

HETEROGENEIDAD DEL MATERIAL COMO PALIATIVO EN FRETTING

D. Erena*, J. Vázquez, C. Navarro, J. Domínguez

E.T.S.I. Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España

* Persona de contacto: deg@us.es

RESUMEN

En la actualidad, la fabricación aditiva con metales es una técnica en auge que permite la fabricación de piezas con formas difíciles de realizar mediante otros métodos de fabricación. El comportamiento a fatiga del material del componente, fabricado con esta técnica, es un campo en desarrollo a día de hoy y del que pocos datos se tiene. En este estudio se plantea analizar el posible efecto que pudiera tener la heterogeneidad del material, intencionadamente introducida, en componentes sometidos a fretting. Para ello, se ha simulado la usual configuración en fretting de un contacto cilindro-semiplano, en el que la heterogeneidad se ha impuesto en el semiplano mediante la introducción de un hueco con forma circular. En este trabajo se han analizado y comparado con respecto al caso de un par de contacto con material homogéneo, los campos de tensiones/deformaciones, además del parámetro de fatiga multiaxial Smith-Watson-Topper en las zonas más susceptibles de sufrir por fretting. Para generalizar los resultados, se han considerado diferentes configuraciones en las que se han ido variando diversos parámetros, como son: radio del hueco, posición del mismo, coeficiente de rozamiento y tamaño de la zona de deslizamiento.

PALABRAS CLAVE: Fretting, material heterogéneo, modelo numérico, contacto cilíndrico.

ABSTRACT

Currently, additive manufacturing with metals is a rising technique that allows manufacturing pieces of difficult shapes for other kind of methods. The fatigue behaviour of the material of the component manufactured with this technique, is a field in development. This research tries to analyse the possible effect of using heterogeneous material, intentionally introduced, in components under fretting effects. For that the usual configuration in fretting between a cylinder and a half-plane, in wich it has been introduced a circular hole has been simulated. This work analyses and compares respect a case with homogeneous material, the stress and strain fields and Smith-Watson-Topper multiaxial fatigue parameter in the areas sensitives to fretting. Different configurations changing different parameters in relation to contact length like: hole radius, position of the hole, friction coefficient and the size of the slip zone have been considered.

KEYWORDS: Fretting, heterogeneous material, numeric model, cylindrical contact.

1. INTRODUCCIÓN

Fretting es un fenómeno de daño que puede aparecer sobre superficies presionadas entre sí y que se encuentran sometidas a desplazamientos relativos micrométricos que fluctúan con el tiempo. Además de las tensiones de contacto producidas por la presión que mantiene unidas las superficies, los componentes bajo la acción del fretting están sometidos a desplazamientos relativos que combinados con la fricción existente entre las superficies de contacto, dan lugar a un campo de tensiones tangenciales en las superficies en contacto. La combinación de estos estados de carga puede conllevar a diversos tipos de daño como son: el desgaste, la oxidación o la nucleación de grietas en la superficie [1]. De forma general, y contemplando únicamente los casos de carga, se puede dividir el fenómeno de fretting en dos

tipos. En el primero de ellos además de las tensiones de contacto, uno de los componentes está sometido a una tensión fluctuante con el tiempo. En el segundo caso solo se contemplan las tensiones producidas por el contacto. Siendo este último el estudiado en este trabajo.

Existen diversos trabajos que arrojan luz sobre distintos paliativos en la fatiga por fretting [2]. Los más habituales son aquellos que modifican el diseño para de una u otra forma alterar los campos de tensiones/deformaciones de forma beneficiosa y los que modifican las superficies en contacto. La modificación de las superficies puede ser la introducción de tensiones residuales en uno de los componentes mediante, por ejemplo, shot peening, o el empleo de recubrimientos para modificar el coeficiente de rozamiento.

Este trabajo se centra estrictamente en el diseño, más en concreto, en la modificación de la geometría de los elementos en contacto de forma que se consiga mitigar, en la medida de lo posible, la influencia del fretting en la iniciación de grietas. Esta idea está ligada a los avances en la fabricación aditiva, gracias a la cual se puede fabricar casi cualquier tipo de geometría de forma rápida y precisa y todo ello con una amplia variedad de metales, entre los que se encuentran el acero, el aluminio y el titanio. Sin embargo este es un campo que está en pleno desarrollo y del que no muchos datos certeros acerca del comportamiento del material se conocen. En lo referente al comportamiento a fatiga de los componentes creados mediante la fabricación aditiva, este difiere del comportamiento del material fabricado de la forma tradicional [3]. Esto es debido al propio método de fabricación capa a capa, que provoca una evidente anisotropía al componente así como la inclusión de defectos no deseados y tensiones residuales. En general, el nuevo material no es completamente homogéneo y debe someterse a tratamientos térmicos para mejorar sus propiedades mecánicas. Sin embargo, no cabe duda que será el proceso de fabricación estrella en un futuro muy cercano por lo que es importante estudiar las ventajas que ofrece. Además, este método de fabricación ofrece cada día unos precios más competitivos por lo que pronto empezará a hacerse hueco en el mercado de la fabricación.

