

DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA GRIETA EN FRETTING FATIGA CON CONTACTO ESFÉRICO

C. Navarro, S. Muñoz, J. Domínguez

Dpto. Ingeniería Mecánica y de los Materiales. Universidad de Sevilla,
Avenida de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España.

E-mail: cnp@us.es

Tfno: 954487311. Fax: 954460475

RESUMEN

El objetivo del presente artículo es analizar el comportamiento de varios procedimientos para predecir el crecimiento de una grieta en función del número de ciclos en ensayos de fretting fatiga con contacto esférico. Para ello se emplea un modelo de predicción de vida propuesto por los autores que combina las fases de iniciación y de propagación. En la fase de propagación se tienen en cuenta varias leyes de crecimiento distintas. La más sencilla es la ley de Paris. Las otras leyes propuestas permiten modelar el comportamiento de grieta pequeña ya sea modificando el umbral, o bien el valor del factor de intensidad de tensiones efectivo, en función de la longitud de grieta. Los resultados teóricos se comparan con los obtenidos en unos ensayos de fretting fatiga sobre un aluminio Al 7075 T651. Los resultados muestran que, aunque las vidas finales predichas por las distintas leyes son similares, la evolución de la grieta predicha sí varía, siendo más precisa la ley que considera la modificación del umbral de crecimiento en función de la longitud de grieta.

ABSTRACT

The objective of this paper is to analyze the behaviour of different procedures to predict the growth of a crack as a function of the number of cycles in fretting fatigue tests with spherical contact. In order to achieve this goal a life prediction model proposed by the authors is employed where the initiation and propagation phases are combined. Different crack growth laws are used in the propagation phase. The simplest one is Paris law. The others crack growth laws proposed make possible the modelling of short crack growth by modifying the threshold or the stress intensity factor as a function of crack length. The theoretical results are compared with those obtained in a series of fretting fatigue tests with Al 7075 T651. The results show that, although the predicted lives by the different laws are similar, the evolution of the predicted crack is different between them, being the law that modifies the threshold as a function of crack length the most accurate.

ÁREAS TEMÁTICAS PROPUESTAS: Fractura de Materiales Metálicos y Hormigón.

PALABRAS CLAVE: Fretting, Crecimiento de grieta, Grietas pequeñas.

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga por fretting puede aparecer cuando dos elementos entran en contacto y se produce una fricción entre ellos debido a las fuerzas variables aplicadas. Este fenómeno se puede dar prácticamente en cualquier máquina o estructura, aunque no siempre es el causante de las fracturas que se producen [1]. El efecto de este fenómeno es crear una concentración de tensiones en la zona de contacto, que provoca una iniciación temprana de las grietas.

Al igual que en fatiga simple, es importante modelar este proceso correctamente, de forma que pueda saberse si un componente fallará o no, y poder así diseñarlo de forma que no falle en el tiempo de vida previsto. Sin embargo, se puede ir un paso más allá y diseñar los componentes aproximando no sólo la vida a fatiga por fretting, sino también la evolución que tendrá el daño durante el proceso. Con ello se tendrá mejor

conocimiento del proceso y se podrán obtener estimaciones más precisas de la vida del sistema. Para ello es importante saber modelar la evolución de la grieta de forma que se conozca el tamaño de la misma en un sistema después de un cierto número de ciclos de carga.

En la evolución de la grieta se distinguen dos fases: la iniciación y la propagación. No existe un acuerdo general de dónde termina una y empieza la otra. Normalmente, cada autor emplea un modelo para calcular la vida. Éste modelo puede tener en cuenta sólo la iniciación, considerando que prácticamente toda la vida del elemento se dedica a iniciar la grieta en un punto; sólo la propagación, suponiendo que la grieta se inicia rápidamente y todo el proceso se consume en propagarla hasta el fallo; o una combinación de ambas. En este último caso, la combinación de una y otra fase para obtener la vida final se puede hacer de distintas formas.

Algunos de los modelos basados en el análisis de la iniciación están enfocados a determinar el límite de fatiga. También se han llegado a utilizar para predecir la vida, aunque cuando hay grandes gradientes de tensiones, como en el fretting, no es muy correcto [2]. En cualquier caso, con los modelos de iniciación no se puede predecir la evolución de la grieta.

