.

Para diferenciar estos ensayos se dividirán en 3 grupos. El grupo 1 (G1) corresponde a probetas fabricadas para este proyecto y a las que no se le ha aplicado el tratamiento superficial. El grupo 2 (G2) hace referencia a los resultados obtenidos en [19] también sin dicho tratamiento superficial. El grupo S-P es el tercer grupo donde a las probetas se le ha aplicado el tratamiento superficial de shot peening 9A-230H-90°. El material de las probetas y elementos de contactos ha sido el mismo en los tres grupos de ensayo.

En la tabla 2-2 se pueden observar los resultados obtenidos de la rugosidad calculados con las gráficas anteriores en comparación con los obtenidos con el rugosímetro.

En la figura 2-5 se observa el perfil de rugosidad obtenidas con el microscopio de variación de foco. Esta figura tiene dos partes, una primera donde se aprecia el mapa del relieve que indica la altura de cada zona según los colores estudiado 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.

*Tabla 2-2. Rugosidad medida en probetas y contactos de los grupos G1, G2 y S-P.*

MEDICIÓN	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_y$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )
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

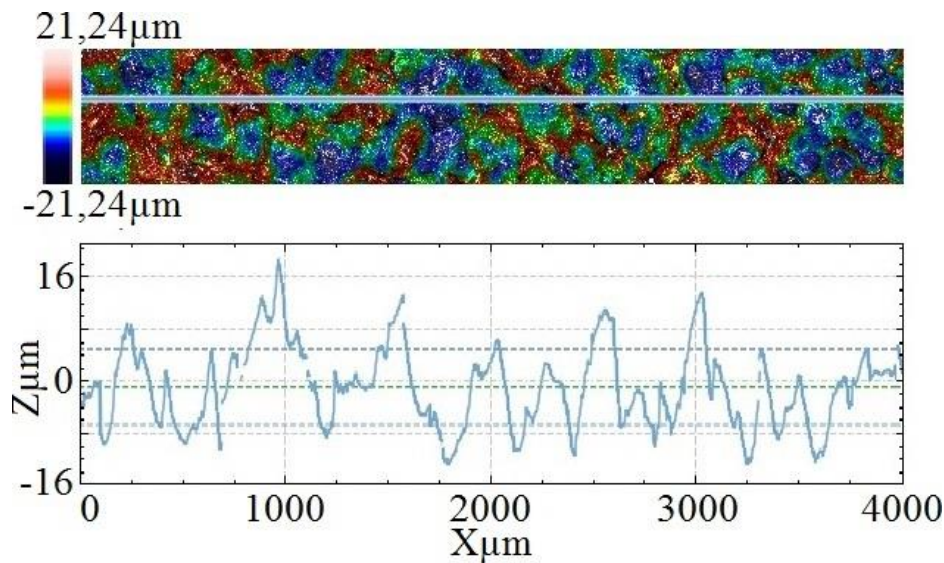


Figura 2-5. Perfilometría óptica en elementos del grupo S-P..

Se observa como varía el acabado superficial entre las probetas del grupo G1 y las del grupo G2 ambas sin tratamiento superficial de shot peening. En los resultados del apartado 3 se observará como intervienen estos datos en los resultados de las vidas. También se comprueba la gran diferencia que hay entre la rugosidad característica del shot peening y de las probetas sin el tratamiento. Como se dijo anteriormente esta rugosidad es conocida como beneficiosa para el caso de fretting fatiga.

### 2.1.6 Tensiones residuales

El tratamiento superficial de shot peening induce tensiones residuales de compresión a través de la deformación plástica que ocurre por la deformación plástica a partir del bombardeo con los perdigones. Para la medición de estas tensiones se han utilizado varios métodos.

El primer método es mediante el agujero ciego en el que se practica un agujero sin introducir grandes deformaciones plásticas durante el arranque de material y midiendo la deformación que se produce alrededor de dicho agujero con galgas extensométricas. Esto se consigue con una velocidad de avance muy lenta, y una velocidad de giro de la herramienta muy alta. Para ello se utiliza 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) [19]. 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 de rayos X 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 2-6.

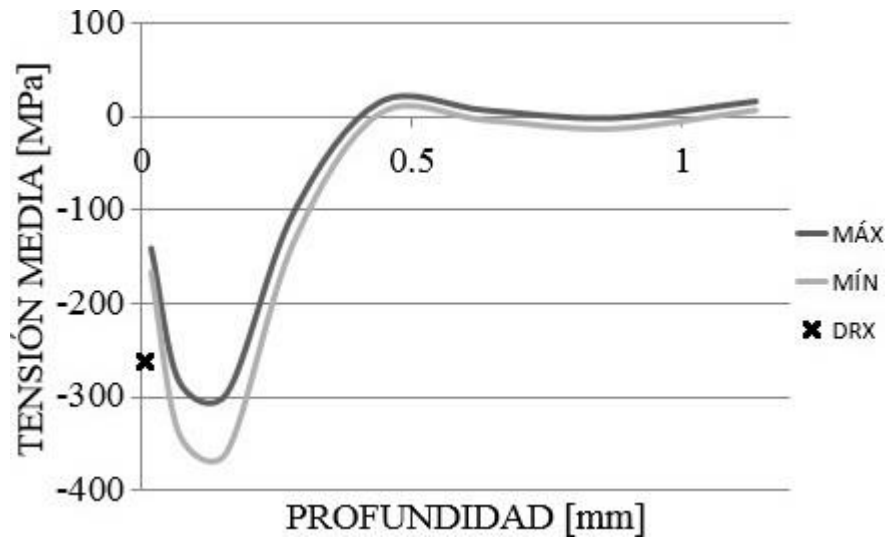


Figura 2-6. Comparativa tensión residual entre agujero ciego y superficial mediante DRX

### 2.1.7 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 un promedio 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 [21].

Este método consiste en realizar un ensayo de fretting fatiga 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 2-7 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 2-3 muestra los valores promedios de los coeficientes de rozamiento medidos para los 3 tipos de probetas y en ambos lados, A y B.

Tabla 2-3. Valor promedio de los coeficientes de rozamiento medidos para los 3 tipos de probetas

	Coef Roz G1	Coef Roz G2	Coef Roz SP
$\mu$	0.75	0.72	0.83

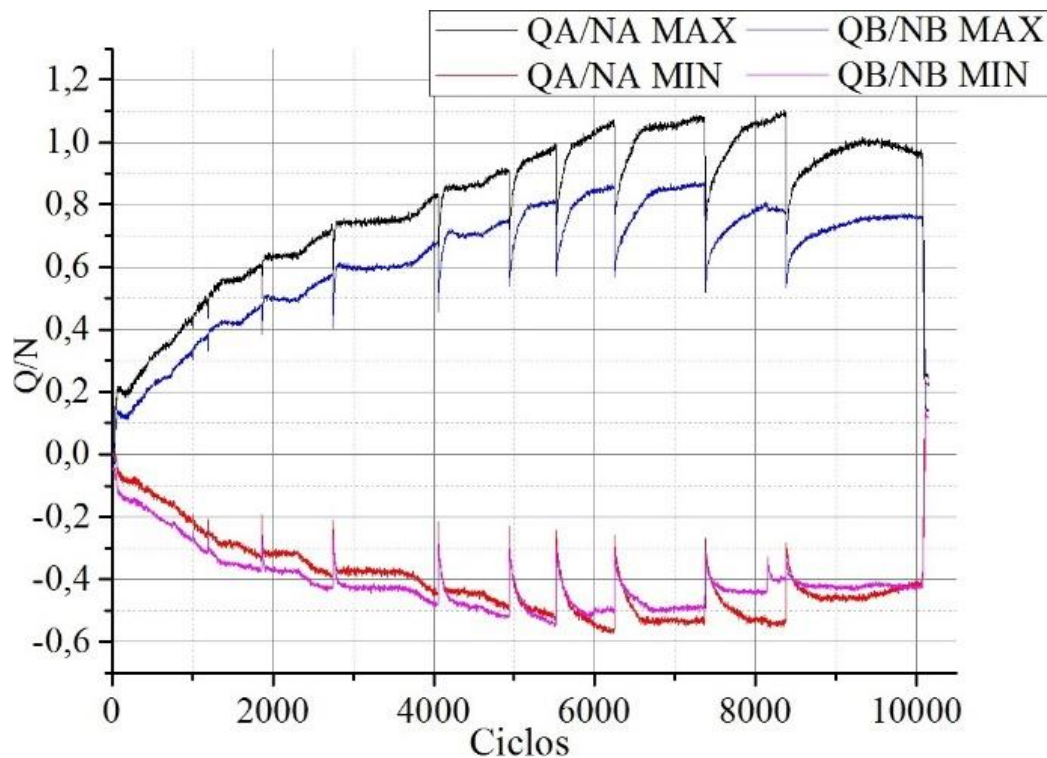


Figura 2-7. Ensayo coeficiente rozamiento de una probeta del grupo 1 para ambos lados A y B.

### 2.1.8 Caracterización de la rugosidad superficial

El tratamiento superficial de shot peening induce en las probetas varias características entre las que se encuentran; la tensión residual por la plastificación de la capa superficial, cambios en el coeficiente de rozamiento y la rugosidad superficial característica por los impactos de las pequeñas bolas. Para hacer un estudio exhaustivo de la influencia de estos hechos en la vida a fatiga por fretting habría que analizar cómo actúan cada uno de ellos por separado en ensayos de fretting fatiga. Para ello se ha tratado de reproducir la rugosidad superficial y se han estudiado varios métodos de caracterización para obtener un perfil de rugosidad similar al obtenido con el tratamiento. La diferencia con el tratamiento superficial de shot peening sería que este no induciría un perfil de tensiones residuales. Con esta caracterización de las probetas conseguiríamos obtener el perfil de rugosidad al igual que con shot peening además de un coeficiente de rozamiento similar.

Estudiados varios métodos como puede ser el ataque químico que según los parámetros del ácido y la forma de esparcirlo sería difícil de controlar la rugosidad. El más favorable fue la electroerosión, que deja una oquedad de mayor o menor medida según la intensidad eléctrica aplicada en su proceso. Los parámetros de electroerosión fueron optimizados hasta alcanzar la intensidad que dejara una rugosidad similar a la encontrada en las probetas con el tratamiento superficial de shot peening. A continuación se observan los perfiles obtenidos con tres intensidades diferentes siendo la última la elegida por su similitud con la rugosidad obtenida en el tratamiento de shot peening.

Con esta caracterización se conseguirán realizar una serie de ensayos en los que la rugosidad de la probeta sea la misma que si se le hubiera aplicado el tratamiento superficial de shot peening pero sin las tensiones residuales inducidas por dicho tratamiento. Una vez realizadas las probetas definitivas también habrá que medir el coeficiente de rozamiento y medir si hay variación con respecto a los casos originales.



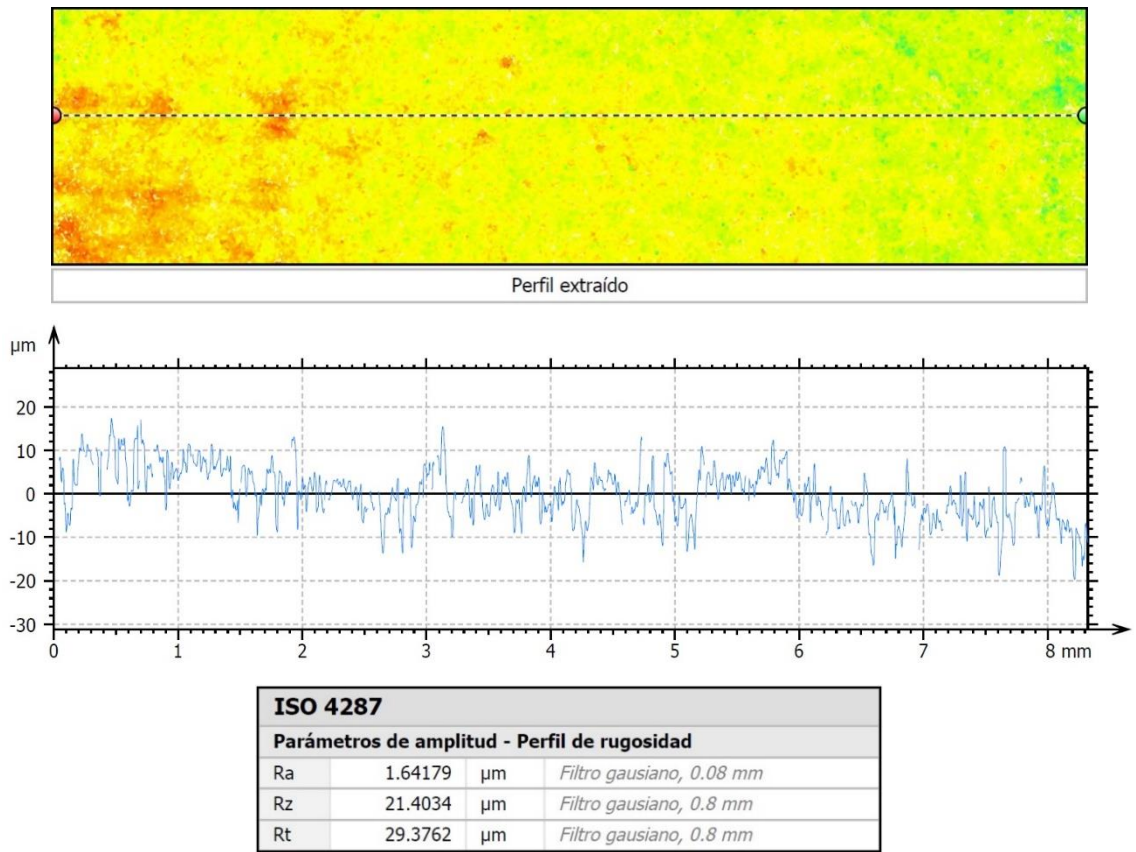


Figura 2-8. Perfil 1 obtenido con el método de variación de foco

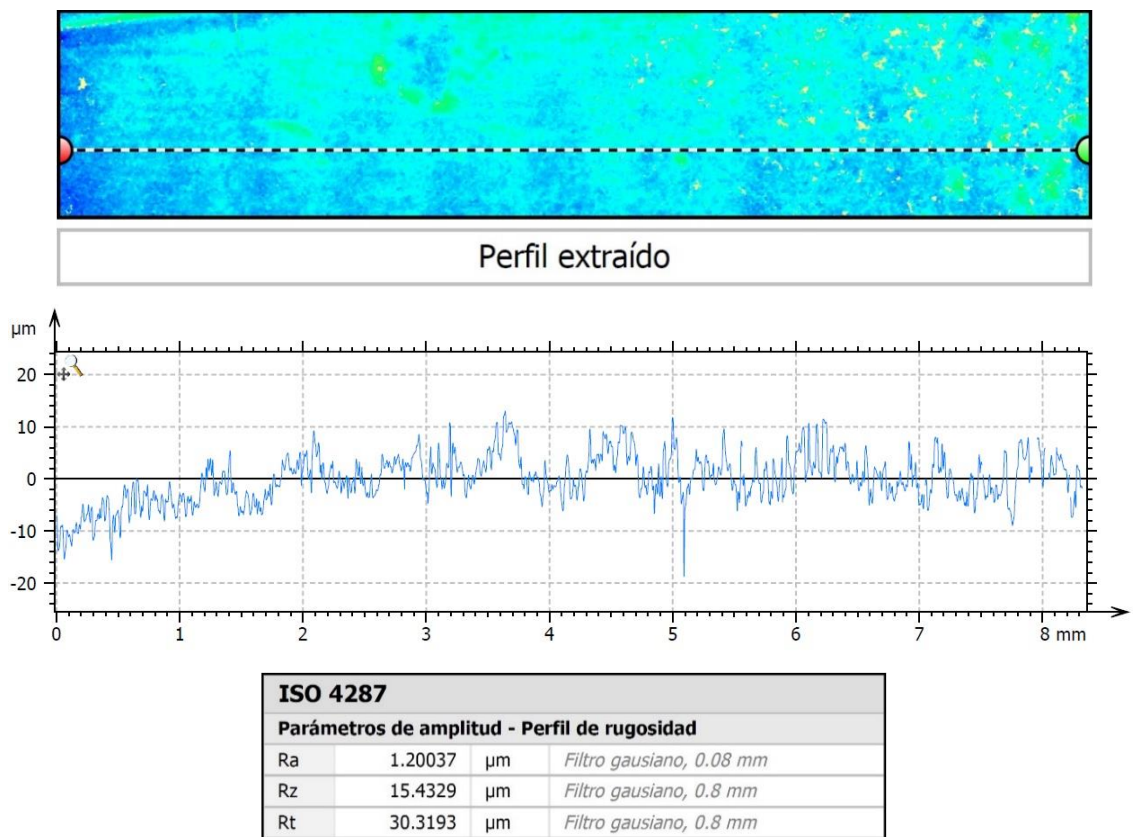


Figura 2-9. Perfil 2 obtenido con el método variación de foco.

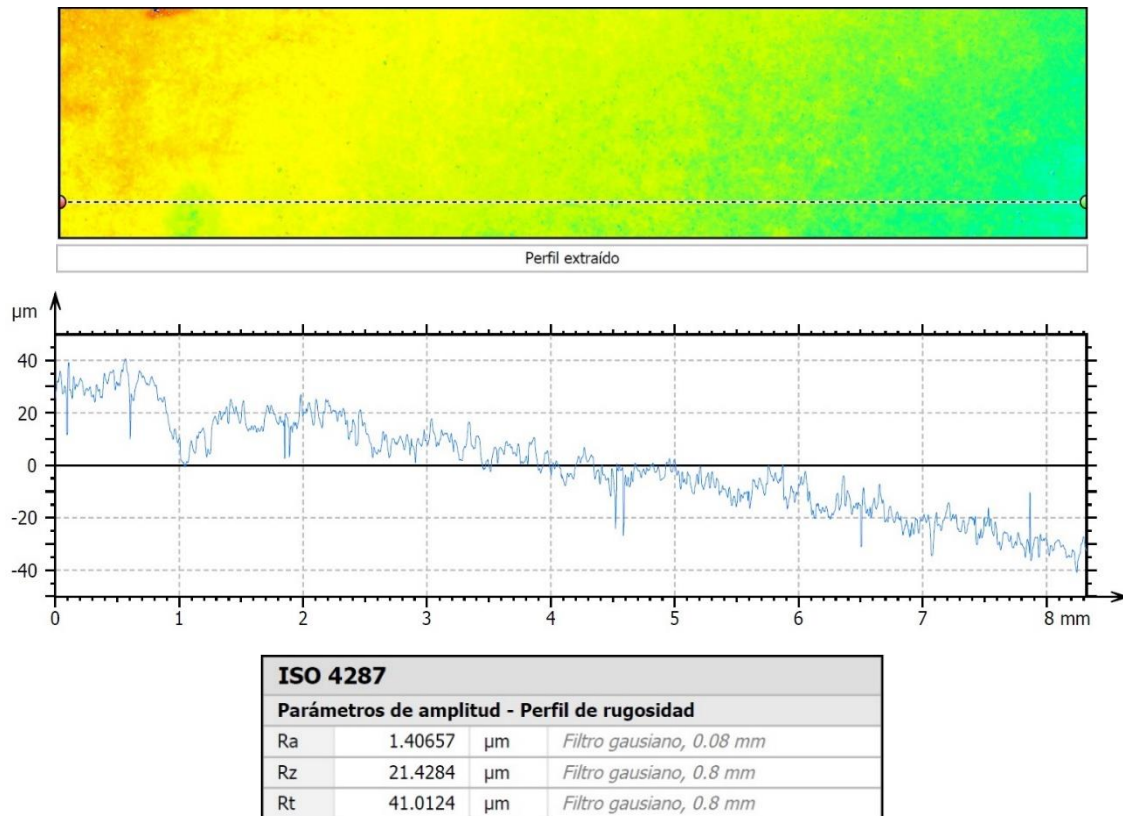


Figura 2-10. Perfil 3 obtenido con el método variación de foco.