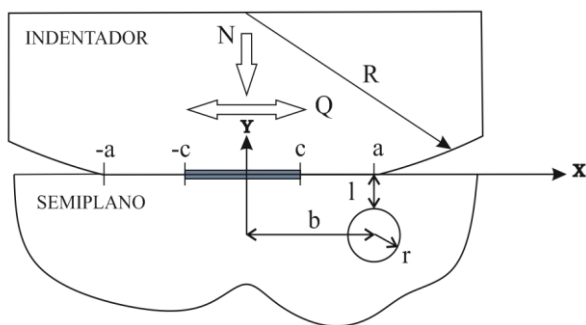


Figura 1. Esquema geometría y parámetros.

En un ensayo común de fretting se enfrentan dos superficies, en este caso una de ellas es cilíndrica y la otra totalmente plana. Sobre ellas se aplica una carga normal por unidad de espesor, N , que se mantendrá constante. Posteriormente se aplica una carga oscilatoria, tangencial, cíclica y de amplitud constante, Q , como se muestra en la figura 1. La experiencia en ensayos realizados demuestra que las grietas siempre aparecen en las cercanías del borde de la zona de contacto. En base a esto, existe la posibilidad de introducir uno o varios agujeros en las cercanías de esas zonas, y con ello alterar los campos de deformaciones y tensiones de forma que sea posible evaluar en qué casos la introducción de esos agujeros pueda ser o no beneficiosa de cara a un aumento de vida. Para simplificar el modelo y los parámetros a tener en cuenta, en este trabajo se introducirá un único hueco. Si se consigue una mejora con un único hueco, es

de esperar que la introducción de otro hueco en el extremo opuesto conlleve una mejora en ambas zonas, y por tanto se retrase la iniciación de grietas en las dos zonas más desfavorables del sistema.

Para analizar el comportamiento de esta nueva geometría se utilizará la combinación de parámetros que se muestran en la figura 1, cuyos valores están referidos al semiancho de la zona de contacto teórico, a , que para el caso cilindro-semiplano viene dado por la ecuación (1).

$$a^2 = \frac{8RN(1-\nu^2)}{\pi E} \quad (1)$$

Donde, R es el radio del cilindro indentador, ν el coeficiente de Poisson y E el módulo de Young.

Mediante un modelo de elementos finitos se ha simulado el comportamiento frente a fretting de diferentes casos en los que se han ido variando la posición relativa del agujero así como las condiciones del contacto. Para ello se han variado los siguientes parámetros (véase figura 1): el ligamento resultante entre la zona de contacto y el borde superior del agujero, l , el propio radio del agujero, r , y la distancia horizontal del agujero, b . Por otro lado, se realizan cada una de estas simulaciones para distintos casos de carga, es decir, para distintas combinaciones de $Q/\mu N$, parámetro que gobierna el tamaño de la zona de deslizamiento según la expresión (2).

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \left| \frac{Q}{\mu N} \right|} \quad (2)$$

Donde c es el semiancho de la zona de adhesión.

Los resultados que aquí se obtengan abrirán las puertas al estudio de un sistema sometido a fatiga por fretting, que es el siguiente paso natural.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Aunque existe un estudio analítico en el que se analiza un par de contacto similar al considerado [4]. En dicho trabajo se estudia la influencia tanto de un hueco como de una inclusión, considerando condiciones de deslizamiento global y un indentador rígido, llegando a la conclusión de que la influencia de ambos defectos causa alteraciones importantes en la distribución de las tensiones y deformaciones de contacto. Puesto que las condiciones aquí estudiadas son distintas no es posible comparar dicho método analítico con los resultados mostrados en el presente trabajo, sin embargo, sustentan la idea inicial que da pie a este estudio.

Para las simulaciones se han realizado dos modelos distintos. Uno de ellos es el caso común del par de contacto formado por un cilindro y un semiplano, que se

utilizará para comparar posteriormente los resultados con respecto a los casos con agujero. Además este modelo sencillo sirve también para comparar sus resultados con los obtenidos mediante modelos analíticos [5], certificando así su validez. El modelo se ha realizado de forma que se asegure una malla conforme en la zona del contacto con el fin de evitar problemas numéricos.

