

APLICACIÓN DE UN MODELO MICROMECAÍNICO DE CRECIMIENTO DE GRIETA DE DOS UMBRALES A FATIGA POR FRETTING

F. Aguirre¹, C. Vallellano, J. Domínguez

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Sevilla, España.
Tel.: +34 954 487311, e-mail: faguirre.ing@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo muestra una estimación de la velocidad de crecimiento de grieta por fatiga debido a cargas producidas por fretting. Esto se realiza utilizando el modelo de crecimiento de grieta de dos umbrales, el cual predice el crecimiento de grieta en función del apilamiento y movimiento de dislocaciones, generando dos zonas plásticas: "zona plástica monotónica" asociada a la tensión máxima y "zona plástica cíclica" asociada a la variación de las tensiones. Los bloqueos de estas zonas plásticas en los bordes de grano u otras barreras y posterior salto de la barrera, determinan la naturaleza oscilante de la velocidad de crecimiento de grieta conforme se superan las sucesivas barreras. Finalmente, a partir de los estados de tensiones producidos por fretting se aplica el modelo a un caso de contacto esfera plano en aluminio Al 7075-T6 como material para las probetas.

ABSTRACT

The present work shows an estimate of the fatigue crack growth rate under fretting conditions. This is done by using a two thresholds crack growth model, which predicts the crack growth depending on the stacking and movement of dislocations, generating two plastic zones: "monotonic plastic zone", associated with the maximum stress; and "cyclic plastic zone", associated with the stress range. The locking of these plastic zones in the grain boundaries or other barriers and subsequent release of the barrier, determines the oscillating nature of crack growth rate under as successive barriers are overcome. Finally, from the stress state produced by fretting, the model is applied to a case of contact between spherical pad and a flat specimen both of 7075-T6 aluminum alloy.

PALABRAS CLAVE: Fretting-fatiga, Grietas pequeñas, Vida a fatiga.

1. INTRODUCCIÓN

Desde que se propusieron los primeros modelos basados en los dos umbrales para el análisis a fatiga [1], cada vez están siendo más empleados. En estos modelos se considera la necesidad de un valor mínimo carga máxima y de rango de carga para que, actuando conjuntamente, hagan crecer una grieta en el material. Casi la totalidad de los modelos existentes se restringen al rango de grieta grande [2-4].

Uno de los primeros modelos dentro del rango de grieta pequeña es el propuesto por Vallellano et al. [5]. Aquí, el concepto de los dos umbrales de crecimiento se ha implementado aprovechando la descripción micromecánica del crecimiento de grietas pequeñas planteada por Navarro y de los Rios (NR) [7-9]. Dicho modelo permite la simulación del crecimiento de una grieta desde longitudes pequeñas hasta la rotura final,

basándose en el sucesivo bloqueo de las zonas plásticas de la grieta en los bordes de grano por apilamiento de dislocaciones.

En efecto, mientras que en modelo original NR se considera exclusivamente el bloqueo de la zona plástica monotónica (ZPM). La extensión propuesta por Vallellano et al [5,6] contempla la posibilidad de cambios de sentido en el movimiento de las dislocaciones, y por tanto permite describir también la evolución de la zona plástica cíclica (ZPC). Los sucesivos bloqueos de dichas zonas plásticas, la ZPM, generada por la carga máxima, y la ZPC, definida por el rango de tensiones, con los bordes de grano del material en el avance de la grieta permiten definir dos umbrales para el crecimiento. Uno asociado con la capacidad de la ZPM para superar las barreras microestructurales del material y, por tanto, controlado por el nivel de carga máxima aplicada. Y otro basado en la capacidad de la

ZPC para superar dichas barreras también, el cual está gobernado por el rango de la carga aplicada. Así mismo, el modelo permite, a partir de la posición y tamaño de las zonas plásticas en cada instante, estimar la apertura de grieta y con ella determinar la velocidad de crecimiento de la misma [6], a partir de una ley de crecimiento. Este modelo se ha contrastado con resultados experimentales de grietas pequeñas por fatiga en probetas lisas de Al 2024-T3, obteniendo una predicciones muy razonables. El presente trabajo propone la aplicación del modelo anterior a situaciones más complejas como es la estimación de la vida a fatiga bajo condiciones de fatiga por fretting.