## 2.2. Tensiones máximas en los ensayos

En este apartado se expondrán los cálculos teóricos realizados como preámbulo de los resultados experimentales en los ensayos de fatiga por fretting. Se realizara 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 [22]. En la tabla 2-4 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. Los valores de las tensiones están medidos en MPa y  $N$  y  $Q$  en N/mm.

El semiancho de la zona de contacto entre el cilindro y el plano viene dado por la expresión siguiente de  $a$ :

$$a = \left( 8 \cdot N \cdot r \cdot \frac{1 - \nu^2}{\pi \cdot E} \right)^{0.5}$$

Donde se utiliza para obtener el pico de presión de contacto.

$$p_0 = (2 \cdot N) / (\pi \cdot a)$$

$$c = a \cdot \sqrt{1 - (Q / (\mu \cdot N))}$$

$c$  es la parte adherida entre el contacto y el plano en un caso de deslizamiento parcial. Y cuando se aplica una tensión global  $\sigma$  en el plano aparece una excentricidad que desplaza la zona de adherencia del contacto. Esta excentricidad viene representada por la siguiente formula.

$$e = \sigma \cdot a / (4 \cdot \mu \cdot p_0)$$



Para el cálculo de la tensión total es necesario usar la raíz más larga de la ecuación cuadrática.

$$s^2 = \frac{1}{2} \left( -(a^2 - x^2 - y^2) + \sqrt{(a^2 - x^2 - y^2)^2 + 4a^2 y^2} \right)$$

Siendo  $x$  la coordenada desde el centro del contacto cilíndrico en dirección longitudinal a la probeta. La coordenada  $y$  es perpendicular al plano de contacto.

Tensión debida a la normal del contacto:

$$sxx_n = p_0 \frac{y}{a} \left( 2 - \frac{s_1}{\sqrt{(a^2 + s_1^2)}} - \frac{\sqrt{(a^2 + s_1^2)}}{s_1} - x^2 s_1^3 \frac{a^2}{((a^2 + s_1^2)^{1.5})(s_1^4 + y^2 a^2)} \right):$$

Tensión debida al deslizamiento total:

$$sxx_{q_{destot}} = -\mu p_0 \left( -2 \frac{x}{a} \left( 1 - \frac{s_1}{\sqrt{(a^2 + s_1^2)}} \right) + x y^2 s_1 \frac{a}{\sqrt{(a^2 + s_1^2)(s_1^4 + y^2 a^2)}} \right):$$

Tensión debida al deslizamiento parcial:

$$sxx_{q_{despar}} = \mu p_0 \frac{c}{a} \left( -2 \frac{x + e}{c} \left( 1 - \frac{s_2}{\sqrt{(c^2 + s_2^2)}} \right) + (x + e) y^2 s_2 \frac{c}{\sqrt{(c^2 + s_2^2)(s_2^4 + y^2 c^2)}} \right):$$

Con el sumatorio de todas las tensiones se obtiene la tensión total.

$$sxx_{tot} := sxx_n + sxx_{q_{destot}} + sxx_{q_{despar}} + s_t:$$

Estas ecuaciones se han comprobado por dos métodos alternativos, las ecuaciones de Flamant y un resultado numérico desarrollado en el departamento que utiliza el potencial de Muskhelishvili [23].

Con estas ecuaciones y los valores obtenidos del rozamiento para cada grupo de probetas obtenemos las tensiones máximas que se alcanzan en la superficie de contacto. Donde se generan las grietas por las cual rompen.

Tabla 2-4.  $\sigma_{xx}^{max}$  Según las combinaciones de carga aplicadas y del grupo de probetas

	$N/Q/\sigma_a$	$\sigma_{xx}$ G1 [MPa]	$\sigma_{xx}$ G2 [MPa]	$\sigma_{xx}$ S-P [MPa]
1	828.6/121.4/70	<b>316.5</b>	<b>311.8</b>	<b>328.9</b>
2	527.1/192.9/110	<b>404.1</b>	<b>397.9</b>	<b>419.5</b>
3	678.6/192.9/110	<b>415.9</b>	<b>409.9</b>	<b>431.1</b>
4	678.6/157.1/110	<b>392.8</b>	<b>387.4</b>	<b>406.7</b>
5	678.6/121.4/110	<b>368.1</b>	<b>363.1</b>	<b>380.9</b>
6	375/192.9/150	<b>434.8</b>	-	<b>451.9</b>
7	527.1/192.9/150	<b>453.3</b>	-	<b>470</b>
8	678.6/192.9/150	<b>469.3</b>	-	<b>485.8</b>

De los valores calculados se observa una influencia principal de la tensión global  $\sigma_a$ . Posteriormente entre combinaciones con el mismo valor de  $\sigma_a$  y mismos valores de Q se observa la influencia más leve de la tensión normal N. Esto se ve reflejado en las combinaciones de carga 6, 7 y 8 donde no varía ni  $\sigma_a$  ni la tangencial Q. Para observar la influencia de la carga tangencial podemos observar las combinaciones de carga 3, 4 y 5 donde en estos casos la fuerza normal N y la tensión global  $\sigma_a$  son iguales. Aquí se observa como influye la tensión tangencial Q y las diferentes tensiones que se producen en el contacto con la variación de esta fuerza Q.

# 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

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 a fatiga por fretting

En este apartado se representan mediante una gráfica las vidas de todas las probetas ensayadas. Estas se comparan según su combinación de carga y su grupo de ensayo, ya sea este el grupo G1, G2 o S-P. Los resultados varían dependiendo de estos dos factores mencionados como podemos ver en la figura 3-1. Las combinaciones de carga aparecen en la tabla 2-4 del apartado anterior.

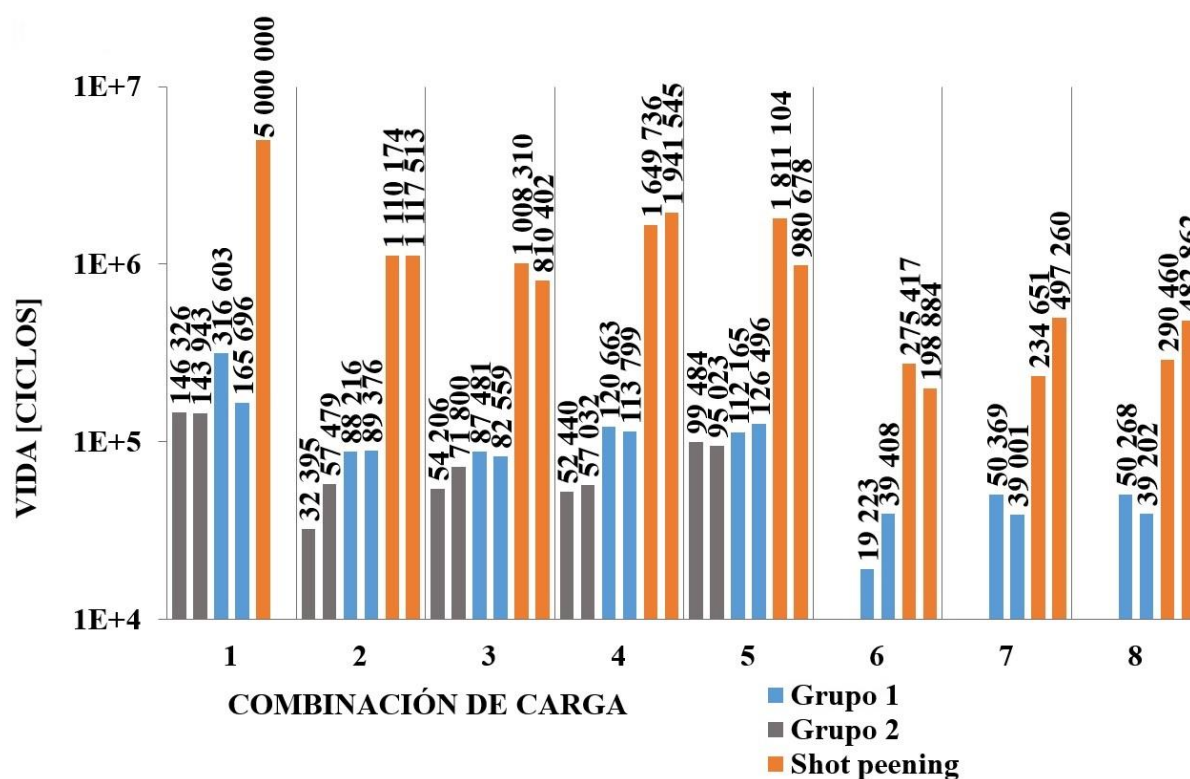


Figura 3-1. Vida experimental frente a combinación de cargas aplicadas según tabla 2-4.

### 3.2 Longitudes de grietas

En el siguiente apartado se ha estudiado las longitudes de las grietas que se observan en la superficie de fractura de la probeta una vez han fracturado. Las grietas que se medirán son aquellas grietas que están en la cara opuesta a la grieta que ha producido la rotura. Las grietas opuestas no han crecido lo suficiente para que la probeta rompa por su causa. El crecimiento de estas grietas ha sido tal que en el momento de la fractura aún estaban en las primeras fases de crecimiento. Por este motivo son perfectamente reconocibles a simple vista a través de un microscopio. Este hecho no ocurre con grietas que han producido la rotura ya que es muy difícil diferenciar en la superficie de fractura entre la iniciación y la propagación de estas grietas. En las imágenes se pueden ver las grietas de las probetas del grupo 1 y del grupo con el tratamiento de shot peening. En la figura 3-2 se pueden observar varios tipos de superficies y varios tipos de grietas. La superficie que refleja más luz y son más claras son las zonas en las que una grieta se ha propagado. La superficie más opaca y gris que a penas refleja luz son las zonas de la fractura que han tenido una deformación plásticas y rotura por tracción. Esto ocurre en el último ciclo de vida donde el material de la probeta no fue capaz de soportar la carga aplicada.

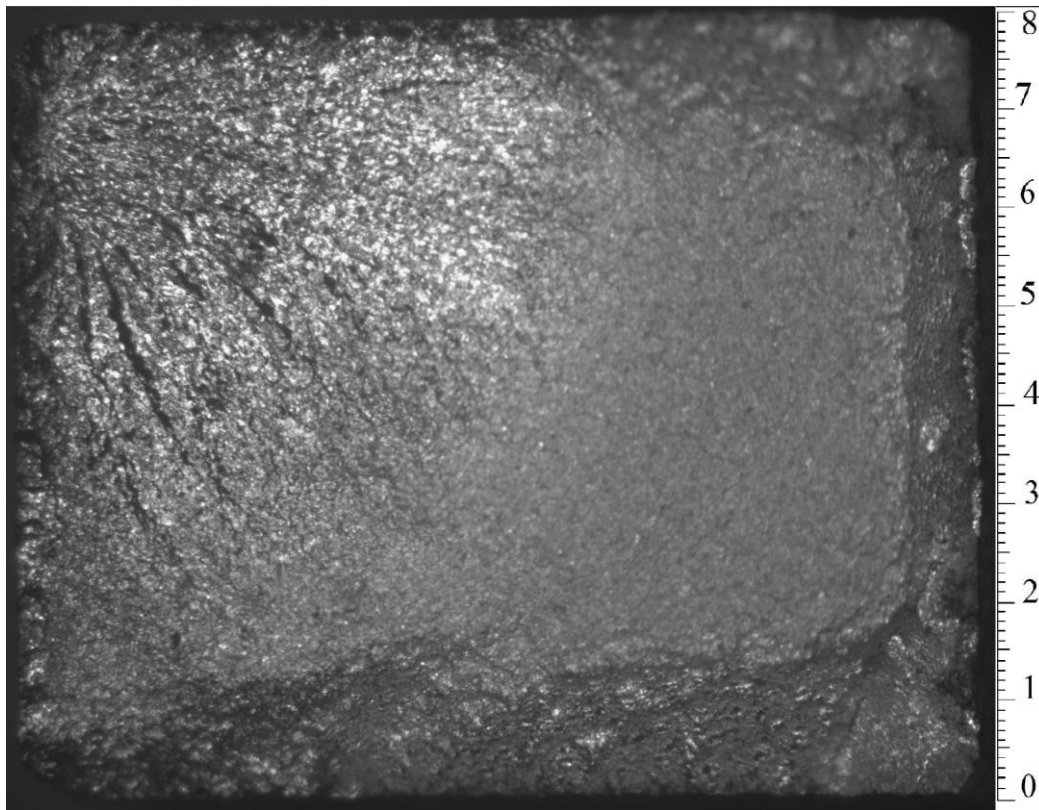


Figura 3-2. Grieta de una probeta con shot peening y combinación de cargas 6.

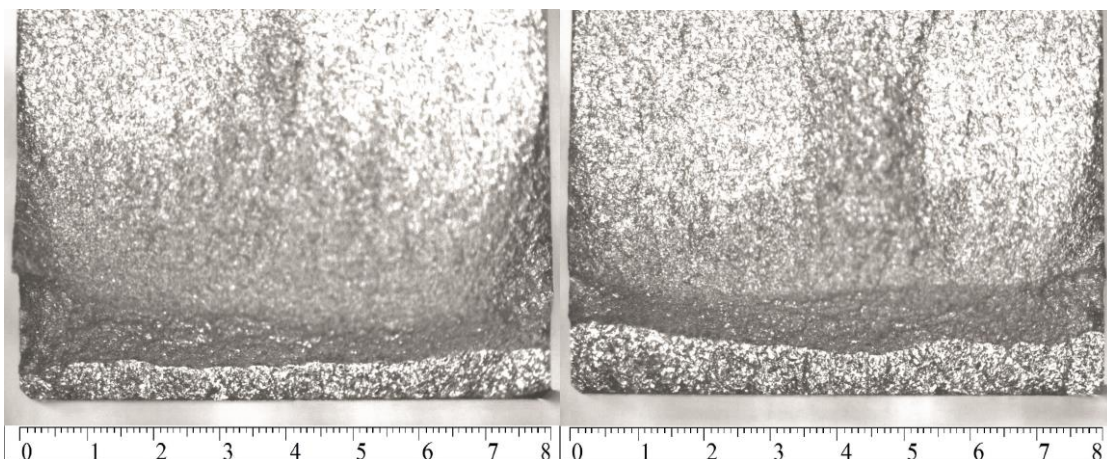
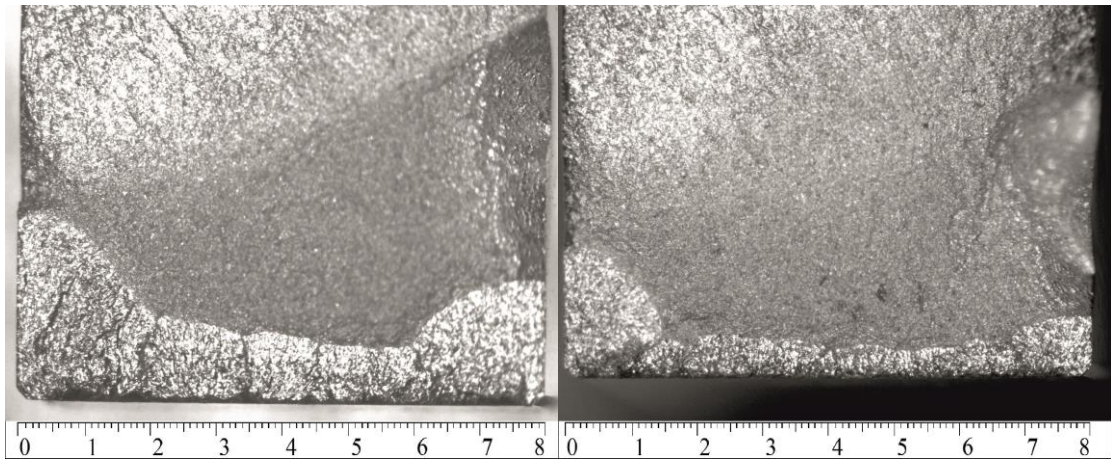
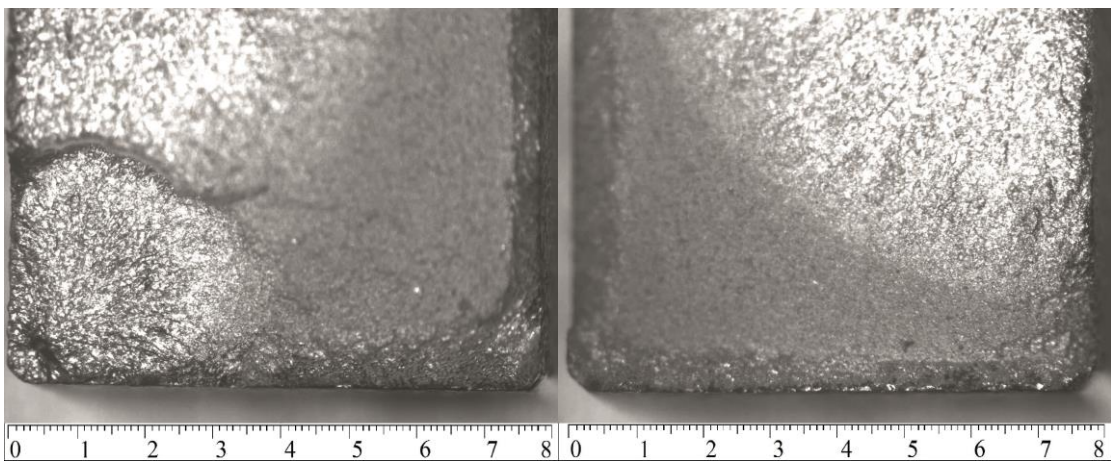


Figura 3-3. Grietas de 2 probetas G1 y combinación 1.