Los modelos que sólo tienen en cuenta la propagación de la grieta necesitan definir una longitud inicial, pero en cuanto ésta está definida, se puede calcular tanto la vida como la evolución de la grieta [3]. Estos modelos pueden trabajar bien en algunos casos, cuando la fase de iniciación sea pequeña en comparación con la propagación. El problema reside en que no se sabe, con anterioridad a la aplicación del modelo, la importancia relativa entre una y otra fase.

En cuanto a los modelos que combinan la iniciación con la propagación, también se pueden dividir en dos categorías: los que definen a priori una longitud a partir de la cual se considera propagación y los que combinan las dos fases pero dejando como incógnita dónde se produce el tránsito entre una fase y otra. En los primeros, la longitud mencionada se suele tomar suficientemente grande como para que las fuerzas de contacto ya no influyan en el crecimiento. De esta forma la fase de propagación que se obtiene es pequeña respecto a la de iniciación, que se evalúa a partir de las tensiones en la superficie [4] o cerca de ella [5]. La consecuencia es que este modelo no sirve para predecir la evolución de la grieta. En cambio, el modelo que no fija a priori dónde termina la iniciación sí es capaz de predecir la evolución de la grieta desde su misma iniciación porque, ya sea por iniciación o por propagación, está modelando el comportamiento de la grieta en cada punto desde que se inicia hasta que se llega a la fractura final [6].

En este artículo se empleará este último modelo para predecir la evolución de la grieta en algunos ensayos de fretting fatiga con contacto esférico. Algunos de estos ensayos fueron interrumpidos con el objetivo de medir las grietas existentes después de un número prefijado de ciclos. Se proponen distintas leyes de crecimiento para modelar la propagación de grietas pequeñas haciendo posteriormente un análisis crítico de las distintas aproximaciones.

2. ENSAYOS

Los ensayos se realizaron sobre un aluminio 7075 T651 cuyas propiedades se detallan en [7]. El esquema del ensayo se muestra en la figura 1. Inicialmente, sobre los elementos de contacto, se aplica una fuerza normal y constante, N . Posteriormente se aplica la fuerza axial variable, P , sobre la probeta. La rigidez, K , del soporte de los elementos de contacto hace que aparezca como resultado una fuerza tangencial, Q , también variable. En el caso que nos ocupa, los elementos de contacto que

producen la fuerza normal fueron esferas de radio 100 mm.

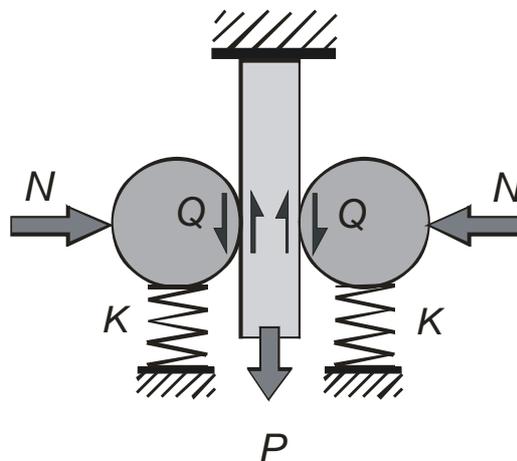


Figura 1. Esquema del montaje de un ensayo de fretting.

Para cada combinación de fuerzas aplicadas se han realizado varios ensayos: un primer ensayo donde se llegó hasta la rotura; los siguientes ensayos con las mismas cargas se interrumpieron a distintos números de ciclos antes de que llegaran a romper. Estos ensayos interrumpidos se analizan posteriormente con el objetivo de determinar el tamaño de las posibles grietas existentes en la probeta. La tabla 1 muestra los valores de las fuerzas aplicadas en cada ensayo y el número de ciclos de rotura o de interrupción en cada caso. Los valores de las fuerzas aplicadas se han elegido de forma que la rotura se produjera a un número elevado de ciclos. Con esto se pretende que las tensiones sean lo suficientemente bajas como para que la grieta pase por una fase de ralentización en su crecimiento cuando todavía es pequeña, en los primeros cientos de micras. Esta es la zona más importante de su crecimiento, ya que aquí se decide si la grieta se para o no; y la más difícil de modelar. De esta forma se pone a prueba la bondad de las leyes de crecimiento utilizadas.

Nº	σ (MPa)	Q (N)	N (N)	Nº ciclos	Fin
1	60	120	240	840000	fallo
2	60	120	240	200000	interr
3	60	120	240	100000	interr
4	60	120	240	50000	interr
5	45	210	420	1680000	fallo
6	45	210	420	500000	interr
7	45	210	420	200000	interr
8	45	210	420	50000	interr

Tabla 1. Fuerzas y número de ciclos aplicados en los ensayos.