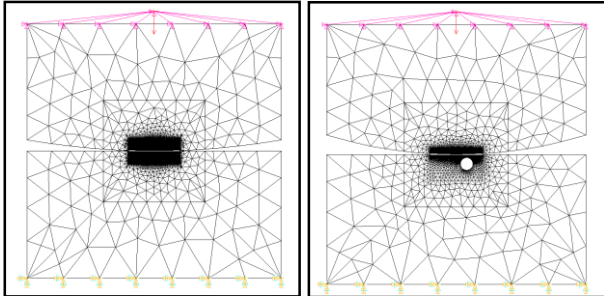


Figura 2. Malla modelo elementos finitos.

El modelo empleado está totalmente parametrizado de forma que el ancho y la altura totales del modelo son diez veces el tamaño de la zona de contacto a , tamaño que asegura un comportamiento similar al de un plano semi-infinito [6]. Las constantes empleadas se adjuntan en la tabla 1, las cuales pretenden simular el comportamiento típico de un acero. El comportamiento del material se ha considerado totalmente elástico lineal y en un estado de deformación plana. Se ha optado por un estado de deformación plana para disminuir el coste computacional, además de poder comparar los resultados del modelo numérico con los analíticos del caso sin agujero.

Tabla 1. Parámetros empleados modelo FEM

Radio Indentador, R	10 mm
Módulo de Young, E	210 GPa
Coefficiente de Poisson, ν	0.3

El modelo se reproduce en tres pasos de carga. En el primero de ellos se aplica la carga normal, $-N$, manteniéndola constante durante los pasos restantes. En el segundo de los pasos se aplica una carga tangencial, Q , hacia la izquierda, y en el tercero esa misma carga pero hacia la derecha, de forma que se reproducen las condiciones de un ensayo de fretting.

En la línea inferior del semiplano se restringen los movimientos en ambas direcciones así como los giros. Las condiciones de contorno del indentador varían del primer al segundo paso de carga. En el primer paso de carga se restringen los movimientos horizontales y los giros, sin embargo para aplicar las cargas tangenciales, en el segundo y tercer paso de carga, es necesario eliminar esa restricción, que se aplica directamente a un nodo maestro que controla el movimiento de toda la línea superior del indentador.

Los cálculos se han realizado en el software comercial ANSYS™ 15, utilizando para ello la interface APDL. El elemento empleado para modelar el conjunto es el PLANE182, para el contacto se han empleado los elementos CONTA169 y TARGE171. El valor de N , se fija para todas las simulaciones en 500 N/mm, lo que da una presión máxima de contacto, p_0 , en el caso sin agujero de 1354 MPa y un semiancho de la zona de contacto, a , de 0.235 mm. Dicho semiancho a , esta discretizado con 150 elementos, siendo la longitud de cada elemento de 1.5 μm . El número total de elementos varía en función del tamaño del agujero y de su posición desde 40000 a 160000.

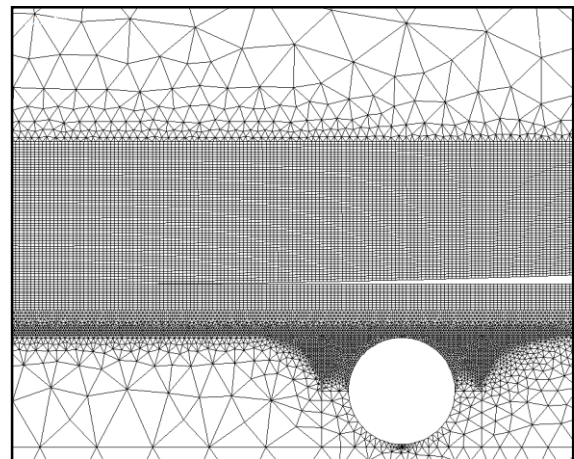


Figura 3. Detalle modelo elementos finitos, zona de contacto y hueco.

3. CRITERIOS. ANÁLISIS DE DATOS

Para determinar si la influencia del orificio es favorable o no, es necesario establecer un criterio de comparación entre los casos con agujero y sin ellos. Para ello en este caso se ha optado por emplear un parámetro de fatiga multiaxial. Se ha decidido utilizar el parámetro de SWT, [7] el cual se muestra en la ecuación (3), pero de la forma desarrollada en [8].

$$SWT = \left(\sigma^n \frac{\Delta \epsilon}{2} \right)_{\text{máx}} \quad (3)$$

Un esquema de este método se muestra en la figura 4. En primer lugar, mediante los resultados producidos por un modelo de elementos finitos se busca el punto más desfavorable de la superficie, que se tomará como aquel que produce el mayor valor del parámetro SWT, evaluado únicamente en la dirección horizontal. Este punto será considerado como el origen de las distintas líneas que se trazarán. Seguidamente se trazan las líneas, distribuidas homogéneamente entre $\theta = 60^\circ$ y $\theta = -60^\circ$ (una por cada grado), con una longitud determinada, 25 μm en este caso. De esta forma el área barrida es del orden del tamaño microestructural típico para un metal.