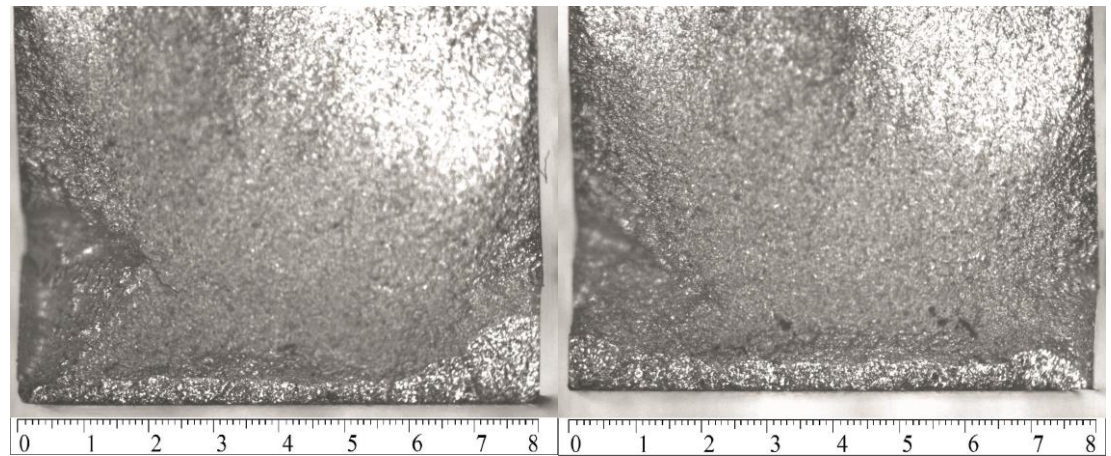




*Figura 3-3. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 2.*

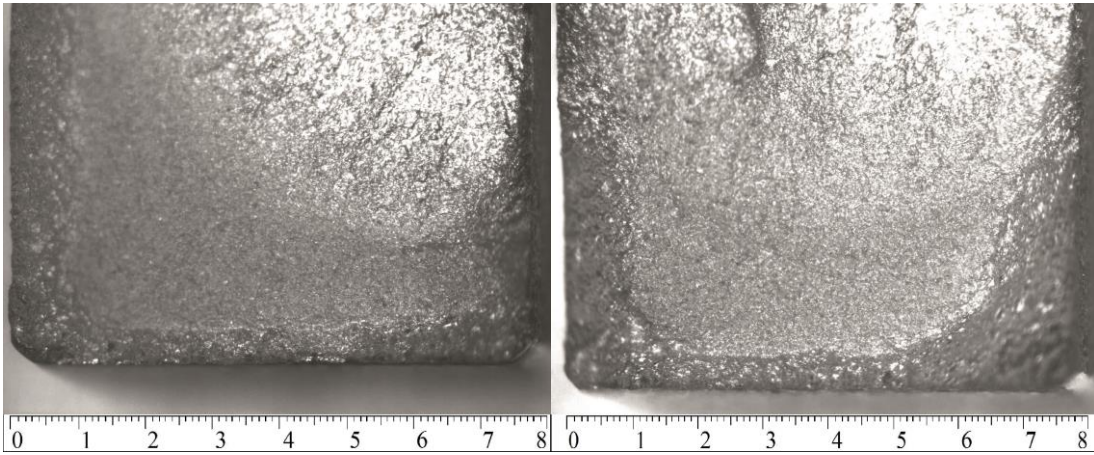


*Figura 3-4. Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 2.*

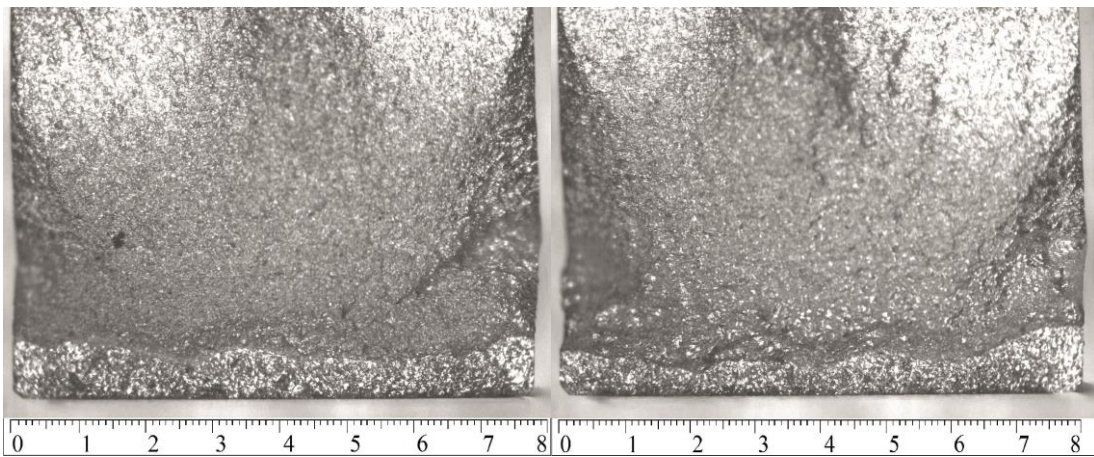


*Figura 3-5. Grietas de 2 probetas lisas y combinación 3.*

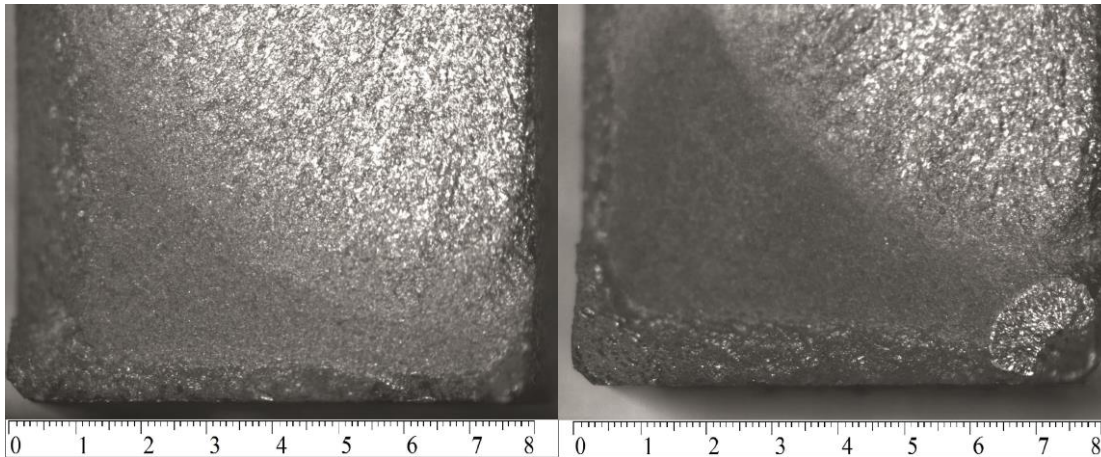




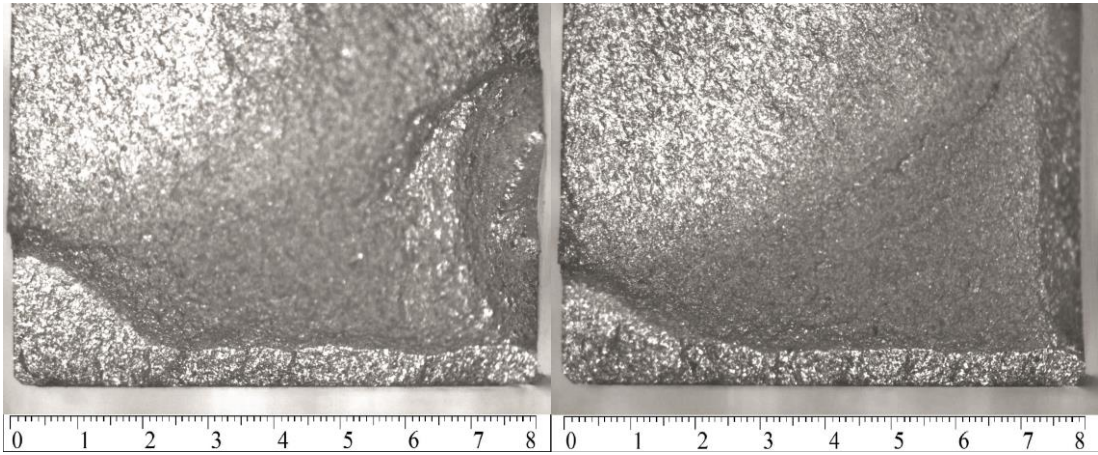
*Figura 3-6.* Ausencia de grietas en 2 probetas con shot peening y combinación 3.



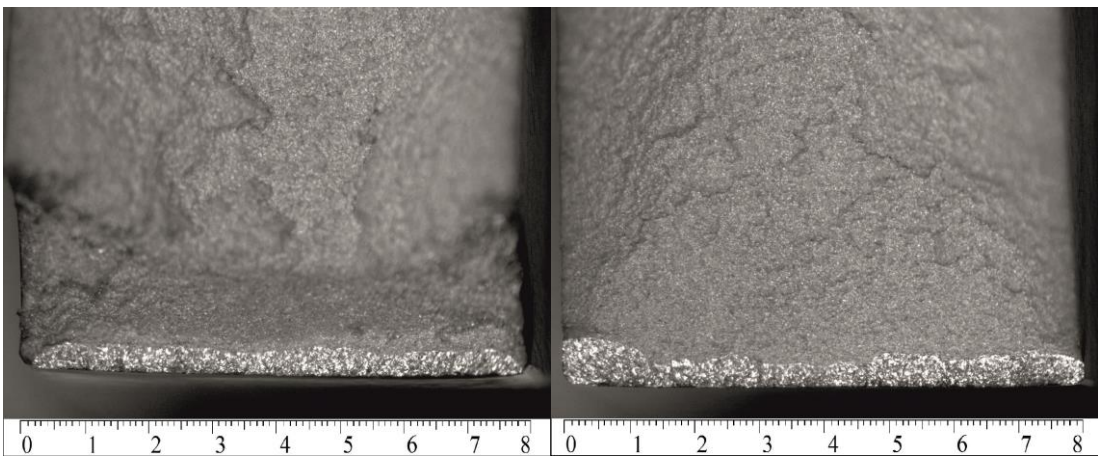
*Figura 3-7.* Grietas de 2 probetas lisas y combinación 4.



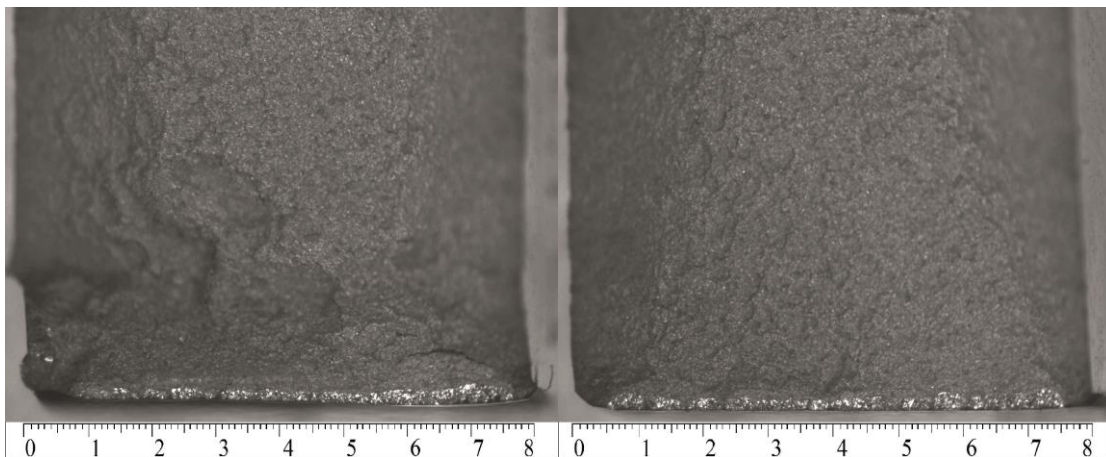
*Figura 3-8.* Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 4.



*Figura 3-9.* Grietas de 2 probetas lisas y combinación 5.

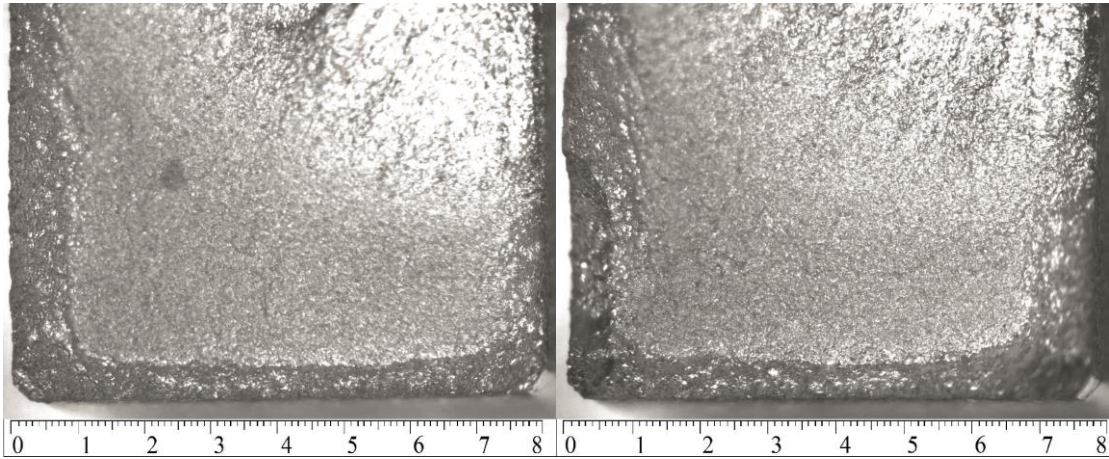


*Figura 3-10.* Grietas de 2 probetas lisas y combinación 5, ensayo interrumpido a los 94000 ciclos.

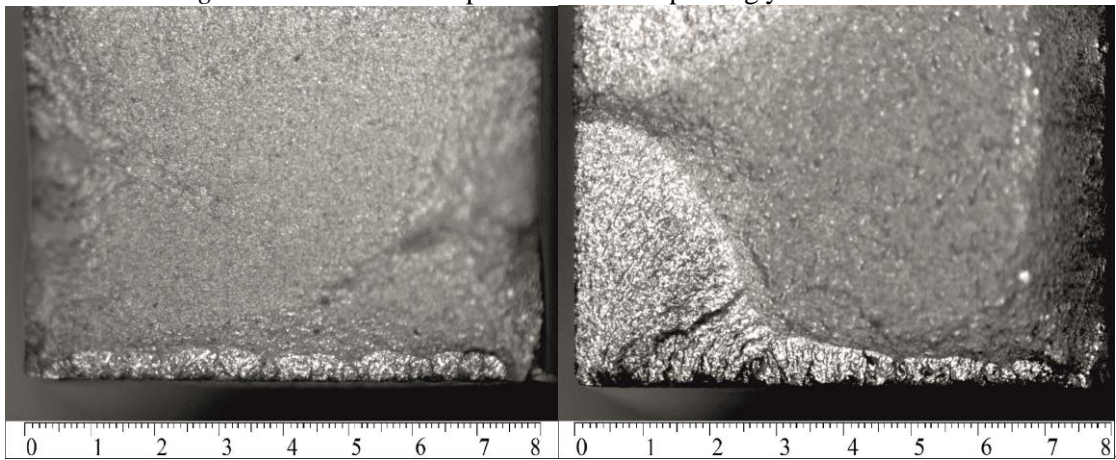


*Figura 3-11.* Grietas de 2 probetas lisas y combinación 5, ensayo interrumpido a los 40000 ciclos.

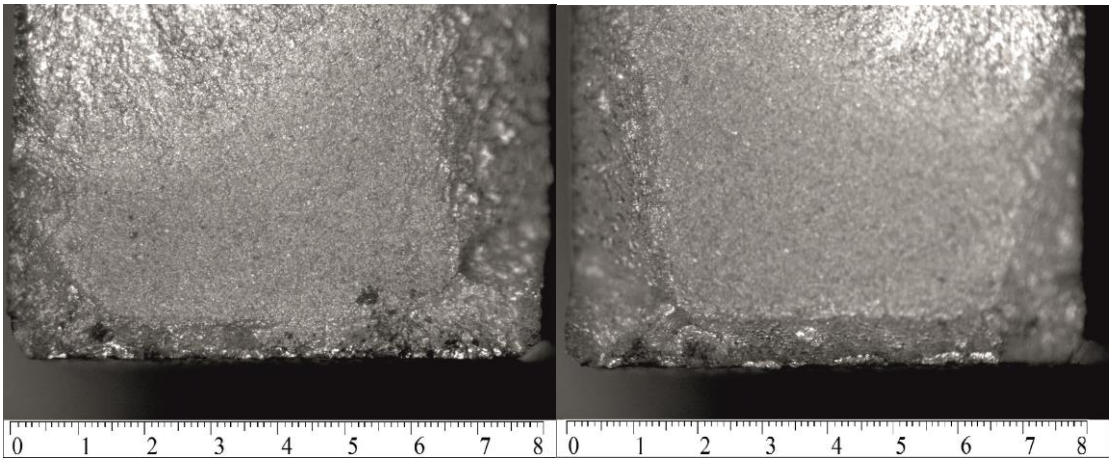




*Figura 3-12.* Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 5

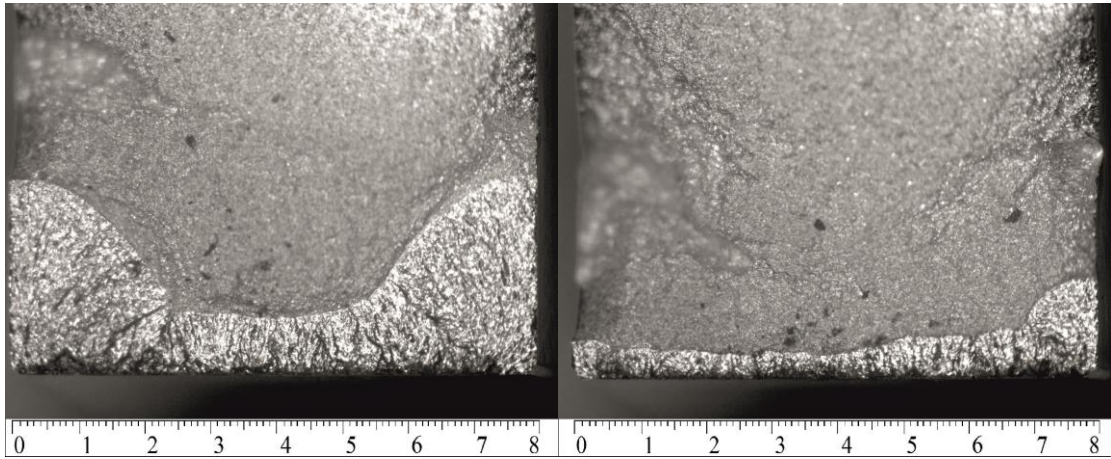


*Figura 3-13.* Grietas de 2 probetas lisas y combinación 6.