La figura 2 muestra los perfiles de grieta obtenidos en los ensayos 2 y 3, mientras que la figura 3 muestra los obtenidos en los ensayos 6 y 7. En estas gráficas no se han representado las grietas encontradas a 50000 ciclos (ensayos 4 y 8) porque en realidad no había una grieta dominante sino multitud de ellas con longitudes en torno a las 10 ó 20 micras. Esto indica todavía una fuerte influencia de la iniciación. Aunque las figuras mencionadas no representan la evolución del perfil de grieta en un ensayo en concreto ya que cada curva corresponde a un ensayo distinto, sí se puede considerar que se aproximan a la evolución real para cada condición de carga. En estas figuras incluso se puede apreciar cómo varía la relación de aspecto a medida que crece la grieta. Inicialmente es más achatada y progresivamente, a medida que se aleja de la influencia de las tensiones de contacto, se hace más circular, aproximándose a la forma que tiene una grieta cuando sólo está sometida a una tensión axial. El achatamiento inicial es debido a que en la zona de iniciación las tensiones en la superficie varían poco, mientras que existe un gradiente de tensiones muy alto con la profundidad.

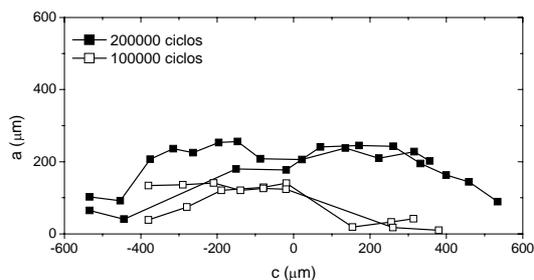


Figura 2. Perfil de grieta en los ensayos con $\sigma = 60$ MPa, $Q = 120$ N y $N = 240$ N.

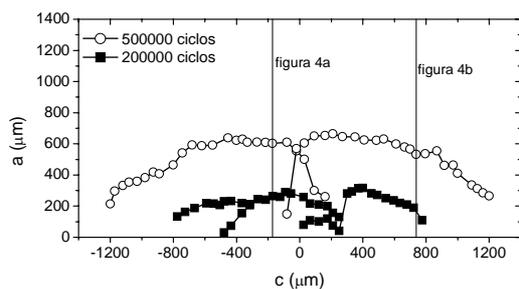


Figura 3. Perfil de grieta en los ensayos con $\sigma = 45$ MPa, $Q = 210$ N y $N = 420$ N.

En la figura 4 se muestran dos fotografías correspondientes a la grieta encontrada en el ensayo nº 6 en dos zonas distintas. La grieta de la figura 4a se encuentra en la zona central según se encuentra marcada en la figura 3. Es en esta zona donde los criterios de fatiga multiaxial predicen los valores más altos en sus tensiones equivalentes. Debido a ello, el daño producido en la superficie es muy alto. Las grietas se inician aproximadamente en el plano donde las tensiones

tangenciales son máximas, normalmente con un ángulo menor de 45° respecto de la superficie, para luego girar a una profundidad de unas 20 micras y crecer formando un ángulo entre 70 y 80 grados (74° en el caso de la figura 4a). En cambio, la sección de la grieta mostrada en la figura 4b se encuentra alejada de esta zona de iniciación, ver figura 3. Como se puede observar, no hay daño en la superficie y la grieta crece desde la misma limpia y perpendicularmente. Estas dos fotografías son características de estos dos tipos de comportamiento. Analizando todas las secciones de la grieta se puede observar que en la parte central de la misma la forma es similar a la de la figura 4a y en los extremos son como la mostrada en la figura 4b. Estas características permiten detectar fácilmente en este tipo de contacto, esfera-plano, dónde se produce la iniciación de las grietas.

