

INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE INICIACIÓN EN LAS PREDICCIONES DE VIDA A FATIGA POR FRETTING

C. Navarro, S. Muñoz, J. Domínguez

Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Escuela Superior de Ingenieros,
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n,
41092 Sevilla, España.
E-mail: cnp@us.es

RESUMEN

En fatiga se suelen distinguir dos fases en el proceso de desarrollo de una grieta: iniciación y propagación. Para la determinación de la vida a fatiga de un elemento existen numerosos modelos que combinan ambas fases, determinando la vida total como la suma de los números de ciclos ocupados en iniciación, N_i , y en propagación, N_p . Para la aplicación de estos modelos es necesario definir la longitud de la grieta en el instante en que se considera que termina la iniciación y comienza la propagación: longitud de iniciación, a_i . Generalmente esta longitud se suele definir a priori, ya sea en función del tamaño de grieta más pequeño detectable, de cómo esté definida la curva S-N, escogiendo la longitud de iniciación que mejor ajuste los resultados experimentales, etc. El objetivo de este artículo es analizar la influencia de dicha longitud de iniciación sobre la vida a fatiga estimada. Para definir el número de ciclos necesario para iniciar una grieta de longitud a_i , el modelo utilizado emplea una curva S- N_i obtenida a partir de una curva S-N a la que se le resta el número de ciclos de propagación desde la longitud de iniciación definida. Este modelo se aplica a un conjunto de resultados experimentales de fatiga por fretting obtenidos con contacto esférico.

ABSTRACT

Two different phases are usually distinguished in the crack growth process: initiation and propagation. Numerous models for the determination of fatigue life exist that combine both phases, determining total life as the sum of the number of cycles spent in initiation, N_i , and propagation, N_p . In order to apply these models it is necessary to define the crack length where it is considered that initiation finishes and propagation begins: the initiation length, a_i . This length is usually defined a priori as a function of the size of the smallest detectable crack, how the S-N curve is defined, choosing the value that better fits the experimental results, etc. The objective of this paper is to analyze the influence of such initiation length over the estimated fatigue life. The model used calculates the initiation phase from an S-N curve where the propagation cycles from the defined initiation length have been subtracted. This model is applied to a group of fretting fatigue tests with spherical contact.

PALABRAS CLAVE: Fatiga por fretting, Predicción de vida.

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.

En el proceso de fatiga se suelen distinguir dos fases: iniciación de la grieta y propagación de la misma. La importancia de una fase frente a otra depende de muchos factores. Para la predicción de la vida a fatiga, en algunas situaciones se puede despreciar una de ellas, mientras que en otras no. La principal dificultad de

combinar ambas fases es decidir dónde termina una y empieza la otra, es decir, qué longitud a_i , se considera que tiene la grieta al iniciar la fase de propagación. En los modelos que combinan ambas fases, esta separación, longitud de iniciación, a_i , se suele definir a priori en función de cuál sea el tamaño de grieta más pequeño detectable, de cómo esté definida la curva S-N, escogiendo la longitud de iniciación que mejor ajuste los resultados experimentales, etc. Además, hay diversas formas de modelar la fase de iniciación en cuanto a dónde y cómo evaluar las tensiones. El objetivo de este artículo es analizar la influencia de dicha longitud de iniciación sobre la vida a fatiga estimada. Para definir el número de ciclos, N_i , necesario para iniciar una grieta de longitud a_i , el modelo utilizado emplea una curva S- N_i obtenida a partir de una curva S-N a la que se le resta el número de ciclos de propagación desde la longitud de iniciación definida.

Este modelo se aplica a un conjunto de resultados experimentales de fatiga por fretting obtenidos con contacto esférico.

2. ENSAYOS

El esquema de los ensayos modelados se muestra en la figura 1. Inicialmente, sobre los elementos de contacto, se aplica una fuerza normal, constante, N . Posteriormente se aplica la fuerza axial variable, P , sobre la probeta, que provoca una tensión axial nominal, σ . La rigidez, K , del soporte de los elementos de contacto hace que aparezca como resultado una fuerza tangencial, Q , también variable.