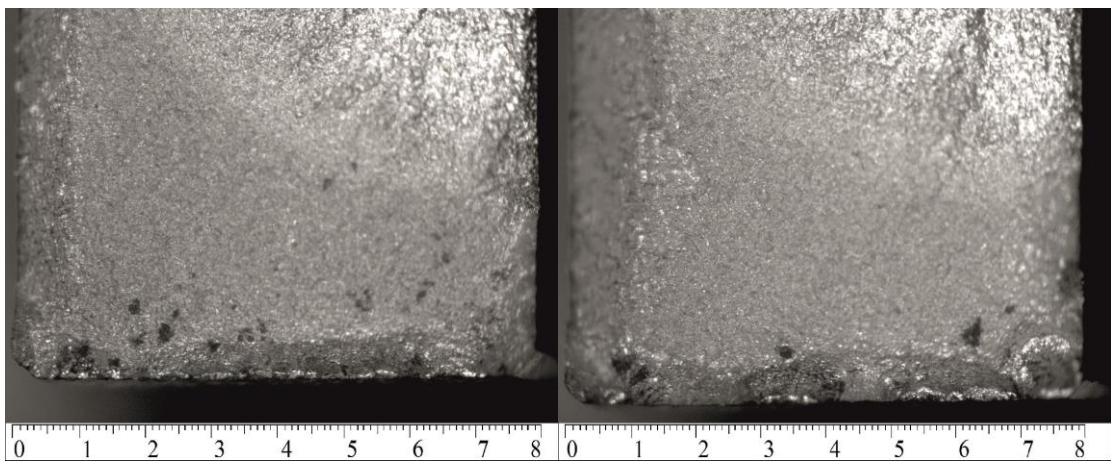


*Figura 3-14.* Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 6.

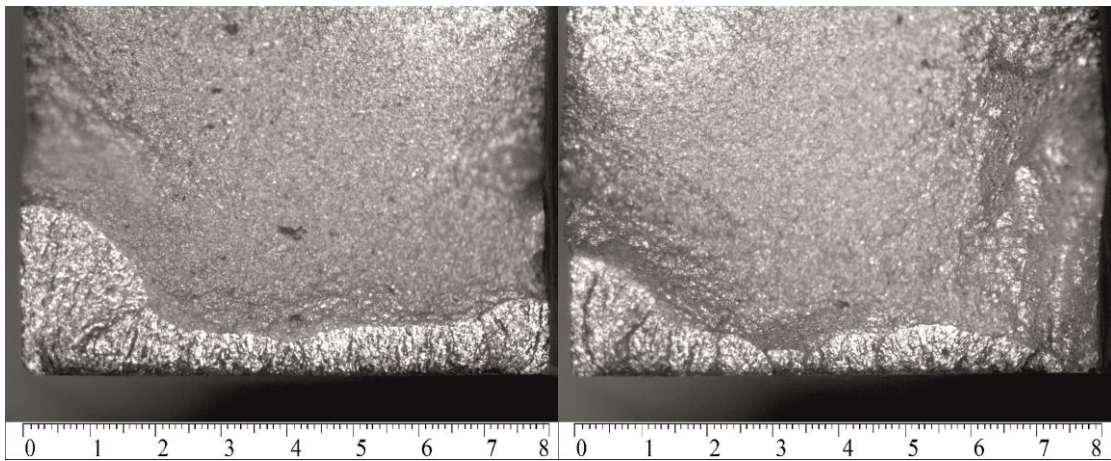




*Figura 3-15.* Grietas de 2 probetas lisas y combinación 7.



*Figura 3-16.* Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 7.



*Figura 3-17.* Grietas de 2 probetas lisas y combinación 8.

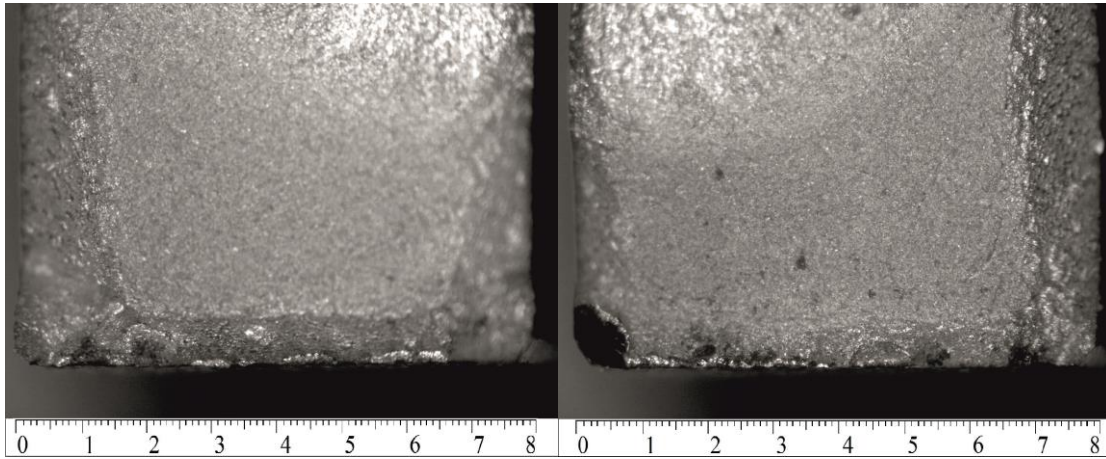


Figura 3-18. Grietas de 2 probetas con shot peening y combinación 8

En esta serie de imágenes podemos observar detalles como grietas uniformes a lo largo de la probeta en las figuras 3-3 y 3-7. En otras figuras como las 3-5, 3-9, 3-13 3-15 y 3-17 se puede observar irregularidades en los extremos donde la grieta es más larga que por el centro de la misma. También se aprecia grietas internas como en los lados derecho de las figuras 3-8 y 3-16, donde las tensiones residuales de compresión del tratamiento superficial de shot peening no han permitido un inicio de grietas en la superficie, pero sí que lo han permitido en el interior del material. Como posteriormente se observará en la grafica 3-19 se puede ver como las grietas de las probetas con shot peening son de menor longitud que en las probetas sin dicho tratamiento superficial.

Con la medición de las grietas podemos presentar en una gráfica frente a los ciclos de vida que han alcanzado las probetas y obtener una comparativa de la longitud de las grietas frente estos ciclos de vida. Para ellos se han utilizado métodos ópticos de microscopia y software para el postprocesado de las imágenes y medición. Los resultados son los expuestos en la figura 19.

Gráfica Longitud de grieta vs ciclos de vida

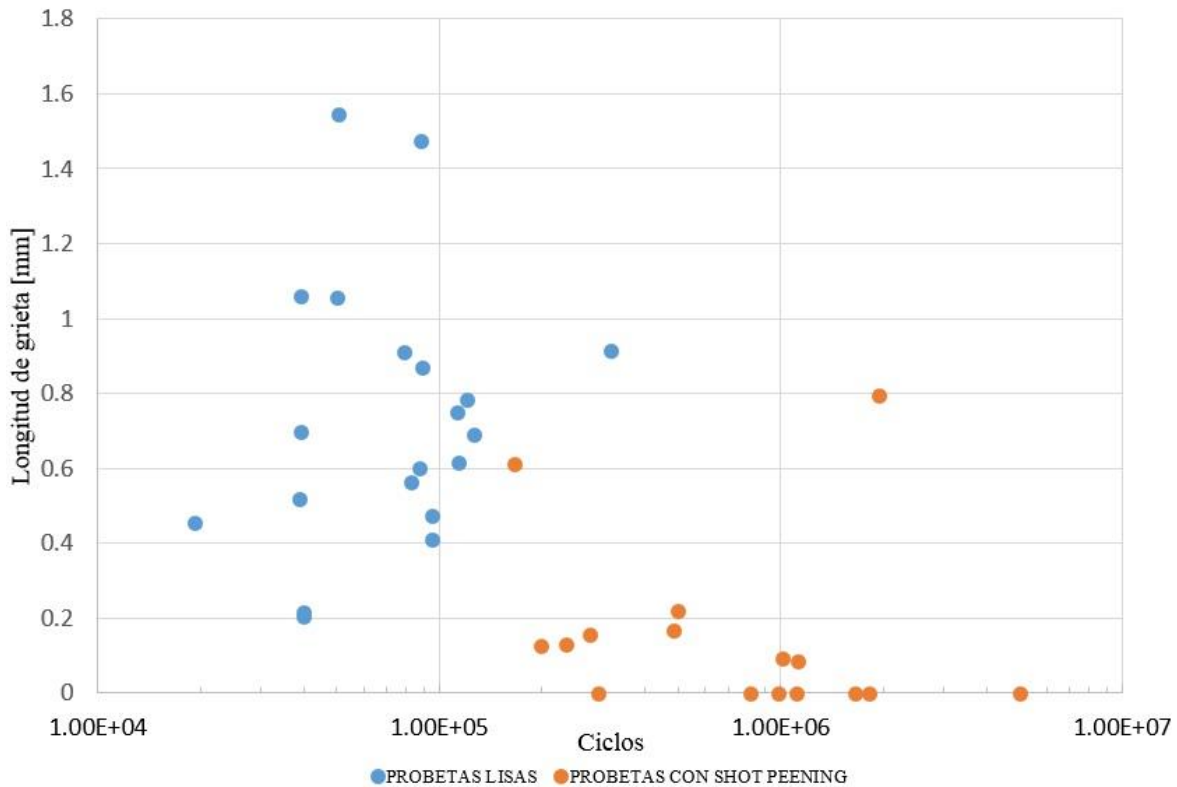


Figura 3-19. Longitud de grietas frente a ciclos de vida.



De todos los resultados de longitud grietas y vidas se observa en la figura 3-19 la fuerte influencia del efecto del shotpeening siendo estas probetas las que menor longitud de grietas tienen. Además de alcanzar mayor número de ciclos debido al tratamiento. Con respecto a la longitud de las grietas estas son más largas en las probetas que no tienen tratamiento superficial. En las probetas con este tratamiento se observa que en muchas de estas no aparecen grietas en las primeras fases de crecimiento, solo hay grietas que han crecido y han producido la rotura.

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 de 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 3-20 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 sometiéndola 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.

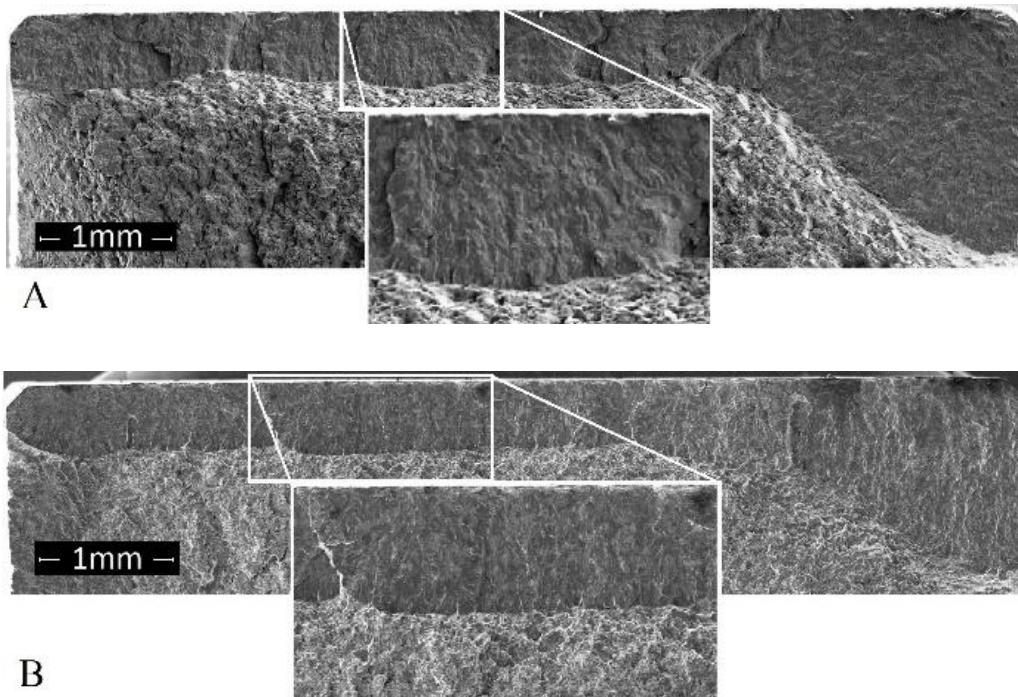


Figura 3-20. Probetas Grupo 1 y combinación de carga 5 hasta rotura. A) Probeta 1 con 112165 ciclos. B) probeta 2 con 126496 ciclos.

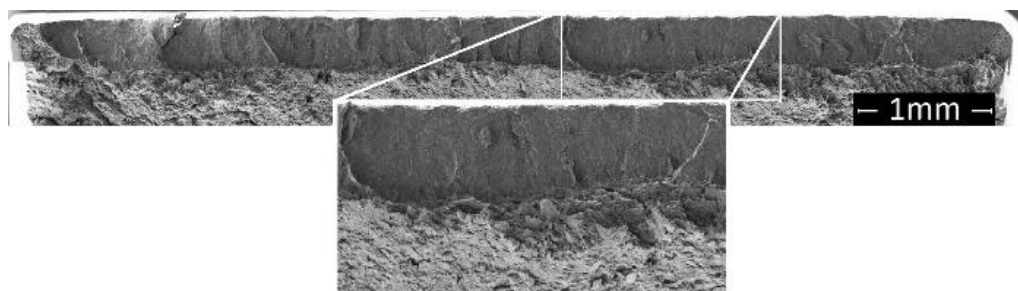


Figura 3-21. Probeta Grupo 1 y combinación 5. Ensayo interrumpido a los 93000 ciclos.

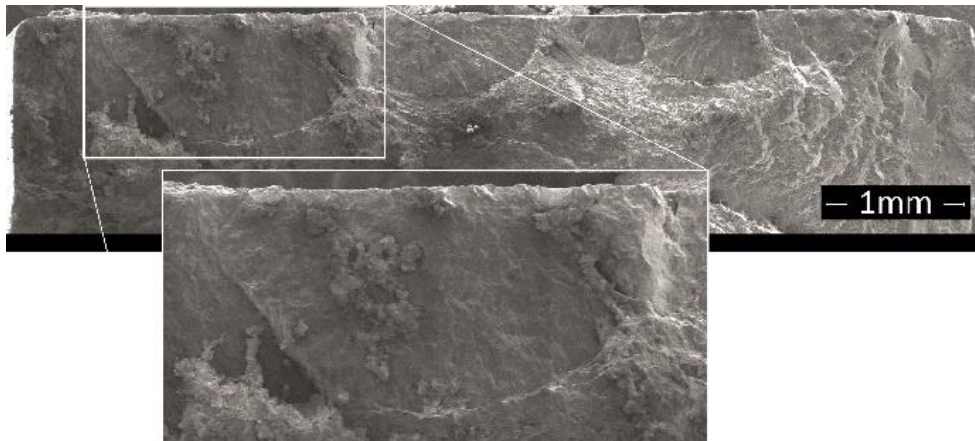


Figura 3-22. Probeta Grupo G2 y combinación 5 hasta rotura con 99484 ciclos.

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.

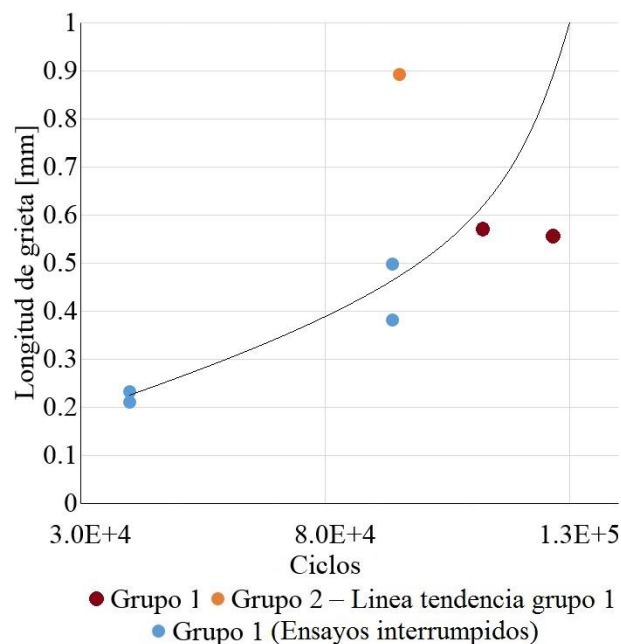
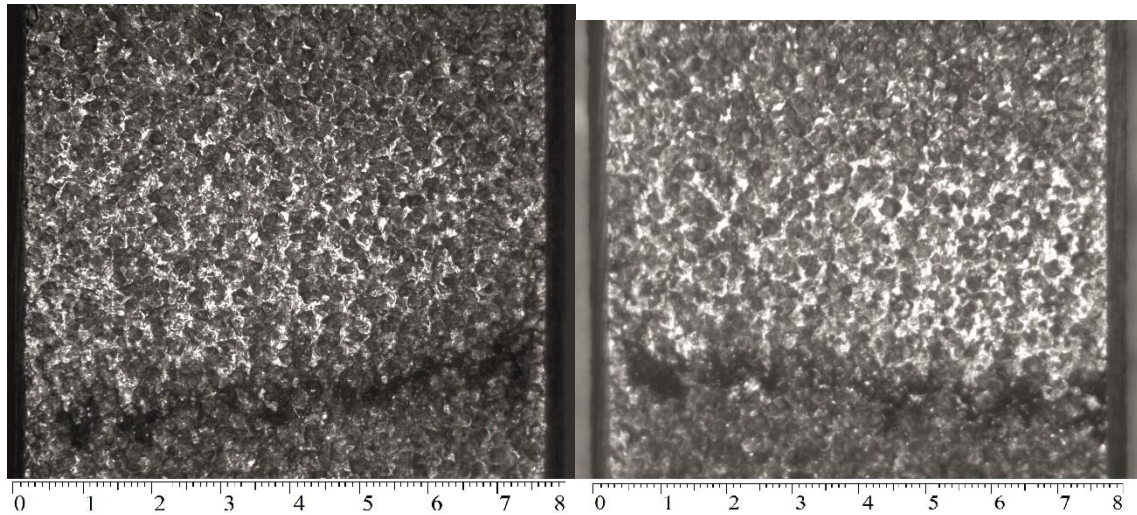


Figura 3-23. Longitud de grieta frente a vida en probeta del grupo G1 y G2 para combinación de carga 5.