La fatiga por fretting es un fenómeno que se produce frecuentemente en elementos en contacto bajo presión sometidos a cargas cíclicas. El proceso se inicia mediante la generación de una grieta en las proximidades de los límites de la zona de contacto entre los elementos. En esa zona es donde se observan fuertes gradientes de tensión y los mayores niveles de tensiones debidas al fretting, ya que la zona de contacto actúa como un concentrador de tensiones [10]. Posteriormente, la grieta sigue creciendo por acción de las tensiones cíclicas de contacto, así como por las tensiones globales aplicadas a los elementos en contacto.

El análisis de la fatiga por fretting presenta dificultades adicionales respecto a las concentraciones de tensión geométricas. Por un lado, la dificultad que entraña la estimación de las tensiones producidas bajo el contacto, ya que, como es conocido, el problema de contacto es fuertemente no lineal y las tensiones dependen grandemente del coeficiente de rozamiento, de difícil definición de forma precisa. Por otro lado, la concentración de tensiones generada tiene importantes diferencias respecto a las típicas producidas por una entalla. Así, generalmente, el gradiente de tensiones existente es más acusado, el estado de tensiones es fuertemente multiaxial y la variación de las tensiones es no proporcional. No obstante, en el borde de la zona de contacto, generalmente se inician las grietas, la multiaxialidad y no proporcionalidad de las tensiones se relaja apreciablemente. Otra diferencia notable respecto a la fatiga en entallas es que, a diferencia de en éstas, a medida que la grieta avanza desde el contacto hacia el interior las condiciones de carga varían notablemente, existiendo una fuerte variación del coeficiente de asimetría de la carga, R , con la profundidad.

A tenor de lo anterior, modelar el crecimiento de una grieta por fretting fatiga desde sus inicios hasta la rotura del componente, requiere disponer de un modelo capaz de describir el crecimiento de grietas por fatiga desde el régimen de grietas pequeñas hasta el de grieta grande. Además, deberá de caracterizar adecuadamente el efecto de la tensión media en el crecimiento de dicha grieta, a fin modelar la influencia de la variación de R , con la profundidad. El modelo de Vallesllano *et al.* permite describir ambos fenómenos. El presente trabajo pretende analizar sus posibilidades para abordar el análisis de situaciones de fretting fatiga.

El artículo está organizado como sigue. Primero se presenta el modelo propuesto por Vallesllano *et al.*, analizando su descripción del efecto de la tensión media (diagrama de Haigh). A continuación se analizan las evoluciones de las tensiones en las proximidades de una contacto esférico sometido a fatiga y los resultados experimentales obtenidos en trabajos previos. Finalmente, se presenta la aplicación del modelo micromecánico de dos umbrales al crecimiento de una grieta desde dimensiones microestructurales hasta el fallo en condiciones de fretting.

2. MODELO DE CRECIMIENTO DE GRIETA

Durante el proceso de apertura de una grieta en modo II y en modo III, las dislocaciones que se encuentran frente de ésta se moverán en la misma dirección y sentido del crecimiento de grieta hasta encontrar algún obstáculo, definiendo así la zona plástica monotónica (ZPM), la cual depende de la tensión máxima aplicada σ_{max} . Los obstáculos al movimiento de las dislocaciones se denominan barreras y en el modelo vienen dadas por el borde de grano del material. En la medida en que la grieta siga creciendo, más dislocaciones alcanzarán el borde de grano aumentando la presión sobre éste. Cuando la grieta llega a una cierta longitud crítica, las tensiones provocadas por el apilamiento de dislocaciones pueden hacer que la barrera colapse, generando súbitamente un desplazamiento de las dislocaciones en el grano siguiente hasta alcanzar la próxima barrera o borde de grano, de esta manera es por la cual la ZPM salta de barrera en barrera [2,3,4].

En el intervalo en el cual se cierra la grieta, alguna de las dislocaciones contenidas dentro de la ZPM puede que retrocedan. El retroceso de las dislocaciones genera lo que se denomina zona plástica cíclica (ZPC), cuya dimensión depende del rango de tensiones aplicada $\Delta\sigma$. La ZPC se encuentra siempre contenida dentro de la ZPM y también sufrirá sucesivos bloqueos en los bordes de grano. Al igual que la ZPM, la ZPC podrá saltar una barrera cuando la grieta alcance cierta longitud crítica, pero con la condición que la ZPM ya haya saltado esa barrera. La diferencia principal en el crecimiento de la ZPC con relación a la ZPM es que su avance dentro del grano puede ser ciclo a ciclo [5].