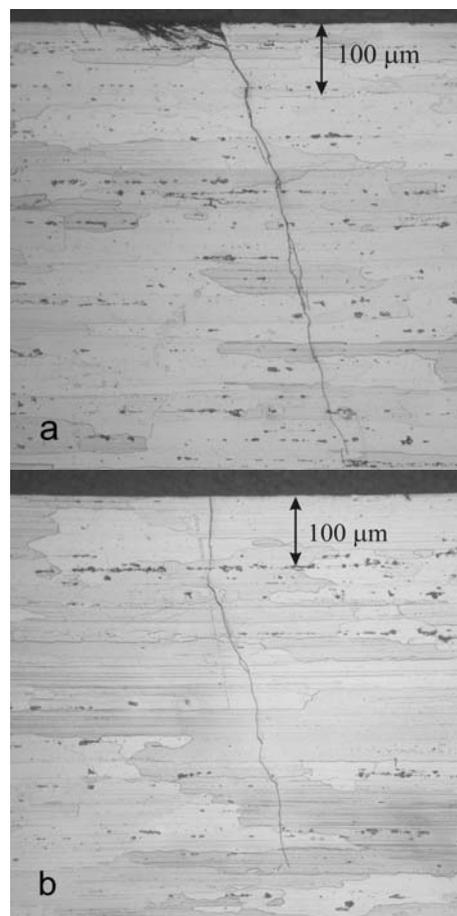


Figura 4. Grietas correspondientes al ensayo 6, interrumpido con 500000 ciclos: a) grieta de 602 μm ; b) grieta de 533 μm .

3. MODELO

El modelo utilizado para la predicción de vida fue propuesto por los autores [6] y tiene la característica de que combina las fases de iniciación y de propagación, sin que haya que definir a priori cuándo termina una y cuándo empieza la otra. Este modelo se ha empleado de

forma exitosa en la predicción de vida en ensayos de fretting con contacto esférico y cilíndrico [6,7].

En la fase de iniciación es necesario introducir un criterio de fatiga multiaxial debido al carácter de las tensiones en fretting fatiga, en este caso se empleará el de McDiarmid [8]. En cualquier caso, otro criterio no produciría grandes cambios puesto que en estos ensayos la fase de iniciación se encuentra entre 1 y 6% de la vida total, dependiendo de qué ley de propagación se utilice.

En la fase de propagación se analizarán cinco leyes de crecimiento distintas que se detallan a continuación. En primer lugar la más sencilla, la ley de Paris, que tiene el inconveniente de que no tiene en cuenta el comportamiento característico de las grietas pequeñas:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \tag{1}$$

Precisamente para tener en cuenta el crecimiento de las grietas pequeñas se utilizan las siguientes variantes, ya empleadas en otros trabajos [7,9]. En la primera se añade el umbral de crecimiento de grietas pero modificándolo en función de la longitud de grieta. En realidad se utilizarán dos modalidades, dependiendo de la forma en que se modifique el umbral:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\Delta K^n - \left(\Delta K_{th\infty} \cdot \sqrt{\frac{a}{a+a_0}} \right)^n \right) \tag{2}$$

$$\frac{da}{dN} = C \left(\Delta K^n - \left(\Delta K_{th\infty} \cdot \left(\frac{a^f}{a^f + a_0^f - l_0^f} \right)^{1/2f} \right)^n \right) \tag{3}$$

A la primera se le denominará UH y a la segunda UV. Los factores que multiplican al umbral de crecimiento de grieta larga provienen de la aproximación teórica al diagrama de Kitagawa-Takahashi, en el que se representa la tensión umbral en función de la longitud de grieta. La primera aproximación a este diagrama, incluida en la ecuación (2), se debe a El Haddad [10], la segunda, incluida en la ecuación (3), se debe a Vallellano [11].

En la segunda variante también se añade el umbral de crecimiento, aunque en esta ocasión se modifica el factor de intensidad de tensiones. También se consideran dos aproximaciones:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\left(\Delta K \cdot \sqrt{\frac{a+a_0}{a}} \right)^n - \Delta K_{th\infty}^n \right) \tag{4}$$

$$\frac{da}{dN} = C \left(\left(\Delta K \cdot \left(\frac{a^f + a_0^f - l_0^f}{a^f} \right)^{1/2f} \right)^n - \Delta K_{th\infty}^n \right) \tag{5}$$

A la primera se hará referencia denominándola KH y a la segunda KV. En estas ecuaciones $\Delta K_{th\infty}$ es el umbral de crecimiento de grieta larga, f es un parámetro que de forma general se toma igual a 2.5, l_0 es la distancia típica hasta la primera barrera microestructural y a_0 es la llamada constante de El Haddad que viene definida por la expresión

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th\infty}}{\Delta \sigma_{FL}} \right)^2 \tag{6}$$

donde $\Delta \sigma_{FL}$ es el límite de fatiga.