Hecho esto se calcula el parámetro de SWT a lo largo de cada una de las líneas en distintos puntos, pero con la peculiaridad de que para todos esos puntos, la orientación del plano material considerada para evaluar el parámetro no es la del plano crítico, es decir la que cumple la ecuación (3), sino que es aquella que coincide con la orientación impuesta por θ .

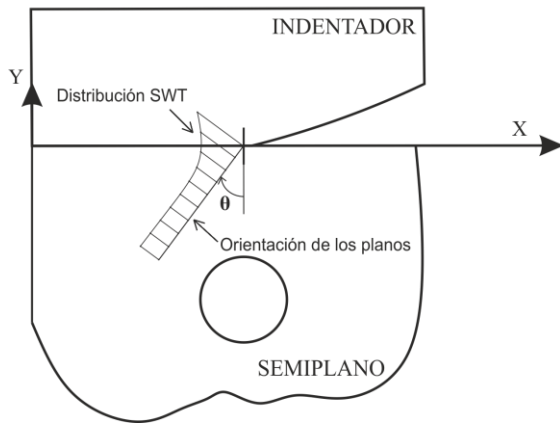


Figura 4. Esquema procedimiento para iniciación de grietas.

Obtenidos los valores del parámetro para cada punto, se calcula el promedio para cada uno de los planos materiales considerados. El valor promedio máximo de entre todos los planos marcará la dirección más susceptible para la iniciación de grietas. El resultado de este procedimiento se muestra, a modo ilustrativo, en la figura 5.

De aquí en adelante las referencias al parámetro SWT se referirán al valor del parámetro calculado mediante este método.

4. PLANIFICACIÓN DE SIMULACIONES

Para comprobar las posibilidades de mejora que pueda ofrecer este método se han realizado una serie de simulaciones. Los valores de los parámetros geométricos para estas simulaciones se toman de la tabla 2. Cada una de estas simulaciones se ha realizado para cuatro combinaciones distintas del valor $Q/\mu N$, como son 0.2, 0.5, 0.8 y 1. Siendo el valor de la unidad el caso con deslizamiento total, por lo que es conveniente, para evitar problemas de convergencia, utilizar un valor ligeramente inferior al mismo. Posteriormente se estudiará también la influencia en la posición horizontal, b , del agujero. Esto se hará una vez que se tengan optimizados los valores del ligamento y el radio del agujero, para cada uno de los coeficientes de rozamiento que se estudiarán.

La elección de un coeficiente de rozamiento constante es compleja, ya que durante un ensayo de fretting el valor del mismo puede variar, para el caso del acero y de forma aproximada, desde 0.2 a 0.8. Aumentando este valor con los primeros ciclos de carga [9]. Para comprobar la

influencia de este parámetro se estudiarán los casos para dos valores del coeficiente de rozamiento. Uno de los valores es de 0.2, que es el valor típico del rozamiento en el caso de un único ciclo de carga entre dos superficies de acero. Posteriormente, con el aumento del número de ciclos, el coeficiente de rozamiento tiende a estabilizarse entre los valores de 0.55 y 0.8. Por ello el segundo valor utilizado será una media de ambos, 0.68, para poder reproducir aproximadamente el comportamiento real del acero en una situación de fretting.

Tabla 2. Variación parámetros simulaciones

l/a	0.15	0.3	0.6	0.8	1.2
r/a	0.15	0.3	0.6	0.8	

A modo ilustrativo en la figura 5, se muestran los resultados obtenidos para varias simulaciones del valor de SWT promedio en función del ángulo θ . Como se observa, los valores máximos de cada curva siempre están cercanos a cero grados.

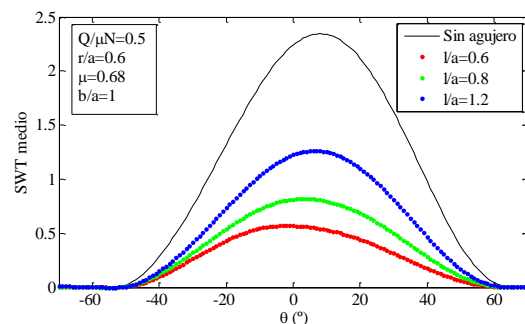


Figura 5. Parámetro SWT promedio en función del plano.