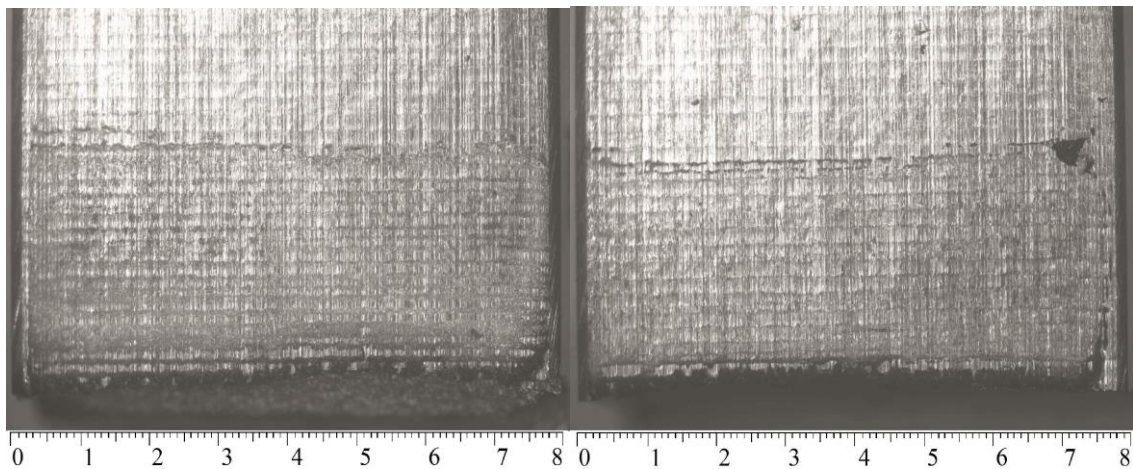


### 3.3 Tamaño de huellas de contacto

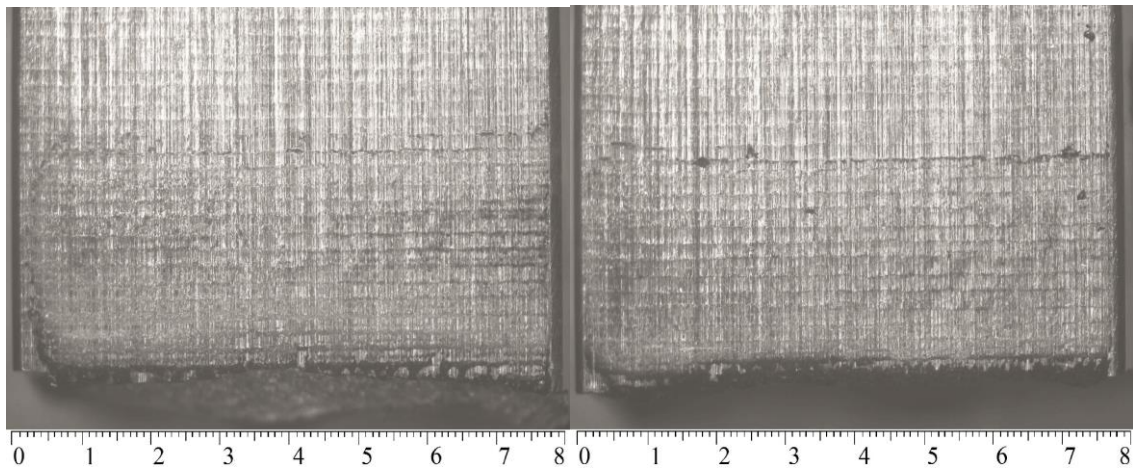
En las probetas ensayadas se observa que las huellas debidas al fretting cambian según el acabado superficial de estas. Denotan irregularidades como picos donde se producen mayores tensiones o rozamiento y quedan oscurecidos de forma más intensa. En las siguientes figuras se pueden ver las huellas producidas 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 3-24 Contactos de probeta con shot peening y combinación 1*

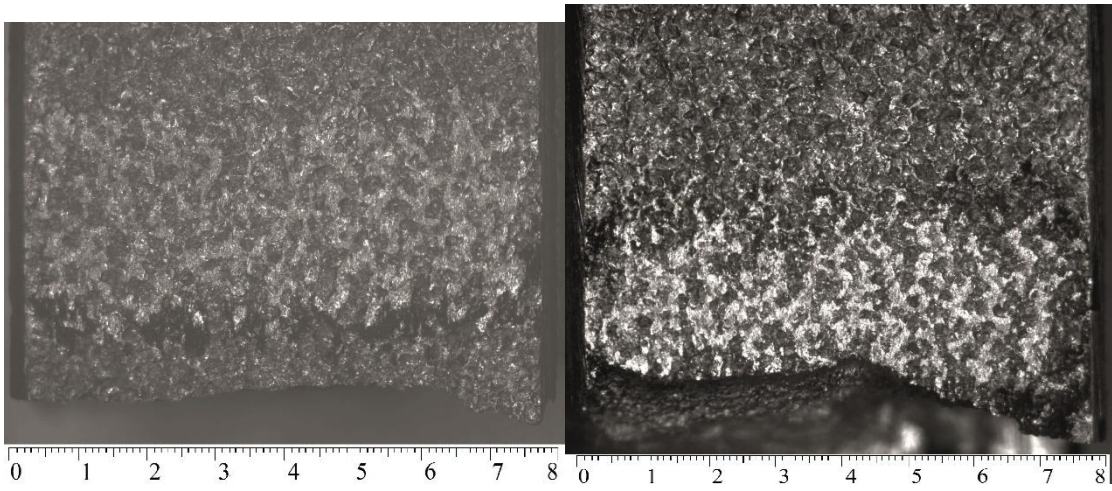


*Figura 3-25 Contactos en probetas lisas y combinación 1*

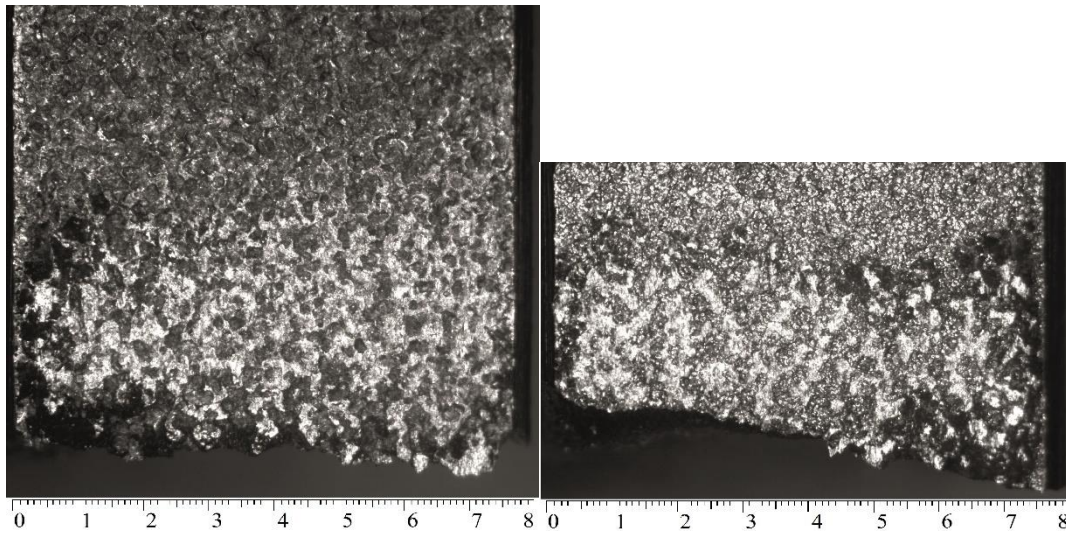




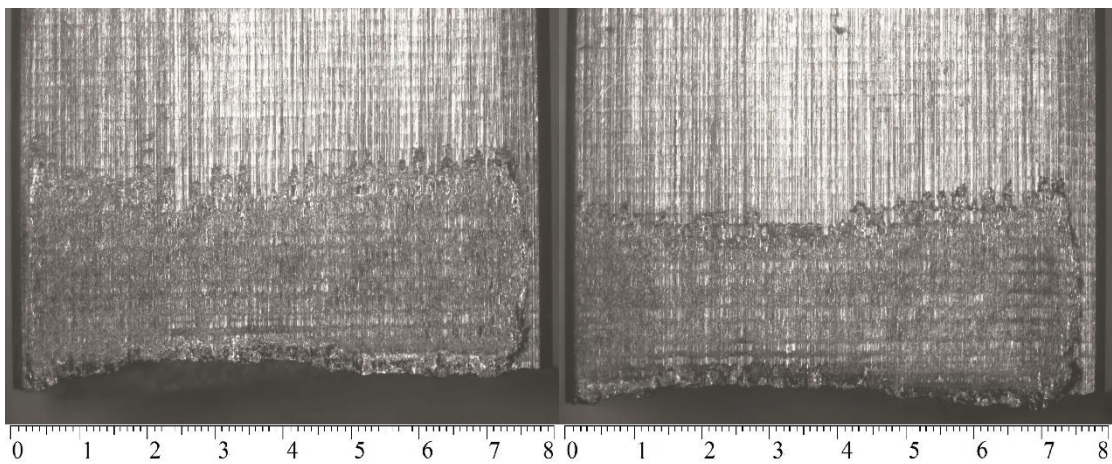
*Figura 3-26 Contactos de probetas lisas y combinación 1*