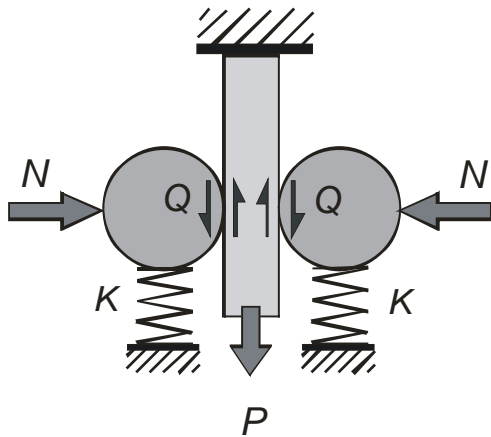


Figura 1. Esquema del montaje de un ensayo de fretting.

Los ensayos analizados fueron realizados sobre la aleación de aluminio 7075 T651 donde el contacto se producía entre una esfera de radio $R=100$ mm y una superficie plana. Los ensayos se pueden dividir en dos grupos. El primero son 19 ensayos que terminaron con la fractura de la probeta [2]. En el segundo grupo, para cada combinación de fuerzas aplicadas se realizaron 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. Las probetas resultantes de estos ensayos se analizaron posteriormente con el objetivo de determinar el tamaño de las posibles grietas existentes en la misma [3].

3. MODELO

El modelo utilizado para la predicción de vida está basado en otro propuesto por los autores [4] y tiene la característica de que combina las fases de iniciación y de propagación. Consiste en primer lugar en definir una longitud de iniciación, es decir, fijar dónde termina la iniciación y comienza la propagación y analizar cada una por separado.

Para la fase de propagación se emplea la mecánica de la fractura tomando como longitud inicial la longitud de

iniciación definida, a_i . La ley de crecimiento utilizada trata de modelar el crecimiento de grietas pequeñas dado que la longitud de iniciación definida puede ser del orden de micras. La forma de hacerlo es introduciendo un umbral de crecimiento modificado en función de la longitud de grieta [2]:

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

En la ecuación (1) $\Delta K_{th\infty}$ es el umbral de crecimiento de grieta larga, f es un parámetro que de forma general se toma igual a 2.5 [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

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

donde $\Delta \sigma_{LF}$ es el límite de fatiga. El factor que multiplica al umbral de crecimiento de grieta larga en la ecuación (1) proviene de la aproximación teórica al diagrama de Kitagawa-Takahashi, en el que se representa la tensión umbral en función de la longitud de grieta. Se han ensayado otras formas de tener en cuenta el crecimiento de grietas pequeñas [2,3], siendo la mostrada en la ecuación (1) la que mejor se ajusta a los resultados experimentales de fatiga por fretting.

El modelo presentado en este artículo analiza la fase de iniciación basándose en el trabajo de McClung et al. [6] para entallas. El primer paso consiste en la obtención de una curva de fatiga, $S - N|_{a_i}$, en probetas lisas y sin fretting que proporcione el número de ciclos necesario para generar una grieta de longitud a_i . Para cada nivel de tensiones, S_j , el número de ciclos de esta curva, N_{S_j, a_i} , se obtiene a partir de la ecuación:

$$N_{S_j, a_i} = N_{jS_j} - N_p(a_i) = N_{jS_j} - \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C \Delta K^n} \quad (3)$$

Donde N_{jS_j} es el número de ciclos hasta el fallo obtenido en un ensayo de fatiga simple con tensión S_j , a_i es la longitud de iniciación y a_f es la longitud a la que se produce la fractura.

Estas curvas, a las que se hará referencia como curvas de iniciación, se presentan en la figura 2 para cuatro casos distintos: fractura total, generación de una grieta de 100, 50 y 10 micras. Evidentemente, cuando disminuye el nivel de tensiones aumenta la fracción de vida dedicada a la iniciación.