Por consiguiente, para que una grieta crezca se deben dar dos condiciones de tensiones: En primer lugar una tensión máxima que tenga la capacidad de hacer que la ZPM salte las sucesivas barreras, para que de esa manera genere la condición necesaria para el salto de la ZPC. En segundo lugar, para el avance de la grieta es necesario que frente a ella exista la ZPC, la que crecerá y saltará la barrera siempre y cuando se dé un rango de tensión mínimo y se cumpla la condición anterior en la cual la ZPM ya saltó esa barrera.

Determinada la dimensión de la ZPC se puede estimar la variación de la apertura de grieta según la expresión (1) y utilizando una ley de velocidad de crecimiento,

que varía de forma potencial, expresión (2), se puede determinar la velocidad de crecimiento de grieta:

$$\Delta\phi^j = \frac{4}{\pi^2 E'} \frac{\Delta K^2}{\Delta\sigma} \left\{ \left(\frac{\Delta\sigma_2^j}{\Delta\sigma} \right) \ln\left(\frac{1}{n_d} \right) + \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{1-(n_d)^2}}{n_d} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\Delta\sigma_2^j}{\Delta\sigma} \right) \cos^{-1} n_d \right] \right\} \quad (1)$$

En donde $n_d = a/jD/2$, siendo “ $j=1,3,5\dots$ ” que representa al grano de material en el cual se encuentra la ZPC y “ $\Delta\sigma_2^j$ ” es el rango de la tensión de fricción en la zona plástica cíclica.

$$\frac{da}{dN} = B_\sigma (\Delta\phi)^m \quad (2)$$

Donde: B_σ y m son parámetros a determinar experimentalmente [5,12].

En la figura 1 se puede observar, para un caso de $R=-1$, cómo se producen saltos en la velocidad de crecimiento de grieta conforme ésta avanza. En ella se aprecia claramente una disminución de la velocidad del frente de grieta cuando ésta se aproxima a los bordes de grano, en donde las diferentes zonas plásticas tienen que vencer a dicha barrera. Una vez superado el bloqueo, el incremento en la velocidad de crecimiento de grieta es alto debido a que las dislocaciones tienen todo un nuevo grano para desplazarse. Pero a medida que la grieta incrementa su longitud, el ciclo se repite produciendo nuevos bloqueos de las dislocaciones en las sucesivas barreras. Esto sucede hasta alcanzar el colapso de la pieza siempre y cuando se cumplan las condiciones antes mencionadas. En el caso de no existir una tensión máxima suficiente y un rango de tensión adecuado para el salto de las zonas plásticas, se obtiene una grieta no propagante.

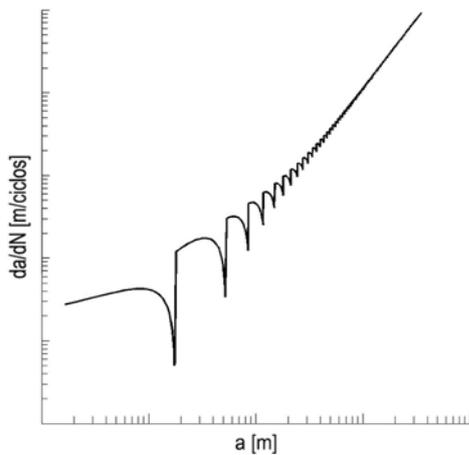


Figura 1. Representación de la velocidad de crecimiento de grieta, utilizando el modelo de crecimiento de grieta de dos umbrales para $R=-1$.

La condición necesaria para el salto de la ZPM viene definida por la tensión límite de fatiga σ_n , la cual permite a una grieta salir del primer grano de material. El rango de tensiones mínimas para el salto de la ZPC se encuentra definido por el parámetro de relación de tensiones críticas R^* , expresión (3). Por consiguiente, cumpliéndose estas tensiones mínimas una grieta puede crecer dentro de un material [1,4].

$$R^* = 1 - \frac{\Delta\sigma_{fl}}{\sigma_{fl}} \quad (3)$$

Como se puede apreciar en la figura 2, acotaremos un área en tensiones para la cual se va a implementar este modelo de dos umbrales y posteriormente generar las curvas de Haigh con dichos resultados. En donde la máxima tensión admisible es σ_Y y el límite en relación de tensiones impuesto es $R=-1$ [5].