Con las cinco aproximaciones propuestas, ecuaciones (1) a (5), no sólo se puede calcular la vida final sino que también se puede calcular la evolución de la grieta. Este cálculo constituye una prueba mucho más estricta para los modelos de crecimiento porque requiere que la evolución de la grieta sea la correcta no sólo en su valor final (vida estimada) sino a todo lo largo de su recorrido. De esta forma es más fácil dilucidar cuál de las leyes de crecimiento planteadas, ecuaciones (1) a (5), se ajusta más a la realidad.

4. RESULTADOS

Aplicando el modelo explicado en el punto anterior a los ensayos realizados, se obtienen las curvas mostradas en las figuras 5 y 6. Estas curvas muestran la longitud estimada de la grieta en función del número de ciclos de carga aplicado. Se muestran mediante líneas los resultados de aplicar las cinco leyes de crecimiento propuestas y además, mediante puntos, las longitudes de las grietas medidas en los ensayos interrumpidos. Conviene destacar que la longitud de grieta mostrada en estas gráficas es la del fondo de la grieta, es decir, el valor más alto. Por cada ensayo interrumpido se representan las dos longitudes de grieta experimentales, correspondientes a los dos lados de la probeta donde se produce el contacto (figura 1). En la figura 6, en el ensayo de 500000 ciclos sólo se representa una porque en el otro lado la carga tangencial realmente aplicada difería excesivamente de los 210 N nominales.

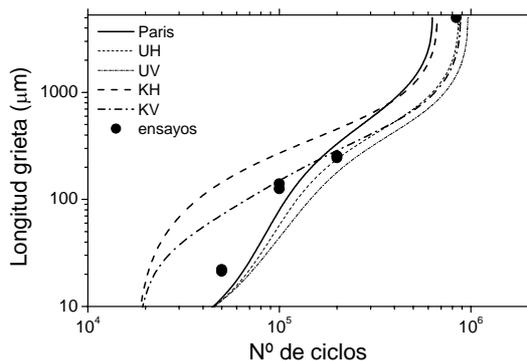


Figura 5. Evolución de la grieta con $\sigma = 60$ MPa, $Q = 120$ N y $N = 240$ N.

En la evolución de la grieta en los dos casos analizados se observa una diferencia relacionada con las cargas aplicadas. En el primer caso, figura 5, la iniciación es más lenta aunque luego crece más rápidamente e incluso el fallo se produce antes que en el segundo caso, figura 6. La razón es que en el primero las fuerzas de contacto son mucho menores que en el segundo, mientras que la tensión axial es más alta en el primero que en el segundo. También se observa cómo, a pesar de que las grietas se inician rápidamente, más de la mitad de la vida se emplea en generar una grieta de 1 mm.

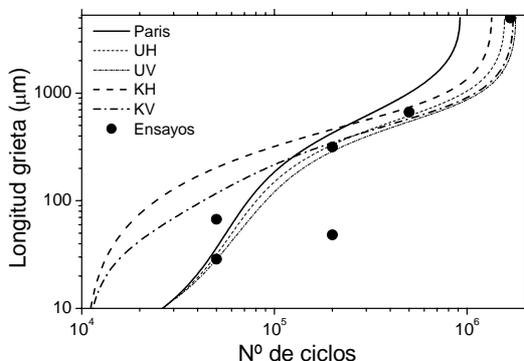


Figura 6. Evolución de la grieta con $\sigma = 45$ MPa, $Q = 210$ N y $N = 420$ N.

Tal como se había comprobado en trabajos anteriores [6,7,9], las leyes propuestas estiman razonablemente la vida experimental. Los resultados presentados en este artículo van más allá y muestran que la predicción de la evolución de la longitud de la grieta se acerca bastante a la realidad. Algunas leyes de crecimiento predicen vidas totales muy similares aunque con una evolución de la grieta distinta. Precisamente éste era uno de los objetivos de este trabajo, tratar de discernir cuáles son las leyes de crecimiento que se ajustan más a la realidad a través de su evolución con el número de ciclos de carga aplicada. Según las figuras 5 y 6, las leyes de crecimiento que modifican el factor de intensidad de

tensiones (KH y KV) predicen un crecimiento muy rápido en el inicio de la grieta que no se corresponde con la realidad. Esta velocidad inicial estimada tan rápida es debida a que el factor por el que se multiplica el FIT en estas leyes tiende a infinito cuando la longitud de la grieta y el FIT tienden a cero. La velocidad de crecimiento estimada se muestra en las figuras 7 y 8. De los resultados obtenidos se puede afirmar que, aunque al modificar el umbral se obtienen mejores resultados, la velocidad de crecimiento parece ser algo más elevada que las predichas por UH y UV cuando la grieta es pequeña.