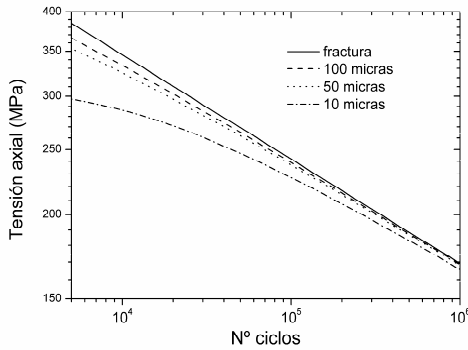


Figura 2. Curvas S-N de iniciación para la generación de distintas longitudes de grieta.

En el caso de que se estuviera aplicando el modelo a un ensayo de fatiga simple, una vez definida la longitud de iniciación, a_i , se calcularía el número de ciclos de iniciación introduciendo la tensión aplicada en la curva $S - N|_{a_i}$ anteriormente obtenida. Sumando la propagación calculada mediante la mecánica de la fractura se obtendría de nuevo el número de ciclos total. Esto es algo obvio en el caso de fatiga simple. En el caso de la fatiga por fretting se puede aplicar el mismo proceso aunque con algunas modificaciones y advertencias. En la fatiga por fretting existe un alto gradiente de tensiones cerca de la superficie, es decir, la tensión disminuye rápidamente con la profundidad, desde un máximo en la superficie. En función de dónde se evalúen las tensiones dentro de la zona de interés, es decir, la zona entre la superficie y una profundidad igual a la longitud de iniciación escogida, la vida de iniciación será una u otra. Las distintas alternativas que se proponen son:

- i) Evaluar las tensiones en la superficie. Con este nivel de tensiones, que es el máximo en dicha zona, la curva $S - N|_{a_i}$ proporcionará un número de ciclos de iniciación menor que el real puesto que la curva $S - N|_{a_i}$ está basada en una situación sin gradiente. Esto quiere decir que se obtendría una cota inferior del número de ciclos para la iniciación de una grieta de tamaño a_i en fatiga por fretting.
- ii) Evaluar las tensiones a una profundidad igual a la longitud de iniciación escogida, a_i . En este caso la curva $S - N|_{a_i}$ proporcionará un número de ciclos de iniciación mayor que el real. Es decir, se obtendría una cota superior del número de ciclos para la iniciación de una grieta de tamaño a_i en fatiga por fretting. Esta variante es la que utiliza McClung en su trabajo.
- iii) Evaluar las tensiones en un punto intermedio entre la superficie y la profundidad a_i o calcular la tensión media entre la superficie y dicha profundidad. Con esta opción se obtiene un número de ciclos de iniciación comprendido entre los valores obtenidos en los puntos i) y ii). En este caso se obtendrá un número de ciclos para la iniciación de una grieta de

tamaño a_i en fatiga por fretting más cercano al real y, en cualquier caso, siempre se puede acotar el orden de magnitud del error mediante i) y ii).

Independientemente de dónde se evalúen las tensiones, 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 [7].

Con este modelo de predicción de vida se puede plantear la pregunta de qué valor de longitud de iniciación es más correcto escoger y cómo influye la elección de dicha longitud en la estimación de la vida a fatiga y de la evolución de la grieta.

4. RESULTADOS

4.1. Predicción de la evolución de la grieta

Las figuras 3, 4 y 5 muestran la evolución predicha de la grieta con el modelo iii, utilizando la tensión media entre la superficie y a_i para calcular la iniciación, en los ensayos que fueron interrumpidos a distintos números de ciclos [3]. Los círculos blancos en dichas figuras representan los valores de las longitudes de grieta medidos experimentalmente en los distintos ensayos. En conjunto fueron tres grupos de ensayos, cada uno con un conjunto de fuerzas determinado. Estas estimaciones fueron realizadas utilizando distintas longitudes de iniciación, variando entre 5 y 200 micras.

En estas figuras se puede observar que la predicción de la evolución de la grieta es prácticamente idéntica para longitudes de iniciación menores de 100 micras. Además, el crecimiento de grieta estimado es muy similar al que se produce en la realidad. Por otro lado, utilizando una longitud de iniciación de 100 micras la vida estimada es similar aunque ya la evolución de la grieta no es la misma. Todo esto implica que, al menos en los casos analizados: i) el modelo utilizado predice correctamente tanto la vida como la evolución de la grieta; ii) el modelo es robusto frente a la elección de la longitud de iniciación dentro de un cierto rango y iii) el número de ciclos de iniciación hasta una determinada longitud de la grieta se puede estimar razonablemente bien a partir de la curva S-N modificada. Esta última conclusión es importante porque la iniciación es más difícil de modelar y se plantea la cuestión de hasta dónde se puede considerar iniciación y dónde empieza la propagación. De esta forma se pueden modelar las dos fases de forma solapada y resulta menos determinante el fijar el límite entre una y otra.