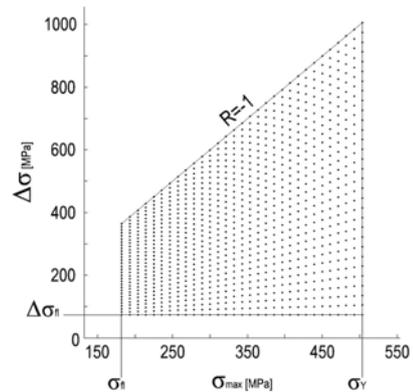


Figura 2. Distribución de tensiones en la cual se puede aplicar el modelo de dos umbrales.

Aplicando el modelo a diferentes puntos de la zona mencionada en la figura 2, se obtienen las estimaciones de ciclos para las diferentes condiciones de σ_{max} e $\Delta\sigma$. Interpolando los resultados y uniendo puntos de igual vida, se puede conseguir una estimación de las curvas para el diagrama de Haigh del aluminio Al 7075-T6 según se muestra en la figura 3, la cual se representa en función de σ_{med} y σ_{alt} .

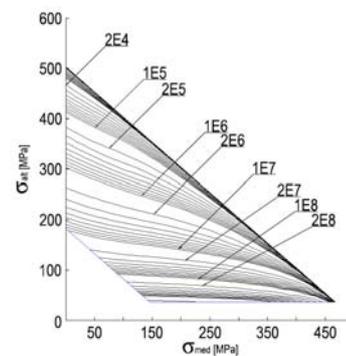


Figura 3. Estimación del diagrama de Haigh para el aluminio Al 7075-T6.

3. ESTADO DE CARGAS EN FRETTING.

La figura 4 muestra un esquema de las condiciones de carga que se generan en fatiga por fretting. Una probeta sometida a carga cíclica axial, P, al mismo tiempo que a unas fuerzas normales de contacto, N, constantes producidas por unos elementos de contacto que están fijos a un soporte de cierta flexibilidad. La deformación de la probeta ante la carga P hace que los elementos de contacto se opongan a la deformación, generando unas fuerzas tangenciales, Q. La relación entre las rigideces de la probeta y el soporte de los elementos de contacto regulará la relación entre las fuerzas Q y P aplicadas, estando Q limitada en cualquier caso por el valor límite de las fuerzas de rozamiento. En este trabajo el material utilizado en los ensayos es: aluminio Al 7075-T6, siendo $N=20(N)$ y $Q=\pm 15(N)$. En la tabla 1 se detallan los resultados de los ciclos que alcanzó cada probeta hasta el fallo según la carga "P" [12].

Tabla 1. Datos de carga y resultados de ensayos de fretting para probetas de aluminio Al 7075-T6. (F) Fallo del espécimen. (NF) No fallo del espécimen.

Test	σ_p (MPa)	Ciclos ($\times 10^3$)
T32	± 83	549 (F)
T33	± 70	516 (F)
T34	± 56	1540 (NF)
T35	± 63	2940 (NF)
T36	± 59	1777 (NF)

El contacto entre piezas genera una distribución de tensiones en la probeta semejante a un concentrador de tensiones, de la forma mostrada en la figura 4, en donde se puede ver cómo varía la tensión $\sigma(\eta)$ conforme se incrementa η .

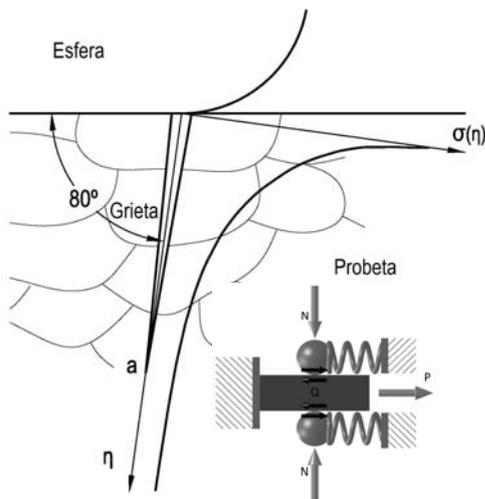


Figura 4. Esquema de tensiones en la zona de contacto para modelos de fretting

La figura 5 representa los valores de tensiones máximas $\sigma(\eta)$ y rango $\Delta\sigma(\eta)$ obtenidas numéricamente para cada ensayo, en donde en línea de trazos se esquematizan los ensayos en los cuales las probetas no fallaron o que

generaron grietas no propagantes, y en línea continua las probetas para las cuales se produjo el fallo de la pieza. Comparando estos grupos de curvas podemos observar que la tensión máxima se estabiliza para una longitud de grieta menor en relación al rango de tensiones. La evolución en la relación de dichas tensiones se puede apreciar en la figura 6, [12].