*Figura 3-27 Contactos de probetas con shot peening y combinación 2*



*Figura 3-28 Contactos de probetas con shot peening y combinación 2*



*Figura 3-29 Contactos en probetas lisas y combinación 2*



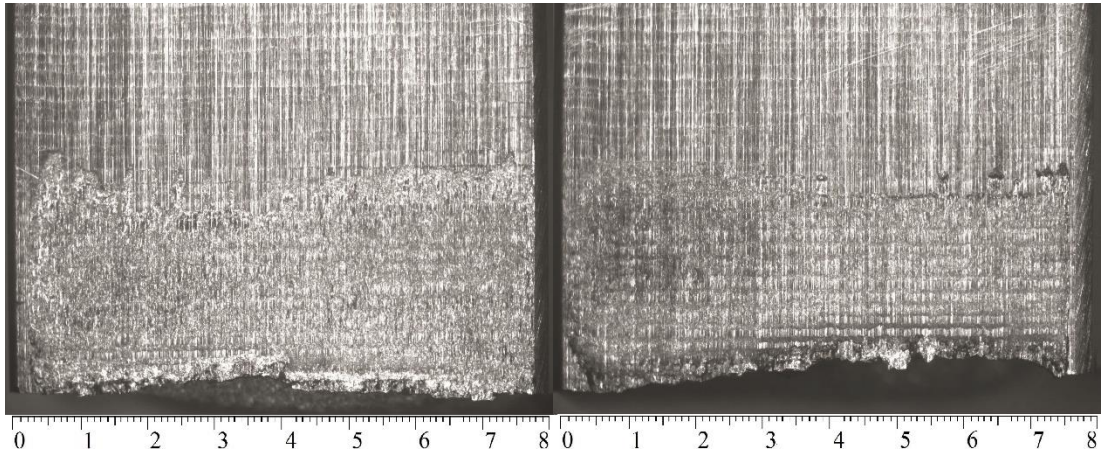


Figura 3-30 Contactos en probetas lisas y combinación 2

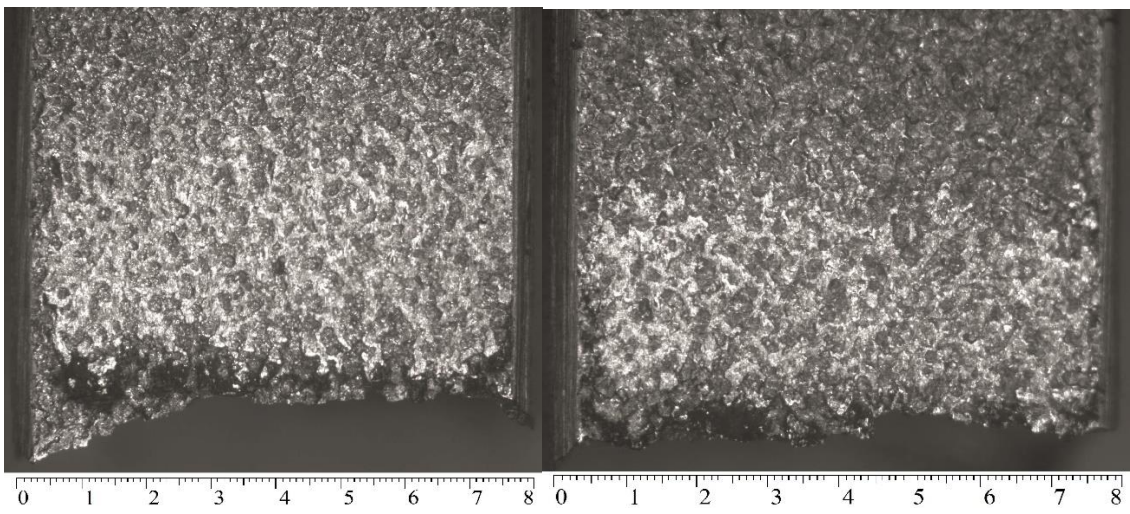


Figura 3-31 Contactos en probetas con shot peening y combinación 3

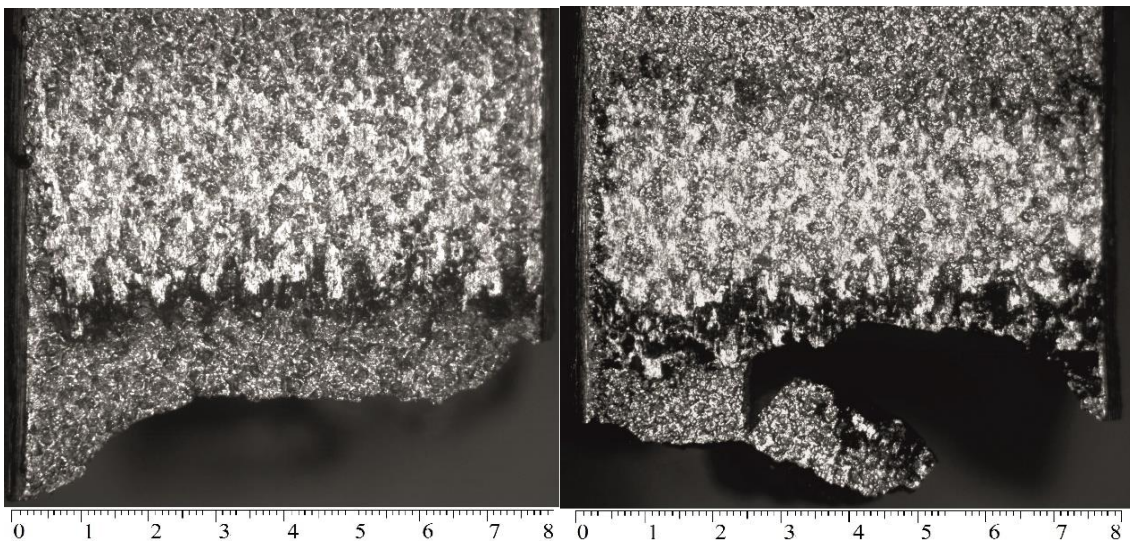


Figura 3-32 Contactos en probetas con shot peening y combinación 3



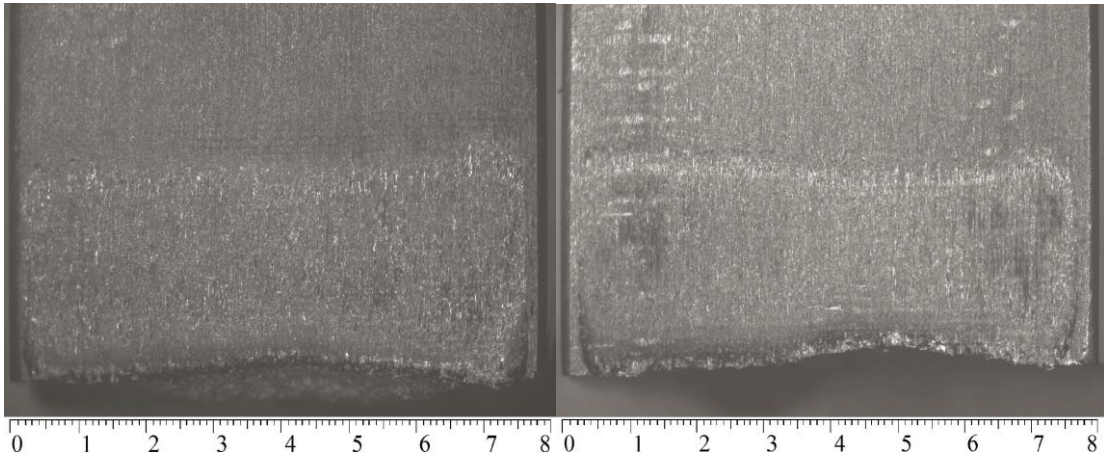


Figura 3-33 Contactos en probetas lisas y combinación 3

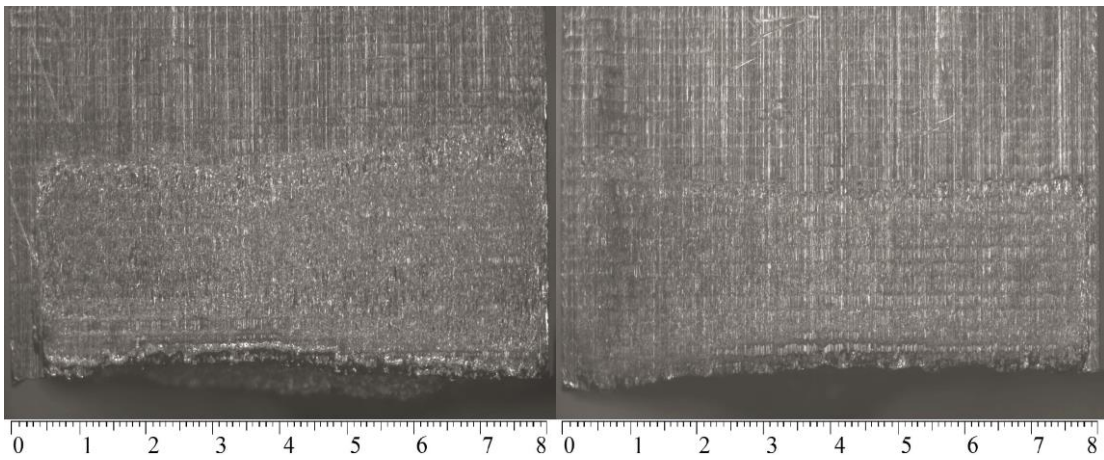


Figura 3-34 Contactos en probetas lisas y combinación 3

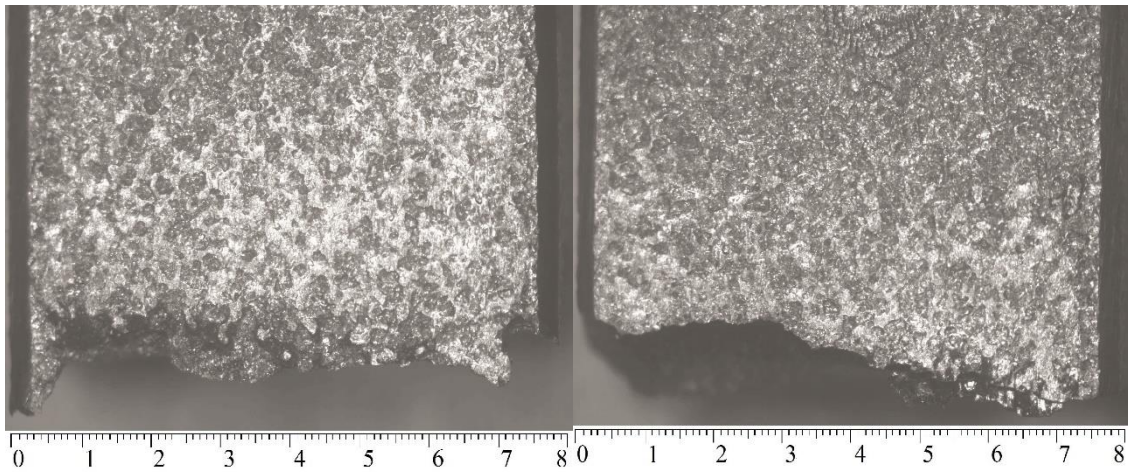


Figura 3-35 Contactos en probetas con shot peening y combinación 4



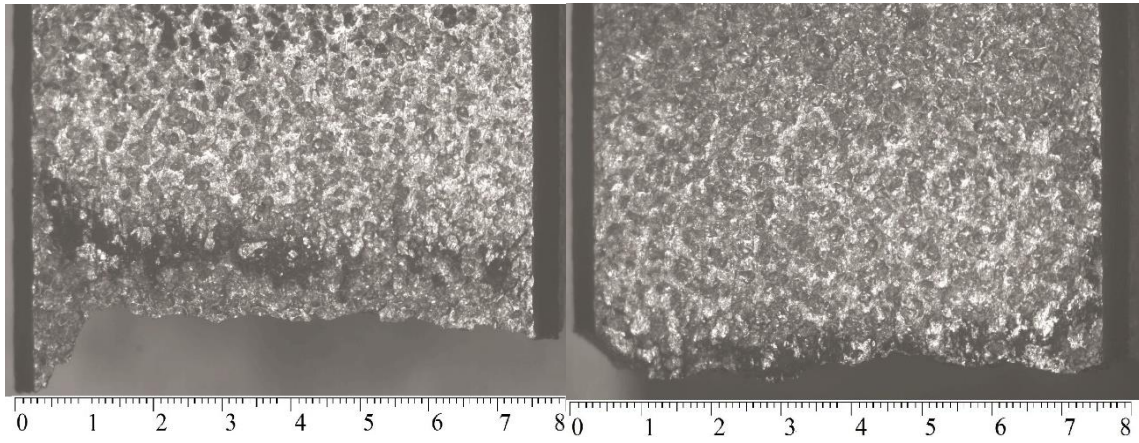


Figura 3-36 Contactos en probetas con shot peening y combinación 4

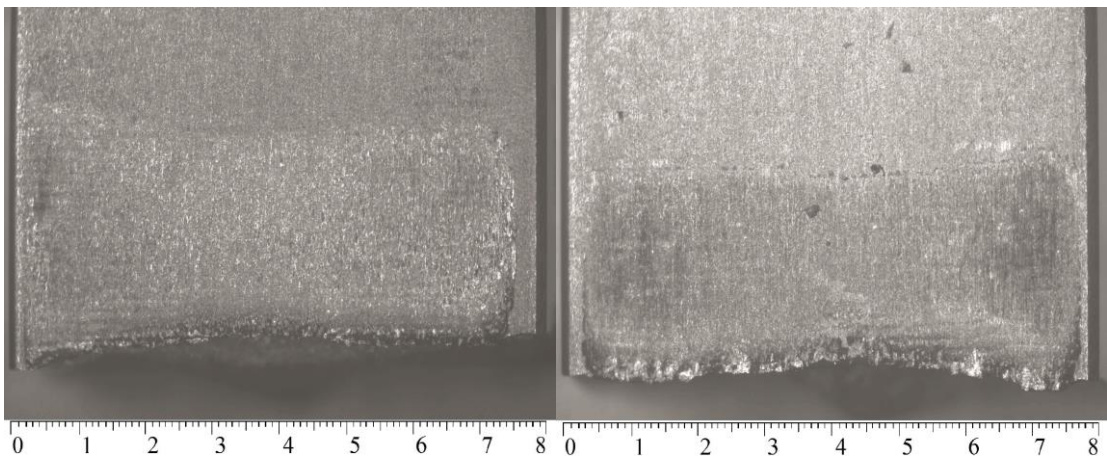


Figura 3-37 Contactos en probetas lisas y combinación 4

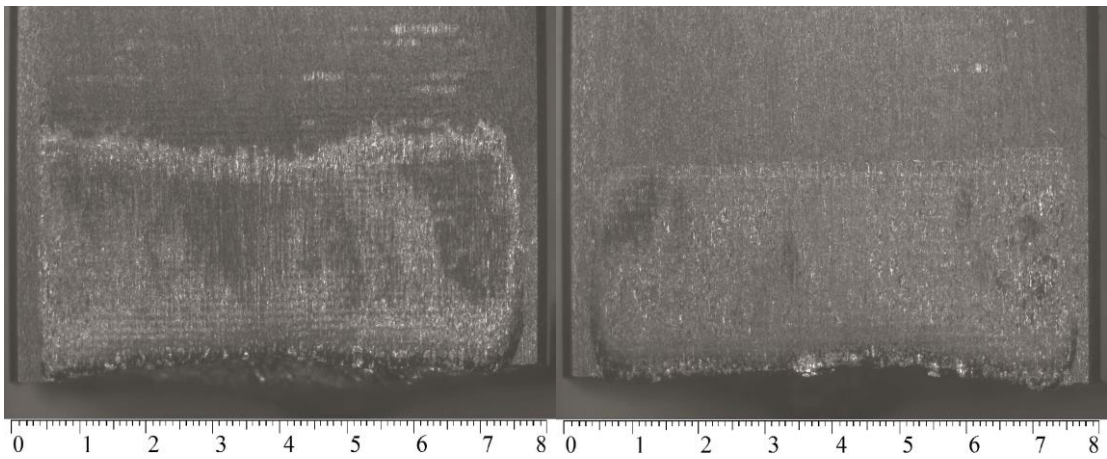


Figura 3-38 Contactos en probetas lisas y combinación 4



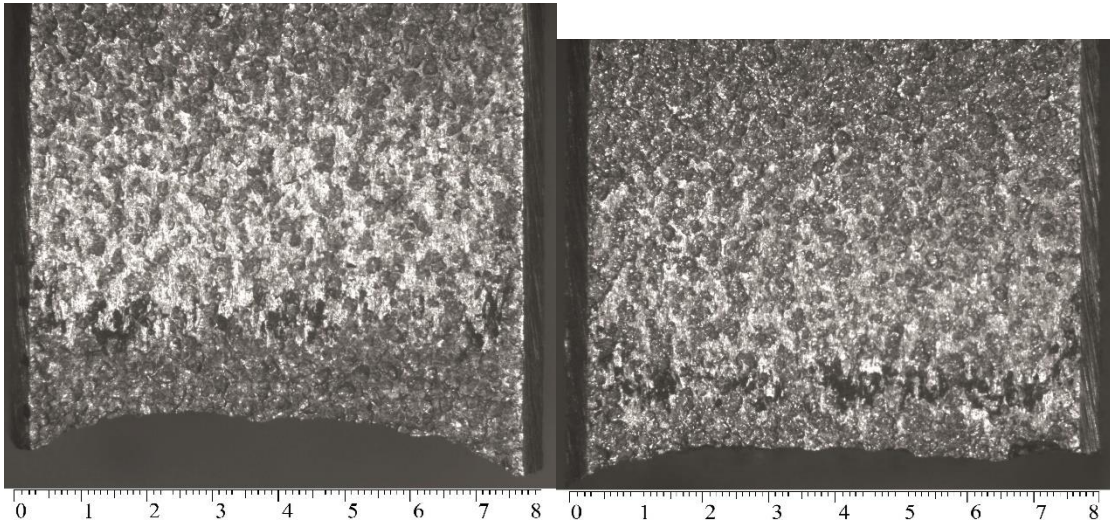


Figura 3-39 Contactos en probetas con shot peening y combinación 5

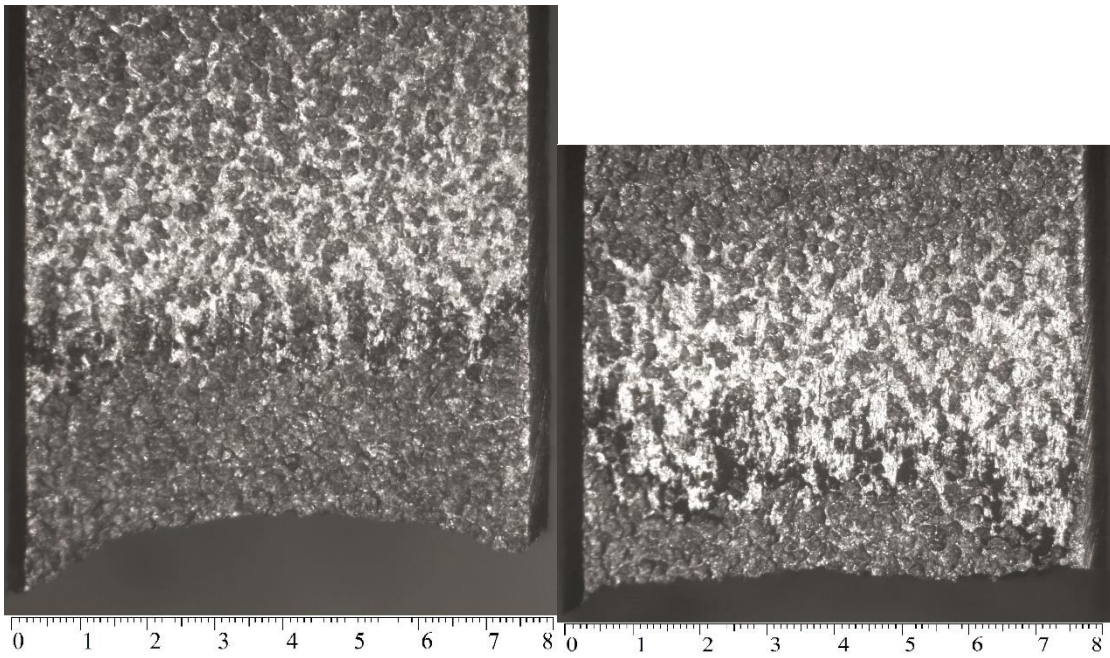


Figura 3-40 Contactos en probetas con shot peening y combinación 5

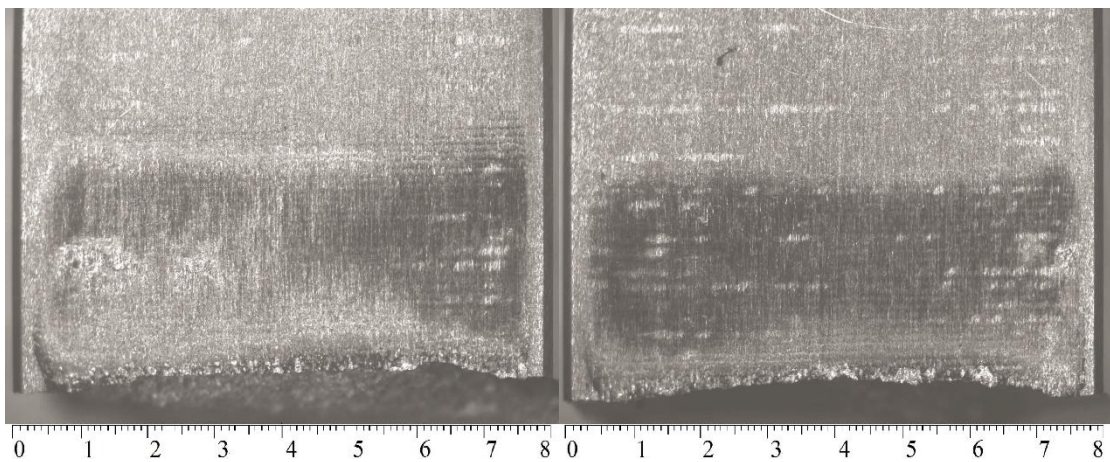


Figura 3-41 Contactos en probetas lisas y combinación 5



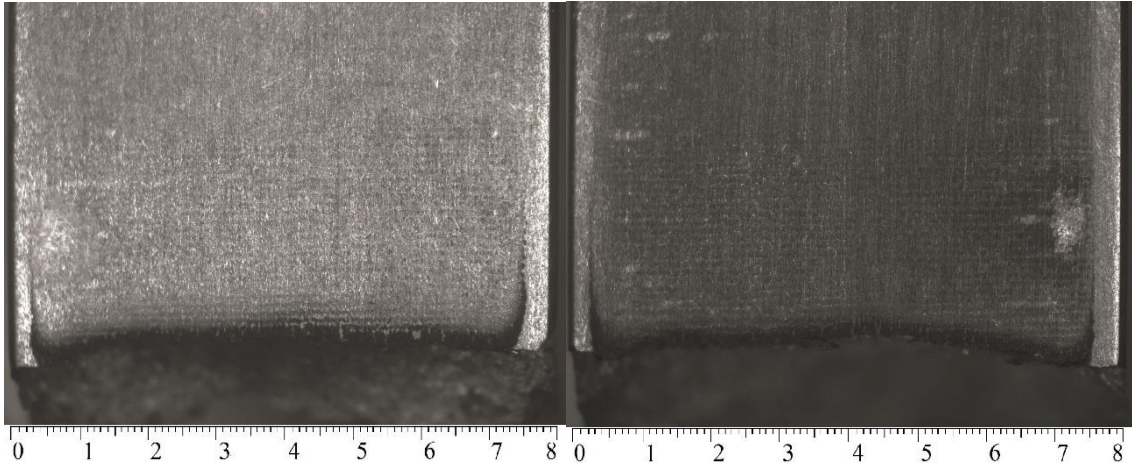


Figura 3-42 Contactos en probetas lisas y combinación 5

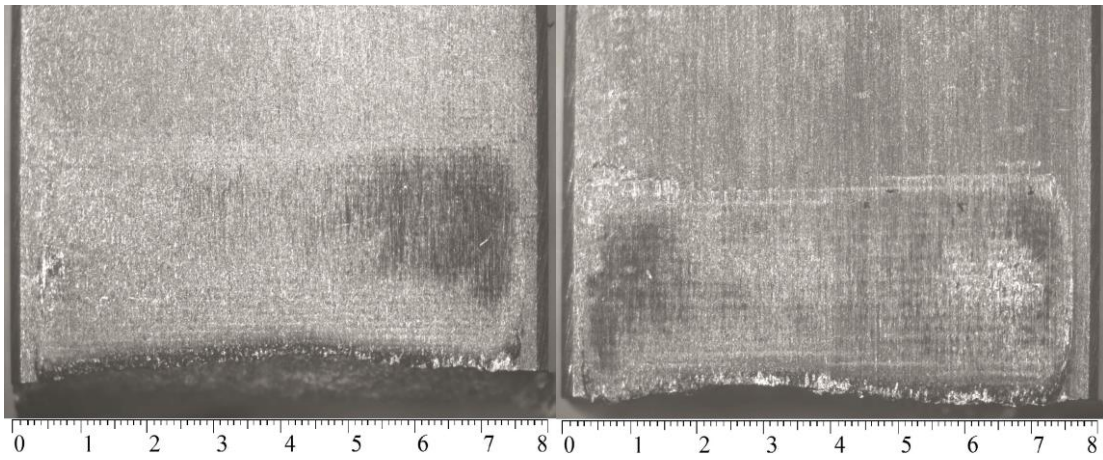


Figura 3-43 Contactos en probetas lisas y combinación 5

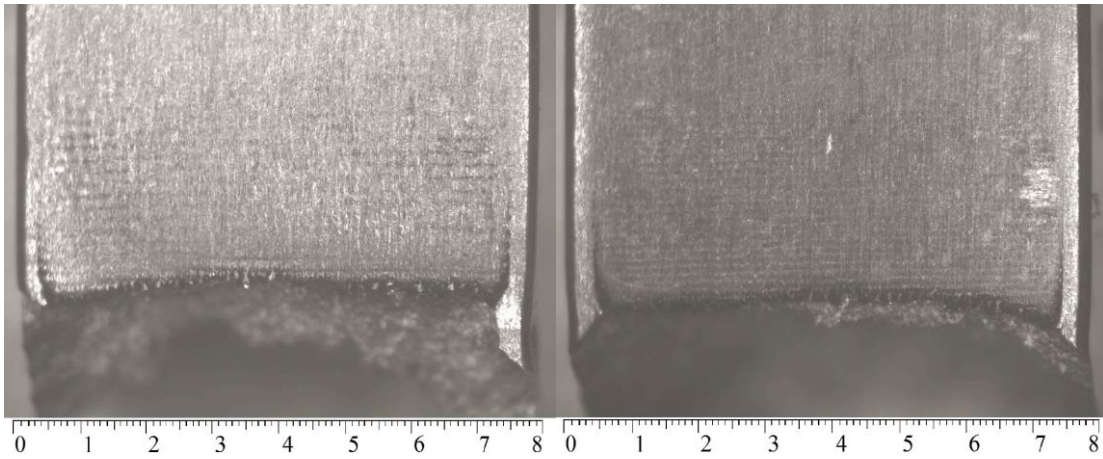


Figura 3-44 Contactos en probetas lisas y combinación 5

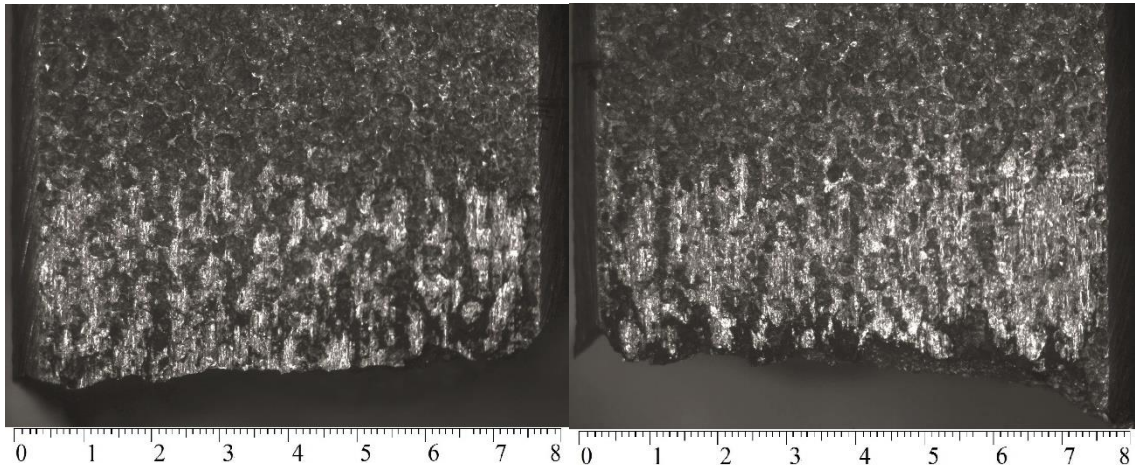


Figura 3-45 Contactos en probetas con shot peening y combinación 6

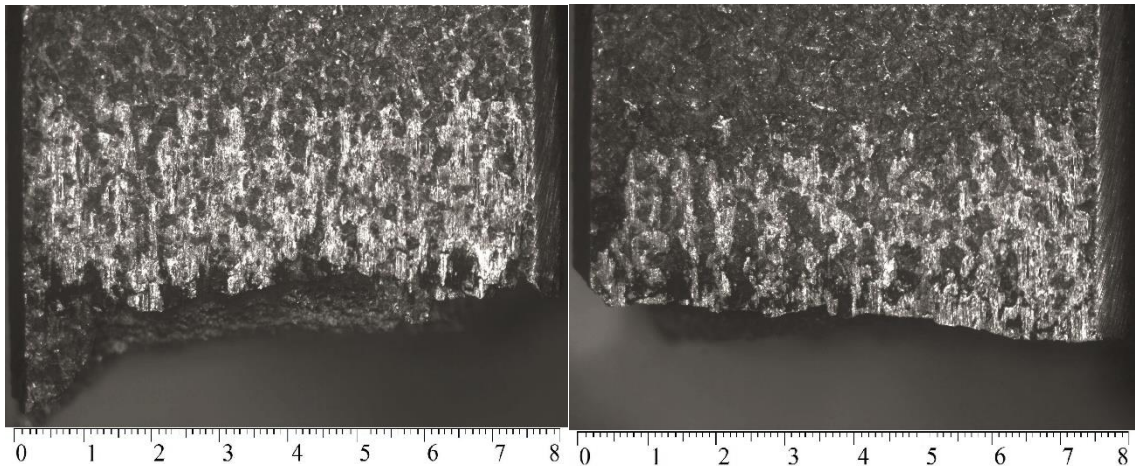


Figura 3-46 Contactos en probetas con shot peening y combinación 6

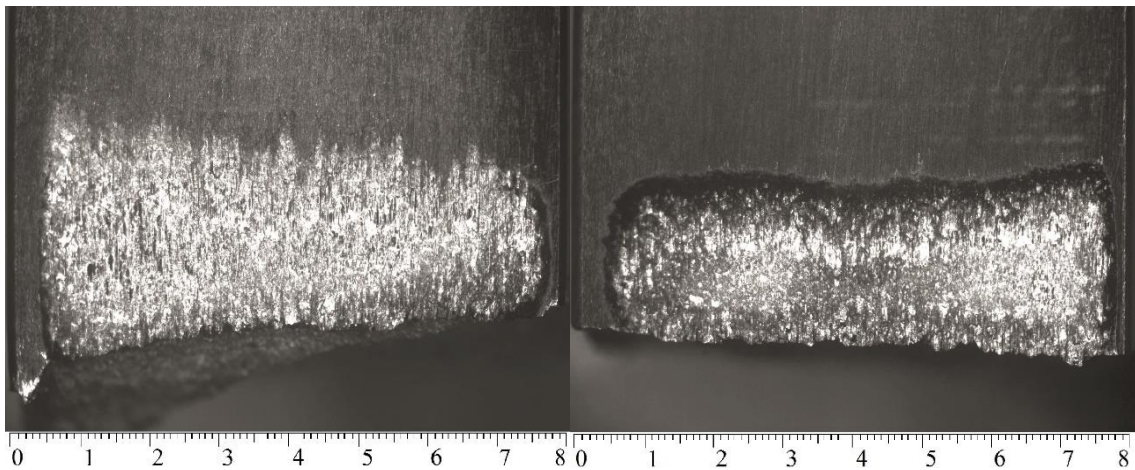


Figura 3-47 Contactos en probetas con shot peening y combinación 6



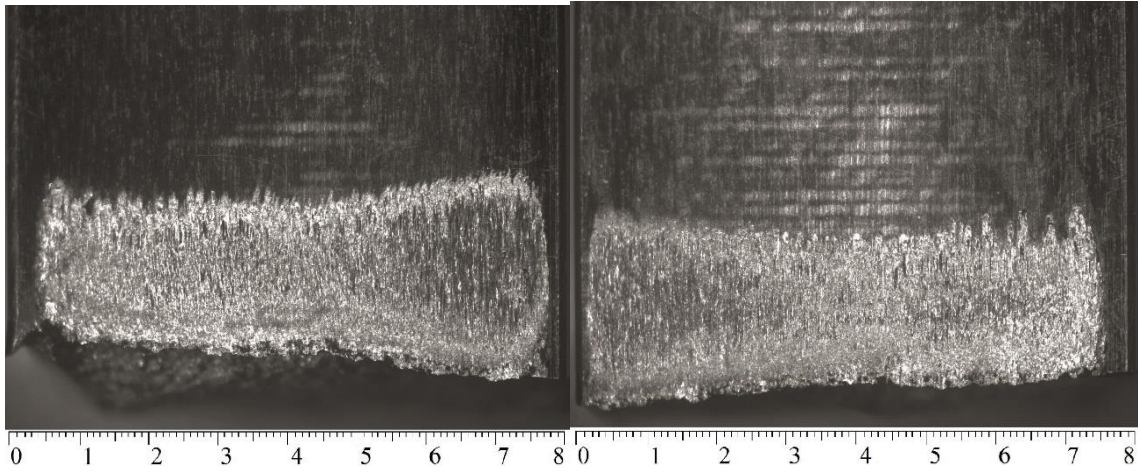


Figura 3-48 Contactos en probetas con shot peening y combinación 6

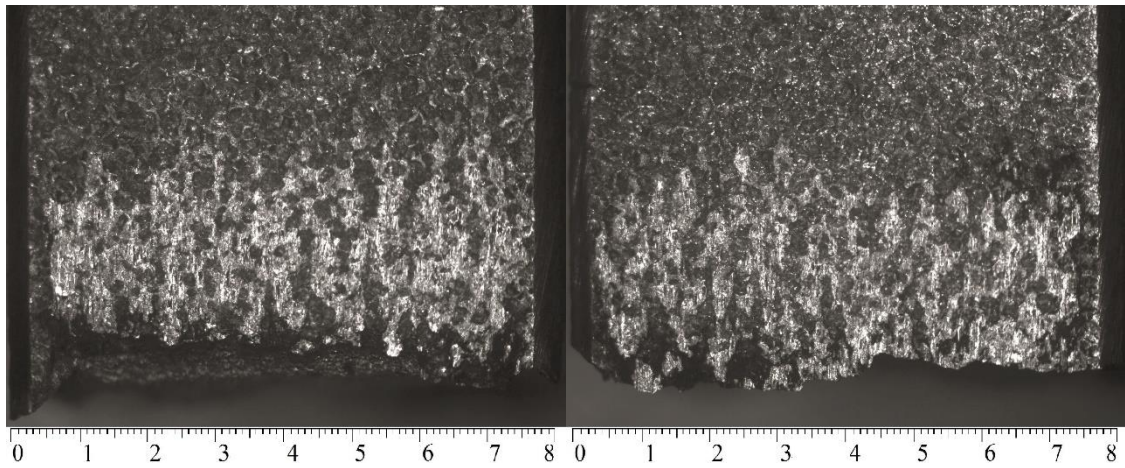


Figura 3-49 Contactos en probetas con shot peening y combinación 7

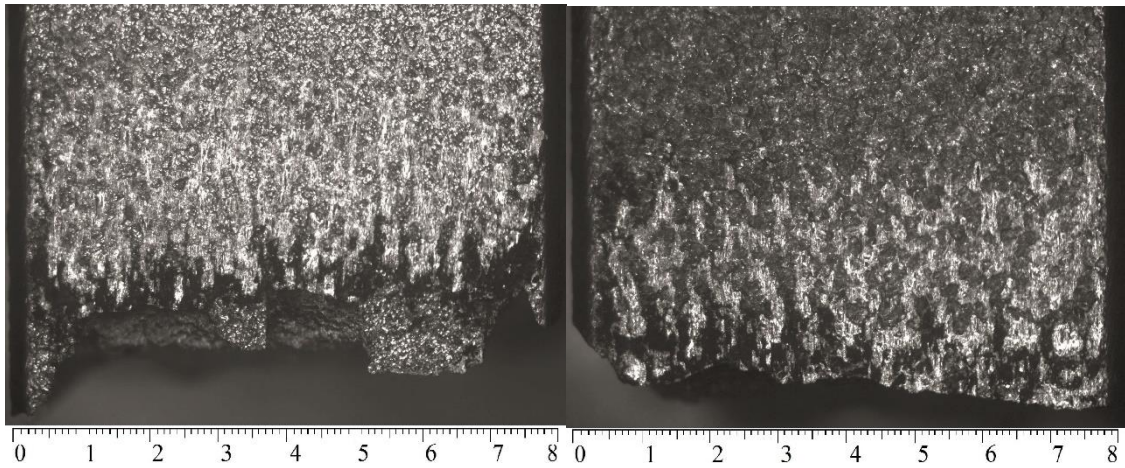


Figura 3-50 Contactos en probetas con shot peening y combinación 7



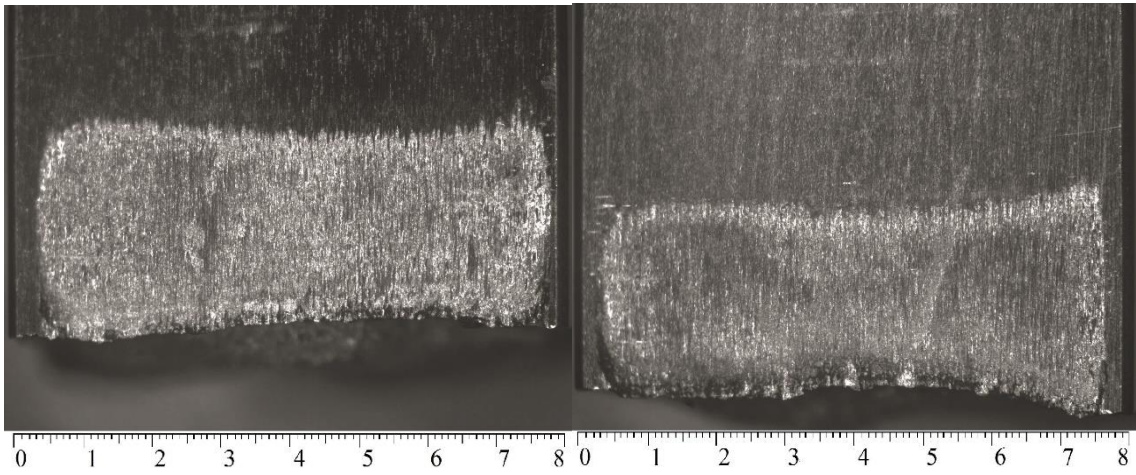


Figura 3-51 Contactos en probetas lisas y combinación 7

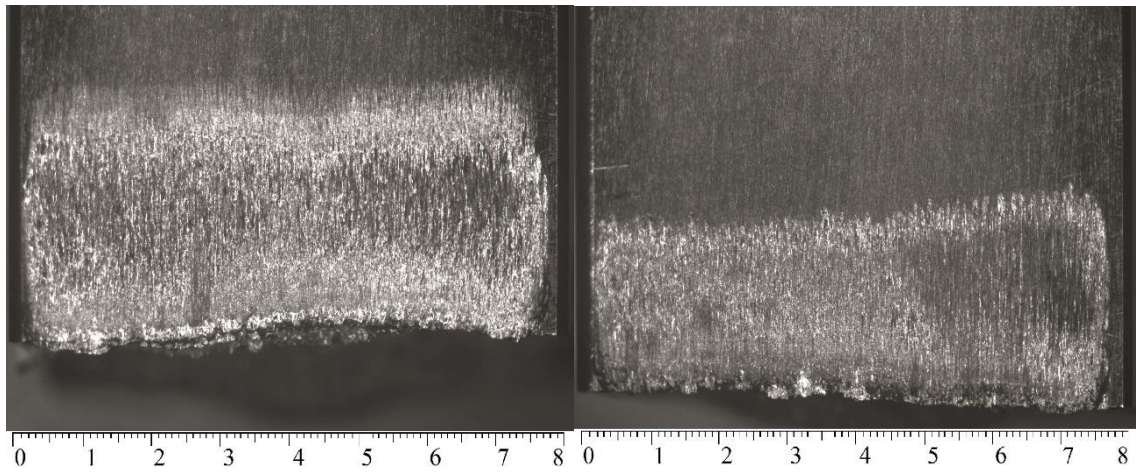


Figura 3-52 Contactos en probetas lisas y combinación 7

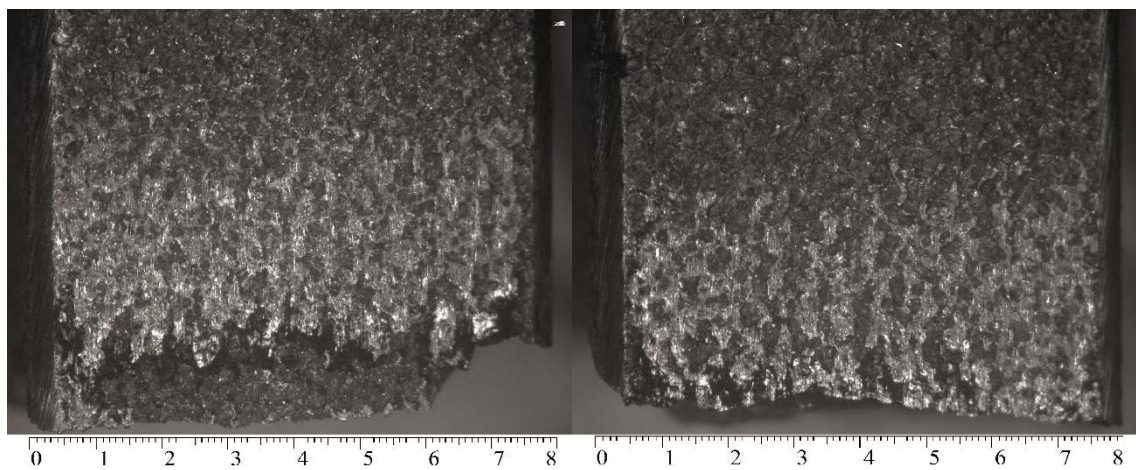


Figura 3-53 Contactos en probetas con shot peening y combinación 8



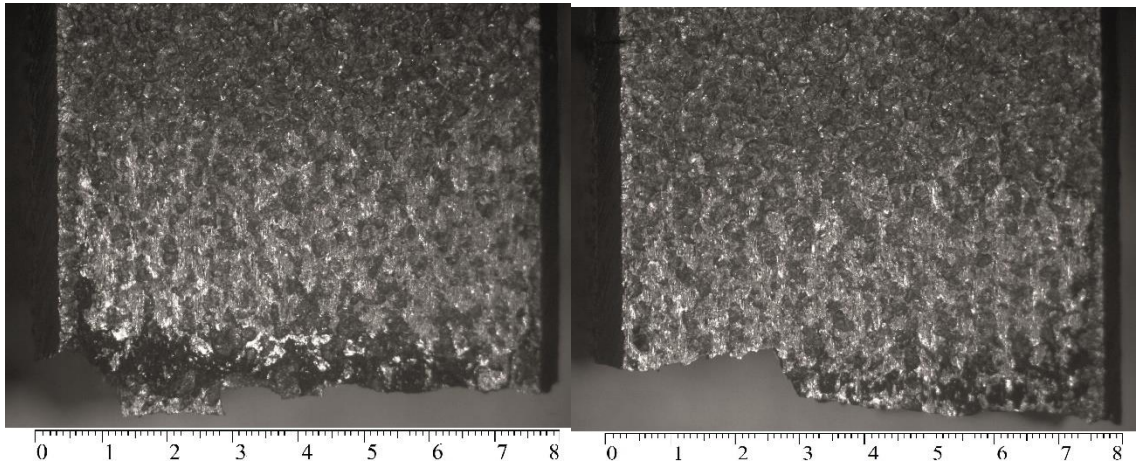


Figura 3-54 Contactos en probetas lisas y combinación 8

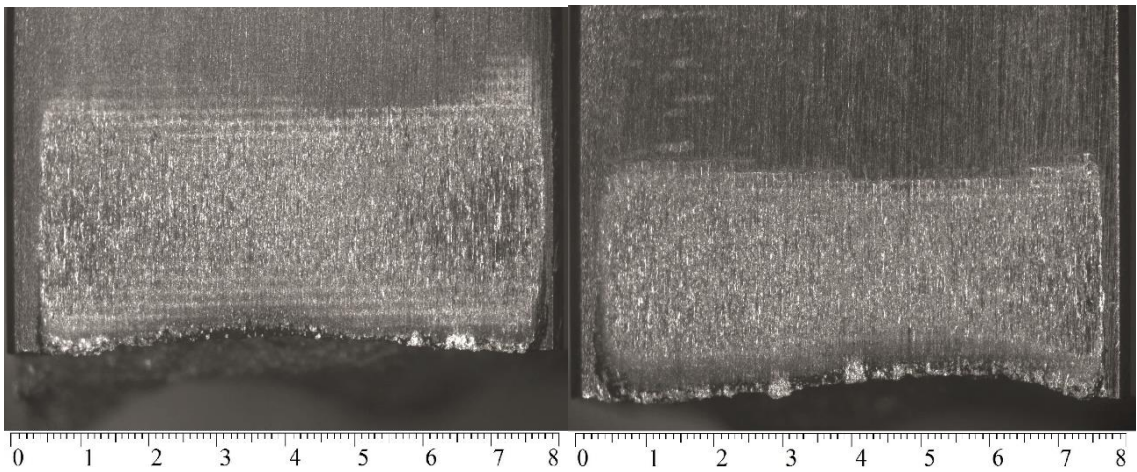


Figura 3-55 Contactos en probetas lisas y combinación 8

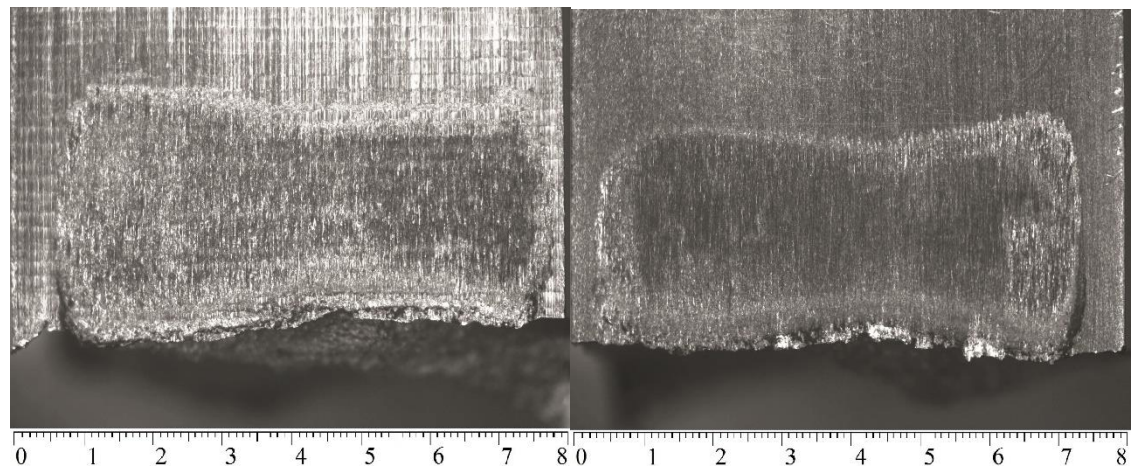


Figura 3-56 Contactos en probetas lisas y combinación 8

En estas imágenes se pueden observar características del fretting fatiga como son el desgaste, la corrosión en los extremos donde existe deslizamiento, polvo desprendido de la probeta y del contacto debido a este rozamiento. En las imágenes de las probetas sin tratamiento superficial de shot peening se puede observar un característico abarrilamiento debido a la geometría del ensayo donde cerca de los extremos se observa deformación plana en vez de tensión plana. Además estos hechos evitan el contacto entre las dos piezas en toda la superficie de la probeta quedando así una pequeña superficie libre en cada extremo. En algunas imágenes se pueden ver formas irregulares del contacto debido al montaje de los ensayos donde el contacto no ha quedado alineado completamente con la probeta y la distribución de la fuerza normal N queda de forma irregular.

Grafica tamaño de huellas

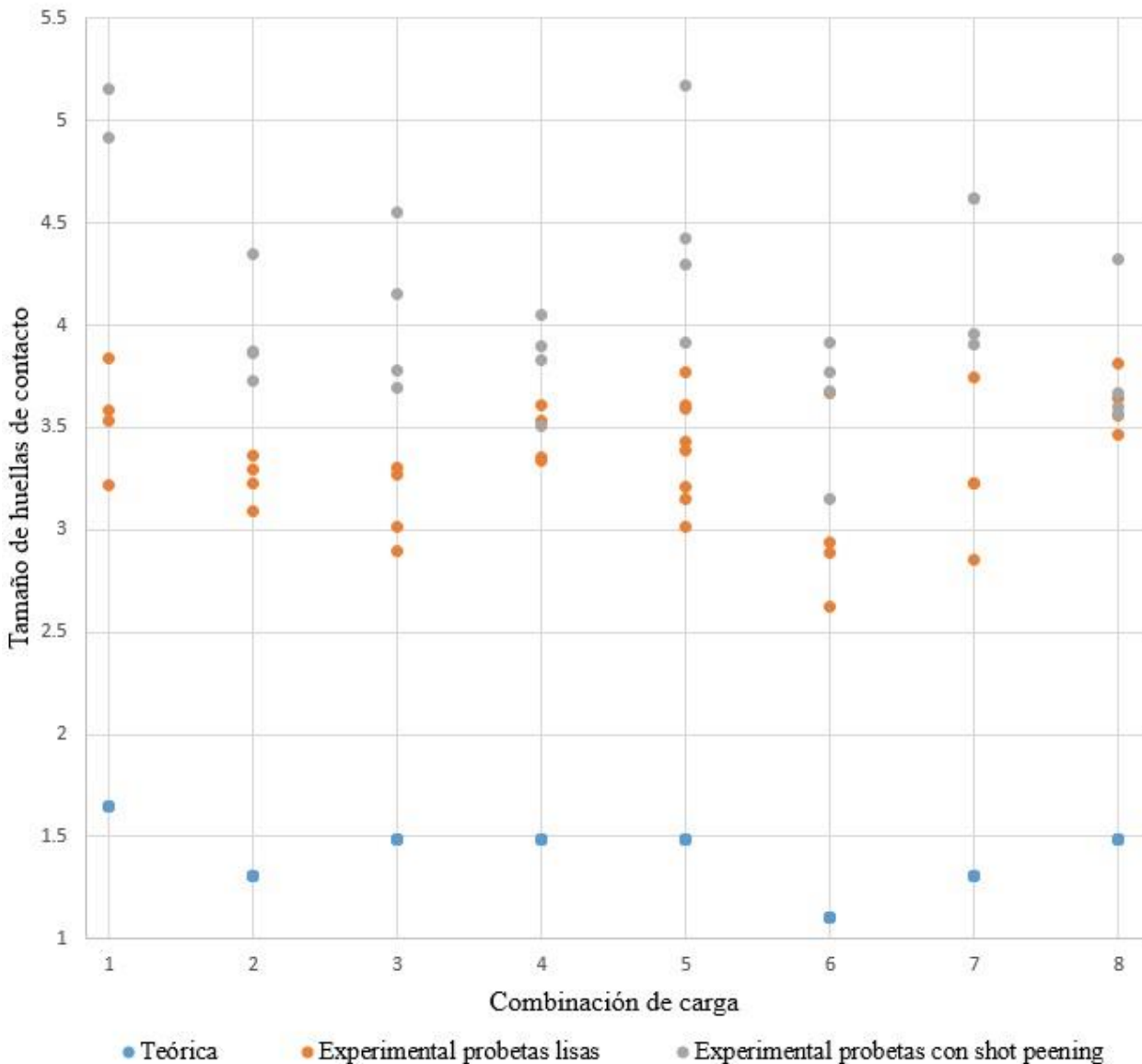


Figura 3-57 Gráfica comparativa tamaño huella teoría y experimental