Por otro lado, no hay gran diferencia entre la modificación propuesta a partir de la constante de El Haddad, ecuaciones (2) y (4), y la propuesta por Vallellano, ecuaciones (3) y (5). En este sentido no se puede llegar a un criterio claro para utilizar una u otra. La ley de Paris obtiene un buen resultado si se tiene en cuenta su simplicidad y que no tiene en cuenta el comportamiento de grietas pequeñas. No obstante, por esta misma razón, y tal como se ha resaltado en otros trabajos de los autores [7], esta ley de crecimiento dará peores resultados para altos números de ciclos.

Por último, la figura 6 muestra que las longitudes de grieta medidas en ambas caras de la probeta en algún caso son muy distintas, al contrario que en la figura 5. Esto puede deberse a que el ensayo con $\sigma = 45$ MPa y $Q = 210$ N tiene una vida muy alta y por lo tanto se encuentra muy cerca del llamado límite de fatiga por fretting. Dicho límite es simplemente un límite de fatiga que viene determinado por la geometría, coeficiente de rozamiento y las fuerzas aplicadas en fretting [7]. Al igual que en fatiga simple, pequeñas variaciones en la fuerza aplicada en las inmediaciones de dicho límite producen grandes variaciones en la vida, llegando incluso a determinar el fallo o no fallo de la pieza. La cercanía a esta zona queda reflejada en la velocidad de crecimiento. En la figura 8 aparece claramente una disminución de la velocidad de crecimiento que no es tan acusada en la figura 7. En esta situación, pequeñas variaciones en algunos parámetros, como por ejemplo la carga tangencial aplicada, Q , que no es necesariamente la misma en los dos contactos de la probeta ensayada, implican una gran variación en el crecimiento de la grieta. La microestructura también puede jugar un gran papel, introduciendo barreras al crecimiento. Las longitudes de grieta que se observan en la figura 6 a 200000 ciclos son 316 y 50 micras, esta última muy por debajo de la longitud estimada y del mismo tamaño del grano medio para este material. La figura 9 muestra una fotografía típica en este ensayo, n°7, en la zona de contacto donde la longitud máxima de la grieta tiene 50 micras. En la fotografía se observa que las grietas, que en esta sección tienen 30 micras de longitud, están confinadas en el primer grano. En este caso, la carga tangencial aplicada era en realidad de 204 N. Esto, junto con el tamaño de grano de 50 micras y la cercanía al límite de fatiga por fretting, podría explicar por qué las grietas no han sido capaces de superar las 50 micras de profundidad.

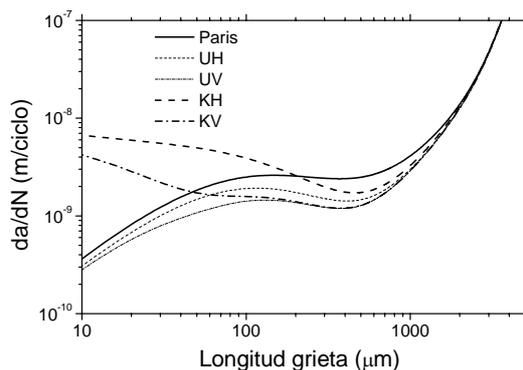


Figura 7. Velocidad de crecimiento de la grieta estimada con $\sigma = 60$ MPa, $Q = 120$ N y $N = 240$ N.

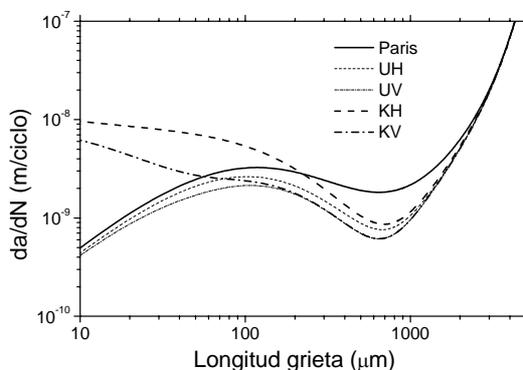


Figura 8. Velocidad de crecimiento de la grieta estimada con $\sigma = 45$ MPa, $Q = 210$ N y $N = 420$ N.