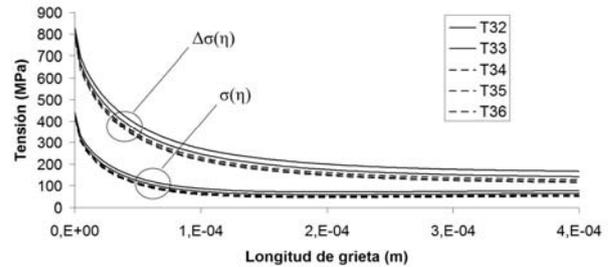


Figura 5. Tensiones máximas $\sigma(\eta)$ y rango $\Delta\sigma(\eta)$ para cada ensayo.

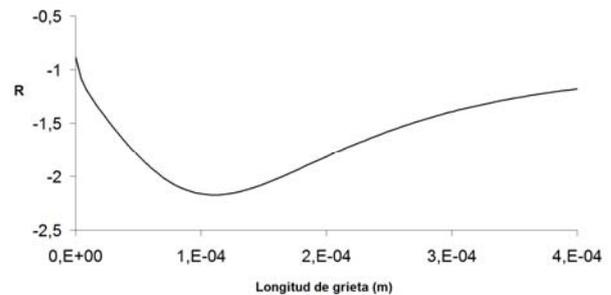


Figura 6. Relación de tensión.

Con la ayuda del diagrama de Kitagawa-Takahashi (KT), figura 7, se puede comprobar que en los ensayos T32 y T33 la tensión equivalente no toca a la línea del diagrama KT y por consiguiente producen una grieta propagante. En el caso contrario el resto de los ensayos cruza dicho diagrama representando una grieta no propagante, lo que se ve detallado en la tabla 1 en un "no fallo" del espécimen. [12].

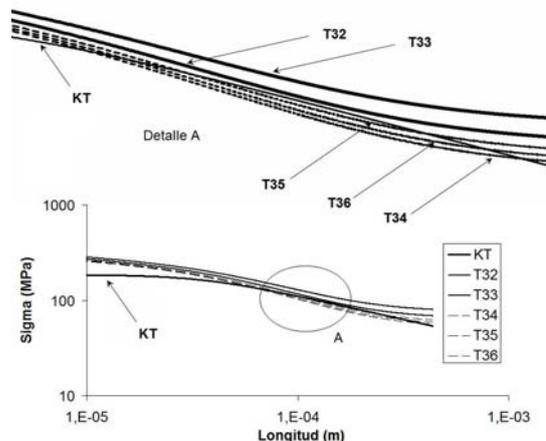


Figura 7. Diagrama de KT. En línea de trazos ensayos con grietas no propagantes. En línea continua ensayos en donde se produjo el fallo de la pieza

Para la determinación de la curva KT, se implementó la formulación propuesta por Vallellano et al [12] a través de la expresión (4).

$$\sigma_{th}(a) = \sigma_{fl} \frac{(a_0)^{1/2}}{(a^f + a_0^f - l_0^f)^{1/2f}} \quad (4)$$

Donde:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{th\infty}}{\sigma_{fl}} \right)^2 \quad (5)$$

Siendo: “ f ” un parámetro de adaptación para la curva cuyo valor recomendado es de 2.5, y con “ $l_0=D/2$ ” en donde “ D ” es el tamaño medio de grano.

Con las tensiones $\sigma(\eta)$ y rango $\Delta\sigma(\eta)$ se puede aproximar una tensión equivalente para fretting según la expresión (6), asumiendo un medio semi infinito y siendo “ a ” la longitud de grieta de análisis. [12].

$$\sigma_{eq}^{SM}(a) = Y \frac{2}{\pi} \int_0^a \frac{(1 + f(\eta/a))\sigma(\eta)}{\sqrt{a^2 - \eta^2}} d\eta \quad (6)$$

Donde:

$$f(\eta/a) = \left[1 - \left(\frac{\eta}{a} \right)^2 \right] \left[0.2945 - 0.3912 \left(\frac{\eta}{a} \right)^2 + 0.7685 \left(\frac{\eta}{a} \right)^4 - 0.9942 \left(\frac{\eta}{a} \right)^6 + 0.5094 \left(\frac{\eta}{a} \right)^8 \right] \quad (7)$$

De esta manera se pueden conseguir las tensiones máximas equivalentes en función de la longitud de grieta e introducirlas en el modelo de dos umbrales. De igual forma, se puede proceder para obtener los rangos de tensiones equivalentes que se aplican a las diferentes longitudes de grieta.