5. RESULTADOS

En este apartado se muestran y comentan los resultados de las simulaciones. Estos se encuentran divididos en dos secciones claramente diferenciadas por el coeficiente de rozamiento tomado en las mismas. La primera de ellas corresponde a los casos en los que se ha tomado un valor del coeficiente de 0.68. La segunda corresponde a los casos en que μ es 0.2. Por último una vez optimizados ambos casos se variará el parámetro, b , en un tercer apartado.

5.1. Resultados caso 1.

El primer caso a estudiar es aquel en el que μ es 0.68, valor que se aproxima a la realidad cuando las superficies en contacto son de acero y se alcanza un número de ciclos superior a 1000 [9].

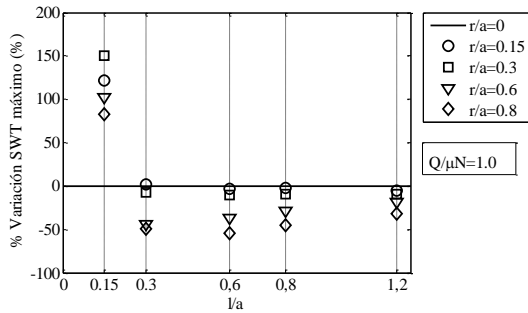


Figura 6. Resultados $\mu=0.68$ y $Q/\mu N=1.0$.

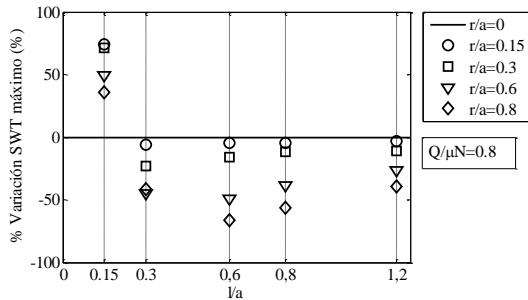


Figura 7. Resultados $\mu=0.68$ y $Q/\mu N=0.8$.

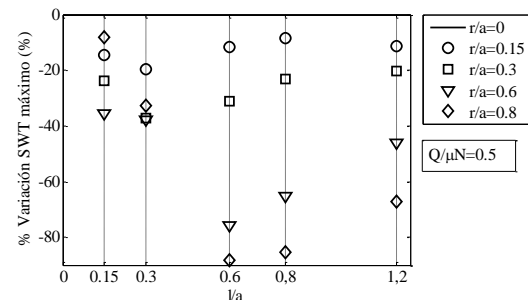


Figura 8. Resultados $\mu=0.68$ y $Q/\mu N=0.5$.

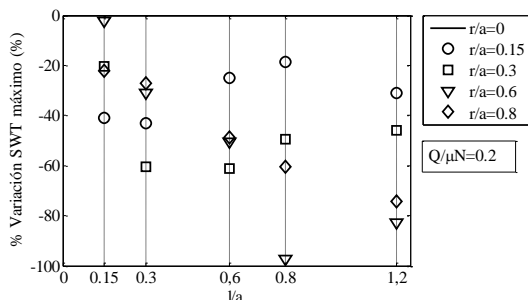


Figura 9. Resultados $\mu=0.68$ y $Q/\mu N=0.2$.

En las figuras 6 a 9 se muestran cuatro gráficas en las que se puede observar la variación del valor SWT máximo respecto del caso sin agujero. Esta variación se calcula como se muestra en la ecuación (4).

$$\Delta \overline{SWT}_{\max} = \frac{(\overline{SWT})_{\max}^{\text{con a.}} - (\overline{SWT})_{\max}^{\text{sin a.}}}{(\overline{SWT})_{\max}^{\text{sin a.}}} 100 \quad (4)$$

Cada gráfica representa un tamaño de la zona de adhesión, c/a , distinta: 0, 0.45, 0.71 y 0.89,

respectivamente. En cada una de estas figuras se muestran 20 casos, correspondientes cada uno a una de las combinaciones de l/a y r/a consideradas. Cada uno de los puntos es el valor promedio más alto del SWT que se ha encontrado para cada una de las configuraciones, sirva como ejemplo la figura 5. Por tanto cada uno de esos valores corresponde al plano material más propenso para iniciar una grieta.

En general se observa que al introducir un agujero, en muchos casos, disminuyen los valores del parámetro SWT, es decir, se podría aumentar la vida a fatiga con el método propuesto.

Observando los mejores valores para cada caso, es posible ver cómo de forma generalizada se cumple que r/a tiene que ser mayor o igual que 0.6 al igual que l/a , para obtener mejoras por encima del 20%. De esta forma es posible descartar los dos radios y ligamentos más pequeños puesto que en todos los casos las mejoras son las menos notorias llegando incluso a ser perjudiciales en casos concretos. Si se comprueba la relación l/r en los casos restantes, se observa que los valores de este nuevo parámetro se encuentran en el intervalo 0.75-2. Con el cumplimiento de estas tres condiciones se asegura una disminución del valor máximo de SWT, lo que podría garantizar un aumento de vida.