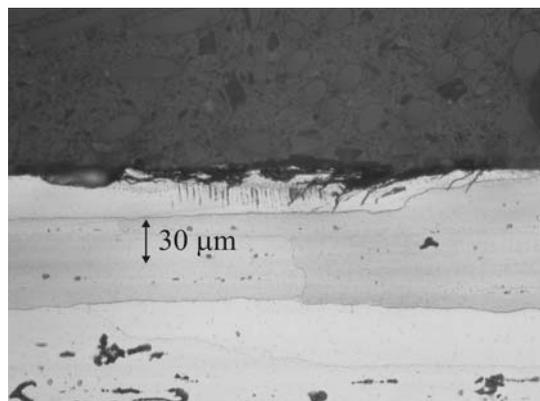


Figura 9. Grietas en el ensayo interrumpido con 200000 ciclos y $\sigma = 45$ MPa, $Q = 210$ N y $N = 420$ N.

5. CONCLUSIONES

El análisis de los ensayos realizados permite obtener una serie de conclusiones acerca de la evolución de las grietas en fatiga por fretting y la aplicabilidad del modelo utilizado para las estimaciones de vida y de evolución de la grieta. Dichas conclusiones se detallan a continuación.

El modelo empleado para la estimación de vida también permite la predicción de la longitud de la grieta en función del número de ciclos de carga aplicado, obteniéndose buenos resultados.

Las leyes de crecimiento que modifican el factor de intensidad de tensiones estiman unas velocidades de crecimiento demasiado altas cuando la grieta es pequeña. Por el contrario, las leyes que modifican el umbral de crecimiento obtienen unos resultados más cercanos a la realidad, aunque, probablemente se esté subestimando la velocidad cuando la grieta es pequeña.

Se ha comprobado tanto experimental como analíticamente que valores altos de las fuerzas de contacto provocan una iniciación más temprana de las grietas, aunque esto no quiere decir que la probeta vaya a fallar antes.

En el análisis metalográfico de las grietas se ha comprobado la forma elíptica de las mismas y la variación de la relación de aspecto en función de la longitud. Además, se ha observado la distinta morfología de la grieta en función de su localización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia por la financiación de la investigación a través del proyecto DPI2004-07782-C02-01.

REFERENCIAS

- [1] R.B. Waterhouse, T.C. Lindley. (1994) *ESIS Publication 18*. MEP, London.
- [2] W.S. Sum, E.J. Williams, S.B. Leen, "Finite element, critical-plane, fatigue life prediction of simple and complex contact configurations", *International Journal of Fatigue* 27, pp. 403-416, 2005.
- [3] T. Hattori, M. Nakamura, T. Watanabe, "Simulation of fretting-fatigue life by using stress-singularity parameters and fracture mechanics", *Tribology International* 36, pp.87-97, 2003.
- [4] M.P. Szolwinski, T.N. Farris, "Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy", *Wear* 221, pp.24-36, 1998.
- [5] J.A. Araújo, D. Nowell, "The effect of rapidly varying contact stresses fields on fretting fatigue", *Int. J. Fatigue* 24, pp.763-775, 2002.
- [6] C. Navarro, M. García, J. Domínguez, "A procedure for estimating the total life in fretting fatigue", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 26, pp.459-468, 2003.
- [7] S. Muñoz, C. Navarro, J. Domínguez, "Application of fracture mechanics to estimate fretting fatigue endurance curves", enviado a *Engineering Fracture Mechanics* en 2005.
- [8] D.L. McDiarmid, "A shear stress based critical-plane criterion of multiaxial fatigue failure for

- design and life prediction”, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 17, pp.1475-1484, 1994.
- [9] C. Navarro, S. Muñoz, J. Domínguez, “Propagation in fretting fatigue from a surface defect”, *Tribology International*, aceptado 2006.
- [10] M.H. El Haddad, T.H. Topper, K.N. Smith, “Prediction of non propagating cracks”, *Engng. Fract. Mech.* 11, pp.573-584, 1979.
- [11] C. Vallellano, J. Domínguez, A. Navarro, “On the estimation of fatigue failure under fretting conditions using notch methodologies”, *Fatigue Fract Engng Mater Struct.* 26, pp.469-478, 2003.