De cada imagen se han obtenido las dimensiones de los contactos para compararlo así con los cálculos teóricos de la zona de contacto. En la gráfica 57 de este apartado se muestra los tamaños teóricos y los obtenidos al medir las probetas una vez finalizado los ensayos. De esta grafica se observa



# 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 llegando a vidas por encima de los 5 millones de ciclos los cuales se consideran Run Outs. Lo que se considera un gran aumento en la mejora de la vida debida al tratamiento superficial y a las tensiones que inducen estas, además de la característica rugosidad superficial y su alteración del coeficiente de rozamiento que esta conlleva.

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 experimentales 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..

Asi mismo en las imágenes obtenidas con los diferentes microscopios se observa inicios de grietas característicos. Irregularidades en los contactos debido a factores como alineamientos, deformación plana o características del ensayo por su geometría donde las fuerzas y tensiones no se distribuyen de forma regular

## 4.2 TRABAJOS FUTUROS

### 4.2.1 Comprobación del coeficiente de rozamiento mediante método alternativo

En este proyecto se ha planteado la corroboración de los resultados obtenidos para el coeficiente de rozamiento calculado con el método utilizado en el departamento que es el explicado en un apartado anterior.

Para la comprobación del coeficiente de rozamiento con un método alternativo al utilizado se ha obtenido recientemente una cámara de correlación de imágenes de alta frecuencia para obtener las imágenes durante un ensayo de fretting fatiga y comprobar el deslizamiento parcial y total que se obtiene durante dicho ensayo entre el contacto y la probeta.



*Figura 4-1. Fotografía prueba de ensayo correlación digital de imágenes.*

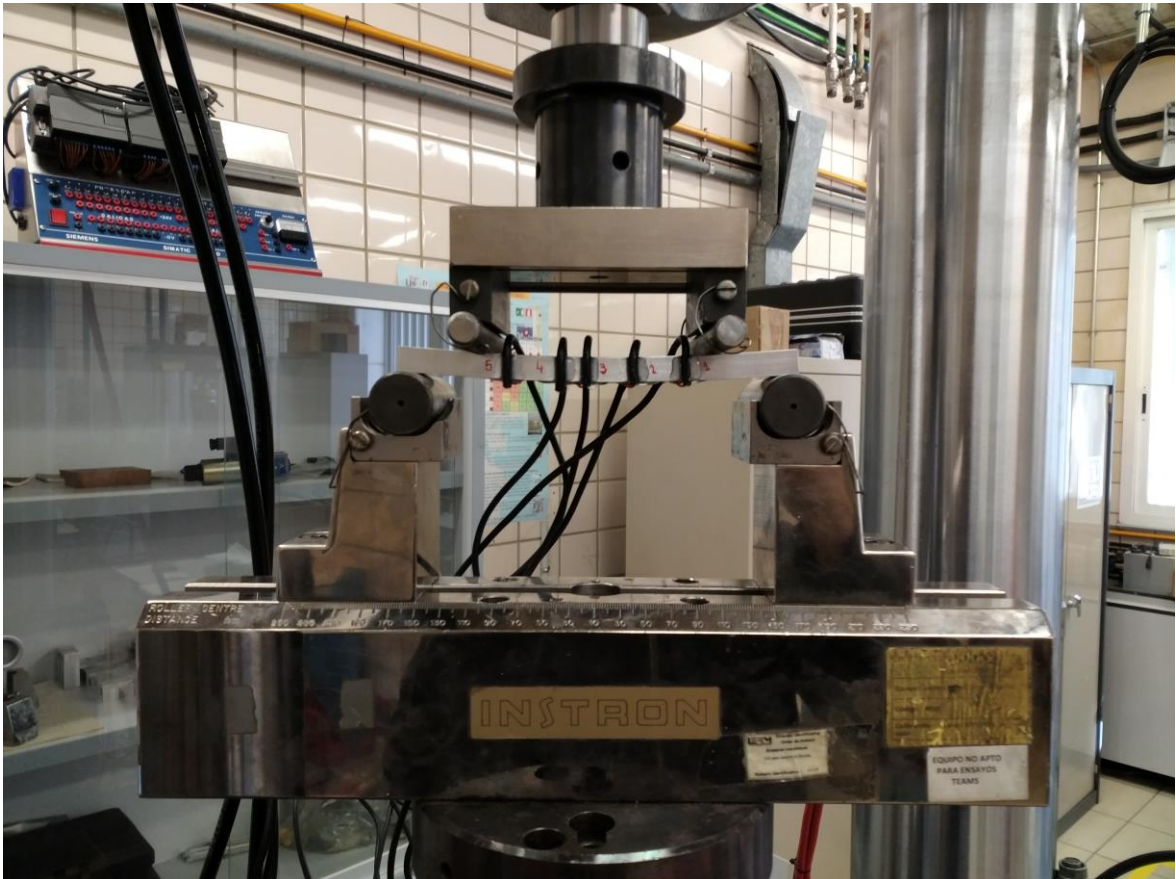
Como se aprecia en la imagen las diferencias de tensiones entre la probeta y los contactos debido a su rozamiento se identificarían por su movimiento relativo entre las piezas. Este quedaría registrado por el movimiento del moteado que tiene la probeta central y que identifica el software. Se podrían calcular las tensiones y los deslizamientos relativos entre piezas esta probeta y los contactos cilindricos que tiene acada lado.

#### **4.2.2 Medición de la relajación de las tensiones residuales**

Se van a realizar una serie de ensayos en los que se medirá la relajación de tensiones residuales que se producen a lo largo de los ensayos de fretting fatiga. Las tensiones que se relajan con cada ciclo son las tensiones inducidas por el tratamiento superficial de shot peening. Las mediciones de las tensiones residuales se harán en probetas que previamente han sido ensayadas durante un número de ciclos determinado. El número de ciclos al que se interrumpirán los ensayos serán 1, 10, 100 y los ciclos necesarios para la rotura de la probeta. Con los resultados se obtendrá una curva experimental de estas tensiones frente a ciclos y la cual se realizará con varias combinaciones de cargas diferentes. Con esto obtendremos un relación directa que aplicar en cálculos posteriores de vida para fretting fatiga.

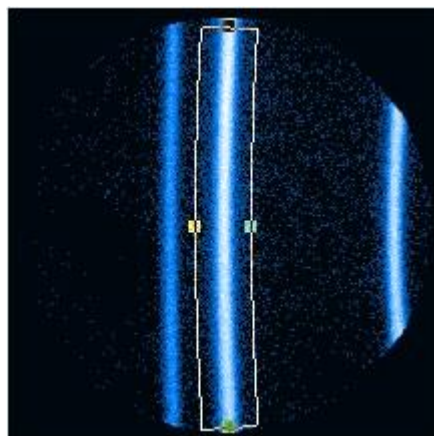
Se realizaran 3 tipos de ensayos para el estudio de la relajación de tensiones. Estos se diferencian unos de otros por el perfil de tensiones que van a tener según su profundidad. El primer ensayo y más representativo es el ensayo de fretting fatiga que reproduce exactamente los ensayos de fretting fatiga realizado en la batería de ensayos. Se elegirán combinaciones de cargas iguales a las de otros ensayos en los que la tensión máxima será de entre todas, las tensiones más bajas, las tensiones medias y las tensiones más altas.

Se realizará una simulación computacional mediante elementos finitos en los que se inducirá la tensión residual obtenida por el tratamiento y se estudiará su relajación elastoplastica en cada ciclo de carga y descarga. Esto junto con los datos experimentales dará una visión completa de los hechos ocurridos durante un ensayo de fretting fatiga en los que la probeta tiene aplicado shot peening.