La disminución del parámetro multiaxial, como es posible apreciar, no es la misma para todos los casos. Para el caso de $Q/\mu N$ igual a 0.2, es más interesante acercarse a la parte alta del intervalo, es decir valores de l/r mayores a 1.3, con ello se asegura una disminución del parámetro de aproximadamente el 80%. En cambio para valores de $Q/\mu N$ mayores, como son 0.5, 0.8 y 1, tiene mejor resultado acercarse a la parte inferior del intervalo con valores de l/r menores de 1.3, de forma que se garantiza una disminución mínima del parámetro de entre el 70% y el 30%. Correspondiendo la disminución menor a un estado cercano al deslizamiento total y la mayor a un valor $Q/\mu N$ de 0.5.

5.2. Resultados caso 2.

En esta sección se varía un único parámetro respecto a la sección anterior, el coeficiente de rozamiento que pasa a ser ahora de 0.2. Este valor de μ no representa la realidad del fretting en el caso del acero, sin embargo los primeros ciclos responden a este patrón.

El comportamiento no se parece mucho al caso con $\mu=0.68$, por lo que es posible decir que la variación del coeficiente de rozamiento influye notablemente en el comportamiento del sistema. No hay un patrón claro entre ambos casos.

Igual que ocurría anteriormente, los valores más interesantes se concentran en ligamentos mayores de 0.6 veces el semiancho de la zona de contacto, a . A esto se puede añadir que el valor máximo siempre es para un

valor de r/a mayor de 0.15. Además para valores de $Q/\mu N$ mayores o iguales a 0.5, existe un factor común: la disminución más alta en los tres casos cumple una relación en la que el ligamento y el diámetro del agujero son iguales. No ocurre lo mismo para el caso en el que la zona de deslizamiento es la mayor, en ella la relación l/r del mejor valor pasa a ser de 4. Todos ellos garantizan mejoras en torno al 80%.

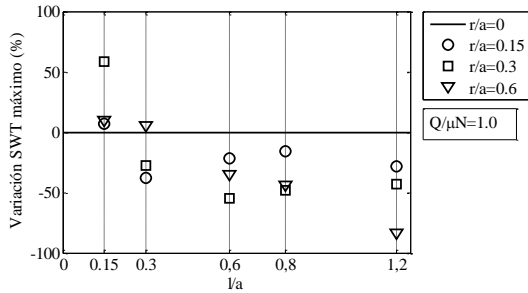


Figura 10. Resultados $\mu=0.2$ y $Q/\mu N=1.0$.

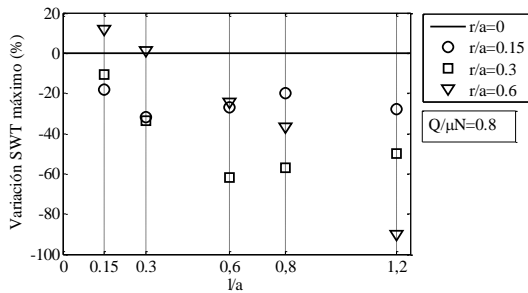


Figura 11. Resultados $\mu=0.2$ y $Q/\mu N=0.8$.

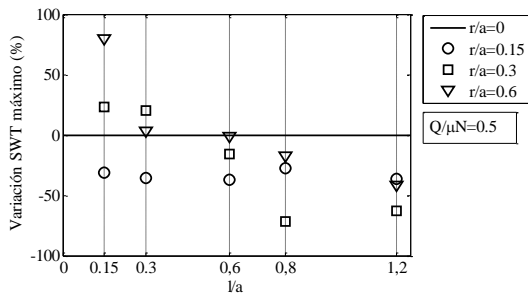


Figura 12. Resultados $\mu=0.2$ y $Q/\mu N=0.5$.

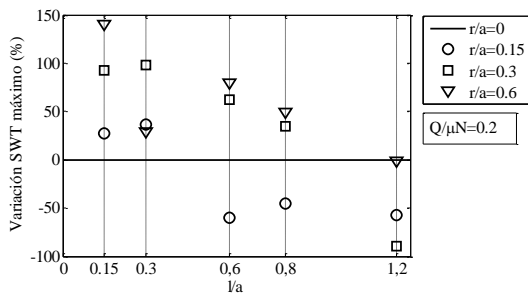


Figura 13. Resultados $\mu=0.2$ y $Q/\mu N=0.2$.