En las siguientes referencias [12,13] se pueden ver las propiedades para el aluminio Al 7075-T6.

4. SIMULACIÓN DE FATIGA POR FRETTING UTILIZANDO EL MODELO DE DOS UMBRALES

Una vez definidos todos los parámetros, establecidos los niveles de tensión máximos, y los rangos de tensión para cada longitud de grieta y establecidos los umbrales críticos en tensiones para los diferentes saltos de zonas plásticas, se puede utilizar el modelo de dos umbrales para estimar la velocidad de crecimiento de grieta para cada instante de su crecimiento.

En la figura 8 se contempla la variación de las velocidades obtenidas para la simulación del ensayo T32. Esta figura puede ser comparada con la figura 1. Ambas son simulaciones para el mismo aluminio, la

diferencia para estos casos es que en la figura 1 la carga máxima y el rango son constantes para toda la simulación o longitudes de grieta. En cambio en una grieta generada por fretting-fatiga estos valores de tensiones equivalentes no son constantes.

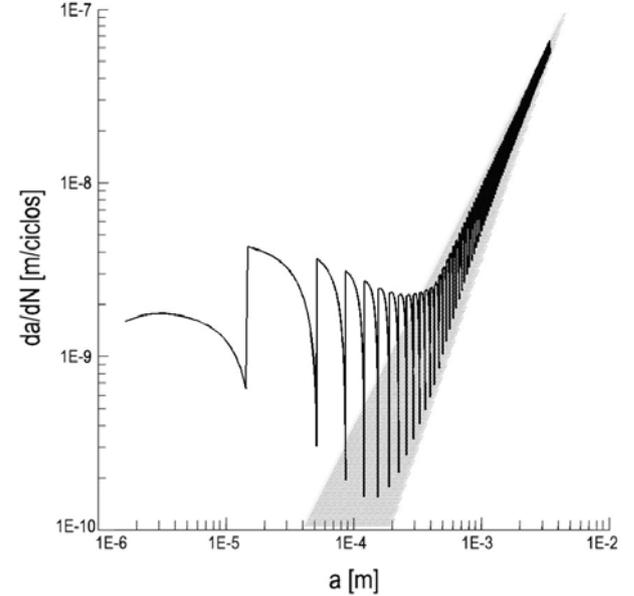


Figura 8. Velocidad de crecimiento de grieta en fretting utilizando el modelo de dos umbrales y zona sombreada representando la región por donde tendría que pasar una curva de velocidades para cargas constantes y que diera el mismo resultado final

Realizando un análisis de velocidades de crecimiento de grieta podemos observar algunos puntos:

- La velocidad mínima de la grieta después de cada bloqueo de ZPC en el borde de grano según la figura 1 tiene una tendencia claramente creciente. En cambio, en la figura 8, dicha velocidad tiene un tramo de tendencia decreciente, que pertenece al estadio en donde la tensión equivalente disminuye su magnitud. Una vez estabilizada la tensión máxima, la tendencia es semejante a la de la figura 1 y naturalmente creciente.
- Con relación a la velocidad máxima de la grieta dentro de los granos, podemos observar que la relación entre dichas velocidades en los dos primeros granos, tanto en la figura 1 como en la figura 8, tienen pendientes semejantes. Pero en el caso de la figura 1 esta pendiente mantiene la misma tendencia hasta el colapso de la probeta. En cambio, para el caso de fretting observamos que luego del primer salto la tendencia de las velocidades máximas para cada grano es decreciente. Esto sucede mientras el rango de tensión equivalente disminuye. Luego, cuando el rango tiende a un valor constante, las velocidades máximas dentro de cada grano toman una pendiente semejante a la de la figura 1. Globalmente se aprecia que los cambios de pendientes antes

mencionados se dan para diferentes longitudes de grieta y esto está directamente correlacionado a la forma cóncava-convexa de la figura 6.