*Figura 4-2. Esquema ensayo flexión 4 puntos.*

Posterior a los ensayos de relajación se medirán estas probetas en mediante ensayos semidestructivos de Difracción de rayos X. En este caso no será solo en la supeficie si no que se profundizará hasta una medida de 500 micras aproximadamente. Esta profundización se realizará mediante el método de electropulido o ataque electrolítico el cual elimina capas muy finas de material. La probeta se mide nuevamente cada vez que se retira una capa de material. Las medidas en profundidad necesitarán una corrección con las ecuaciones matemáticas aplicando fórmulas de Moore y Evans según la norma (M.G. Moore, W.P. Evans; SAE Trans. 66 ; 1958; 340-345)



*Figura 4-3. Ángulo de Bragg observado con un difractometro de rayos X*



# REFERENCIAS

---

- [1] W. A. J. Albert. (1938). Arch. Miner. Geognose Berg. Huttenkunde 10, 215.
- [2] A. Wöhler. (1971) Test to determine the forces acting on railway carriage axles and the capacity of resistance of the axles. Engineering 11, 199.
- [3] Eden, E. M. Rose, W. N. and Cunningham, F. L. (1991) The Endurance of Metals, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, pp. 875.
- [4] Gillet, H.W. and Mack, E.L. (1924) Notes on Some Endurance Test of Metals, *Proc. Am. Soc. Testing Mater.*, 24, pp. 476.
- [5] Tomlinson, G. A. (1927) The Rusting of Steels Surfaces in Contact, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A.*, 115, pp. 472-483.
- [6] Peterson, R. E. and Wahl, A. M. (1935) Fatigue of Shafts at fitted Members, with a related Photoelastic Analysis, *Trans. ASME, J. appl. Mech.*, 57, A1-A11, pp. 69-74.
- [7] Almen, J. O. (1937) Lubricants and False Brindling of Ball and Roller Bearing, *Mechanical Engineering*, 59, pp. 415-422.
- [8] Warlow-Davies, E. J. (1941). Fretting Corrosion and Fatigue Strength: Brief Results of Preliminary Expreiments, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 146, pp. 32-38.
- [9] Tomlinson, G. A., Thorpe, P. L., Gough, H. J. (1927) An investigation of the fretting corrosion of closely fitting surfaces. *Proceedings Institution Mechanical Engineers* 141, pp. 223-249
- [10] Godfrey, D. (1950). Investigation of Fretting Corrosion by Microscopic Observation, *NACA Technical Note* 2039.
- [11] Bowden, F. P. and Tabor, D. (1950) The Friction and Lubricant of Solids- Part I, *Oxford University Press*, Oxford.
- [12] McDowell, O. J. (1953) Fretting Corrosion Tendencies of Several Combinations of Materials, *Symposium on Fretting Corrosion, ASTM, Philadelphia*, pp. 40-53.
- [13] Uhlig, H. H. y Ming-Feng. (1954), Fretting corrosion of mild steel in air and nitrogen. *Journal of Applied Mechanics* 21, 395-400.
- [14] Uhlig, H. H., (1954) A Mechanism of Fretting Corrosion, *Journal of Applied Mechanics* 21, pp. 401-407.

- [15] Fenner A. J. and Field, J. E. (1958) Le Fatigue Dans les Conditions de Frottement, *Rev. Mét.*, 45, pp. 475-485.
- [16] R. Tam-Amaya, J. Vázquez, C. Navarro, J. Dominguez, (2011) Caracterización de una máquina para realizar ensayos de fretting fatiga con contacto cilíndrico, *Anales de Mecánica de Fractura* 28, Vol. 1, 323-328.
- [17] 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.
- [18] AMS-2430: Shot peening, automatic, SAE Standards, AMS B Finishes Processes and Fluids Committee, 2009.
- [19] R. Tam-Amaya, J. Vázquez, C. Navarro, J. Dominguez, Ensayos y estimación de vida en fatiga por fretting con contacto cilíndrico. *Grupo Español de Fractura*, Vol. 1, 159, 2012
- [20] ASTM E837-13a (tensiones no uniformes), Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.
- [21] 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.
- [22] D. Nowell, D.A. Hills, Mechanics of fretting fatigue tests, *Ins. J. Mech. Sci.* Vol. 29, No. 5, 355-365, 1987.
- [23] Vázquez, J., Navarro, C., Dominguez, J., (2012) A new method for obtaining the stress field in plane contacts. *International Journal of Solids and Structures*.
- [24] Hertz, H. (1882) Über die Berührung fester elastischer Körper. *Jnl. Reine und angewandte Mathematik* 92, 156-171