5.2. Posición horizontal óptima.

Una vez ajustados los parámetros l y r , es posible, estudiar la influencia del parámetro b , que no es más que la posición del agujero con respecto al borde de la zona de contacto.

Para ello se han representado las configuraciones que producen las mayores disminuciones del parámetro SWT para cada uno de los valores $Q/\mu N$. Para dichas configuraciones se ha colocado el agujero en dos posiciones nuevas además de la posición inicial $b=a$: $b=0.8a$ y $b=1.2a$.

Analizando en primera instancia la figura 14 se observa que no hay un patrón claro en la influencia de la posición horizontal. De forma general se podría decir que la posición b/a igual a la unidad es una buena opción para cualquiera de los casos ya que siempre está cerca de la mejor opción si no es ella misma la mejor.

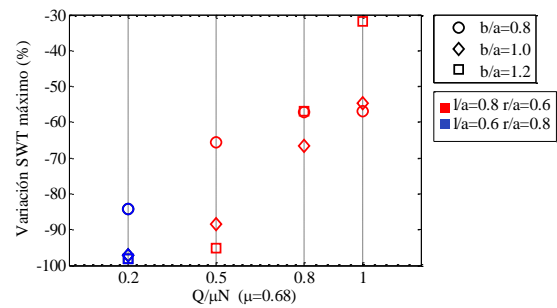


Figura 14. Resultados $\mu=0.68$.

De forma similar en el segundo caso, mostrado en la figura 15, tampoco hay un claro patrón. Sin embargo, la posición b/a igual a 1.2 es la que de forma general da mejores resultados, estando siempre a la cabeza de las disminuciones, seguida muy de cerca por la posición $b=a$.

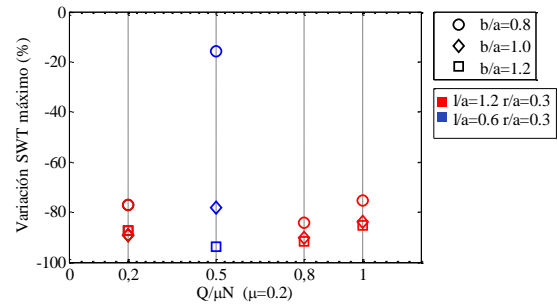


Figura 15. Resultados $\mu=0.2$.

La figura 14 muestra que el caso en el que más disminuye el parámetro, considerando $Q/\mu N=0.5$, es en la posición b/a igual a 1.2. La causa de este resultado viene representada en la figura 16. En las imágenes se observan los distintos valores del parámetro de SWT para cada punto. Se aprecia fácilmente que desplazando el agujero a la derecha 1.2 veces a , los valores del parámetro disminuyen al igual que el tamaño del lóbulo, lo que se traduce en valores medios más bajos. Es notable también

que el lóbulo se desplaza hacia la derecha para las posiciones b/a de 1 y 0.8 y por el contrario en la posición restante tiende a dirigirse hacia la izquierda, es decir, hacia el interior de la zona de contacto.

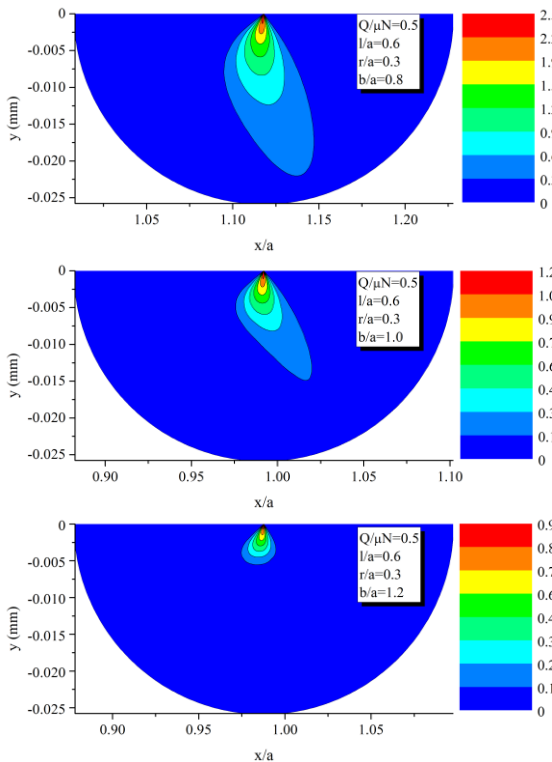


Figura 16. Contornos parámetro SWT en cada punto impuesta la dirección del plano material θ .