- Finalmente en la figura 8, se estima con una zona sombreada la región por la cual deberían existir relaciones de velocidades y longitud de grieta para conseguir resultados semejantes a fretting, pero con fatiga simple. Como claramente se aprecia, el fenómeno de fretting produce velocidades iniciales de grieta considerablemente superiores al caso en el que no existe fretting debido al concentrador de tensiones que este fenómeno genera.

5. VERIFICACIÓN DEL MODELO

De los ensayos para los cuales se puede probar este modelo, solo dos producen el colapso de la pieza. En el resto de los casos, las grietas son no propagantes, por consiguiente se tomarán las dos primeras simulaciones para verificar dicho modelo y procedimiento. En la tabla 2 se puede verificar la cantidad de ciclos que se obtuvieron de forma experimental y con el modelo de dos umbrales.

Tabla 2. Vida de la probeta real y simulada.

Test	Ciclos Experimental	Ciclos MDU	Variación %
T32	549000	502610	8.45
T33	516000	530260	-2.76

6. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos según muestra la tabla 2, se puede establecer que la estimación de la vida a fatiga por fretting utilizando el modelo de dos umbrales es satisfactoria.

Es necesario tener en cuenta la gran cantidad de hipótesis necesarias para llegar a poder implementar dichos modelos, pero los resultados de la simulación se correlacionan con los resultados experimentales demostrando la fiabilidad de dichas hipótesis.

AGRADECIMIENTOS

F. Aguirre desea agradecer al ministerio de Educación y Ciencia su beca FPI referencia BES-2009-025065.

REFERENCIAS

[1] A.K. Vasudevan, K. Sadananda, N. Louat “Two critical stress intensities for threshold fatigue crack propagation”, Scripta Metall Mater, 28, pp. 65–70, 1993.

[2] R.O. Ritchie, B.L. Boyce, J.P. Campbell, O. Roder, A.W. Thompson, W.W. Milligan “Thresholds for high-cycle fatigue in a turbine engine Ti–6Al–4V alloy” Int J Fatigue, 21, pp. 653–662, 1999.

[3] D. Kujawski “A new $(\Delta K + K_{\max})^{0.5}$ driving force parameter for crack growth in aluminum alloys” Int J Fatigue, 23, pp. 733–740, 2001.

[4] S. Dinda, D. Kujawski “Correlation and prediction of fatigue crack growth for different R-ratios using K_{\max} and ΔK parameters” Eng Fract Mech, 71, pp. 1779–1790, 2004.

[5] C. Vallellano, J. Vázquez, A. Navarro, J. Domínguez, “Modelo micromecánico de crecimiento de grietas pequeñas por fatiga: una aproximación basada en dos condiciones umbrales”. Anales de Mecánica de la Fractura, 25, Vol. 1, pp. 349-354, 2008.

[6] C. Vallellano, A. Navarro y J. Domínguez, “Two-parameter fatigue crack growth driving force: Successive blocking of the monotonic and cyclic plastic zones at microstructural barriers”, International Journal of Fatigue, 2012.

[7] A. Navarro, E.R. de los Rios, “Short and long fatigue crack growth: a unified model Philos Mag”, 57, pp. 15–36 View Record in Scopus Full Text via CrossRef Cited By in Scopus (88), 1988

[8] A. Navarro, E.R. de los Rios, “An alternative model for the blocking of dislocations at grain boundaries Philos Mag”, 57 (1988), pp. 37–42 View Record in Scopus Full Text via CrossRef Cited By in Scopus (27)

[9] A. Navarro, E.R. de los Rios, “Fatigue crack growth modelling by successive blocking of dislocations” Proc Roy Soc Lond A, 437 (1992), pp. 375–390

[10] Sergio Muños Moreno “Tesis - Estimación de vida a fatiga por fretting. Aplicación a componentes recubiertos” Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla, 2007.

[11] Hattori, T. “Fretting fatigue problems in structural design. In: Fretting Fatigue”, ESIS 18, (Edited by R. B. Waterhouse and T. C. Lindley). Mechanical Engineering Publications, pp. 437–451, 1994

[12] C. Vallellano, J. Domínguez y A. Navarro, “On the estimation of fatigue under fretting conditions using notch methodologies”. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 26, pp. 469-478, 2003.

[13] C. Navarro, J. Vázquez, J. Domínguez, “Predicción de vida en componentes con gradiente de tensiones: entallas y fatiga por fretting”. Anales de Mecánica de la Fractura 26, Vol. 1, 2009