Finalmente a modo de resumen, se muestran los resultados óptimos obtenidos en las tablas 4 y 5. Una tabla para cada valor del coeficiente de rozamiento. En ellas se observa qué parámetros elegir para conseguir una disminución importante en el valor de SWT máximo. Para el valor μ de 0.68, no existe un patrón a seguir por ello se establecen distintos rangos de valores. En el caso de $\mu=0.2$, sí existe un patrón más o menos repetitivo por ello se muestran valores más concretos.

Tabla 3. Resultados óptimos $\mu=0.68$

$Q/\mu N$	0.2	0.5	0.8	1
l/a	≥ 0.6			
r/a	≥ 0.6			
b/a	[1-1.2]	[1-1.2]	1	[1-1.2]
l/r	[1.3-2]	[0.75-1.3]		
$-\Delta SWT$ (%)	[97-75]	[95-88]	[66-39]	[57-29]

Tabla 4. Resultados óptimos $\mu=0.2$

$Q/\mu N$	0.2	0.5	0.8	1
l/a	0.15	0.6	1.2	1.2
r/a	0.6	0.3	0.6	0.6
b/a	1.2			
l/r	4	2		
$-\Delta SWT$ (%)	90	94	92	85

6. CONCLUSIONES.

Se ha estudiado la influencia de la introducción de un agujero en una situación de fretting. Con esta idea se pretendía encontrar configuraciones que favorezcan la disminución de un parámetro de fatiga multiaxial, en este caso el parámetro SWT, de forma que se consiga retrasar por tanto la iniciación de grietas en las zonas más desfavorables del contacto. En este primer acercamiento se han variado diferentes parámetros geométricos, el coeficiente de rozamiento y el tamaño de la zona de deslizamiento, obteniendo resultados ciertamente satisfactorios. Si bien es cierto que en el proceso influyen más fenómenos o parámetros que no se han tenido en cuenta. Uno de ellos puede ser la calidad superficial del agujero debido al tipo de fabricación aditiva que se propone. En la fabricación aditiva una vez obtenido el componente, se somete el mismo a un proceso de altas presiones y temperaturas con el fin de cerrar los posibles huecos que hayan podido quedar en el componente, este proceso podría variar también la forma y el tamaño del agujero, influyendo por tanto en el comportamiento inicialmente previsto.

Al margen de los factores anteriores, en este trabajo se pretende arrojar luz ante un posible paliativo en fretting. A priori con los resultados obtenidos se puede decir que se produce una importante mejora, independientemente del coeficiente de rozamiento. Las posiciones óptimas sí que dependen directamente del coeficiente de rozamiento, pero en cualquier caso, es posible disminuir en mayor o menor medida el parámetro de daño.

En las tablas 3 y 4 se muestra el resumen de los casos óptimos en función de los parámetros estudiados. Las disminuciones mostradas son las máximas para cada caso, rondando en la mayoría de los casos valores por encima del 50%. Sería interesante para trabajos futuros ampliar el número de simulaciones para poder obtener criterios más cerrados y fundamentar aún más la mejora que produce el tipo de paliativo que se ha propuesto.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación del proyecto de investigación DPI2014-59160-P.

REFERENCIAS

[1] J. Vázquez, C. Navarro, J. Dominguez, Experimental results in fretting fatigue with shot and laser peened Al 7075-T651 specimens, *International Journal of Fatigue* 40, 143-153, (2012).

- [2] J. Domínguez, Algunas Consideraciones Sobre la Fatiga Por Fretting y Sus Paliativos. *En: Anales de Mecánica de la Fractura*, 17, 89-102, 2000.
- [3] Aref Yadollahi, Nima Shamsaei, Scott M. Thompson, Alaa Elwany, Linkan Bian, Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel, *International Journal of Fatigue* 94, 218–235, 2017.
- [4] G. R. Miller, L.M.Keer, Interaction between a rigid indenter and a near-surface void or inclusion, *J. Appl. Mech* 50(3), 615-620 ,Sept. 1983.
- [5] D. Nowell, D.A. Hills, Mechanics of fretting fatigue test, *Int. J. Mech. Sci*, 29(5), 355-365, 1987.
- [6] L.J. Fellows, D. Nowell, D.A. Hills, Contact stresses in a moderately thin strip (with particular reference to fretting experiments), *Wear* 185, 235-238, 1995.
- [7] Smith RN, Watson P, Topper A. A stress strain function for the fatigue of metals, *Journal of Materials*, 5 (4), 767–78, 1970.
- [8] C. Navarro, J. Vázquez, J. Dominguez, Nucleation and early crack path in fretting fatigue, *International Journal of fatigue*, 2017.
- [9] J. Juolsukangas, A Lehtovaara, A Comparison of relative displacement field between numerical predictions and experimental results in fretting contact, *Journal of engineering tribology*, 230(10), 1273-1287, 2016.