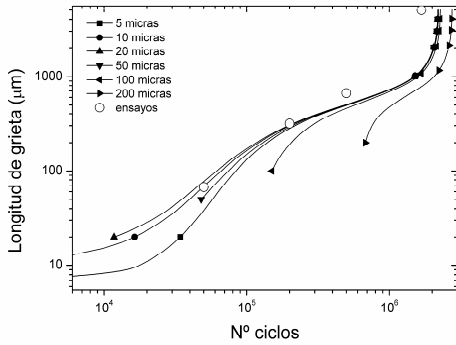


Figura 3. Evolución de la grieta en los ensayos con $\sigma = 45 \text{ MPa}$, $Q = 210 \text{ N}$ y $N = 420 \text{ N}$.

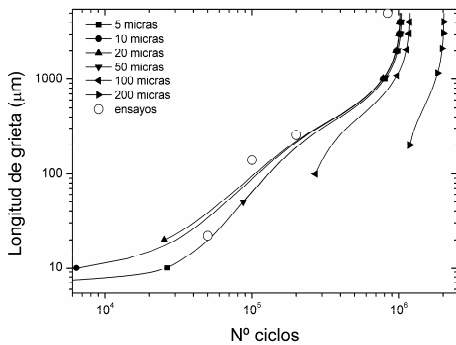


Figura 4. Evolución de la grieta en los ensayos con $\sigma = 60 \text{ MPa}$, $Q = 120 \text{ N}$ y $N = 240 \text{ N}$.

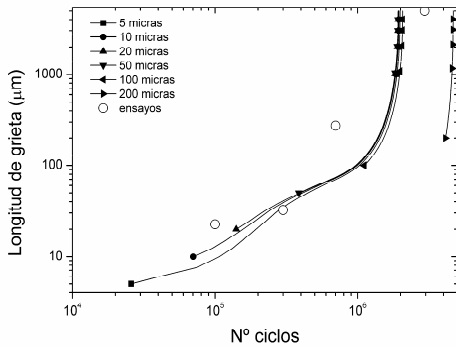


Figura 5. Evolución de la grieta en los ensayos con $\sigma = 82 \text{ MPa}$, $Q = 30 \text{ N}$ y $N = 60 \text{ N}$.

El número de ciclos de iniciación estimado para distintas longitudes de grieta con el modelo presentado se puede considerar como la evolución de la grieta predicha por la fase de iniciación, figuras 3 a 5. Esta evolución estimada se aproxima a los experimentos sólo hasta una profundidad de 100 micras. La explicación puede residir en la evolución de las tensiones cerca de la superficie. La figura 6 muestra la tensión máxima en la dirección de la aplicación de la carga P en función de la profundidad. Esta figura muestra el elevado gradiente de tensiones que existe y cómo para una profundidad de 100 micras las tensiones han llegado casi hasta su valor nominal. Por otro lado, un análisis más detallado de la figura muestra cómo en el ensayo con $Q = 30 \text{ N}$ las tensiones debidas al contacto son menores y el gradiente

es menor. Precisamente para este ensayo, la figura 5 muestra cómo la estimación de la evolución de la grieta depende menos de la longitud de iniciación elegida. A esto se añade que cuanto más alto es el gradiente de tensiones mayor puede ser el error cometido en la estimación de la vida de iniciación, tal como se comentó en el apartado 3. A falta de realizar análisis de este tipo en ensayos con otras características, se puede decir que la profundidad hasta la que se obtienen resultados aceptables en la estimación de la longitud de grieta a través de la fase de iniciación está relacionada con el mayor o menor gradiente y con la profundidad hasta donde alcanza la influencia de las tensiones del contacto.

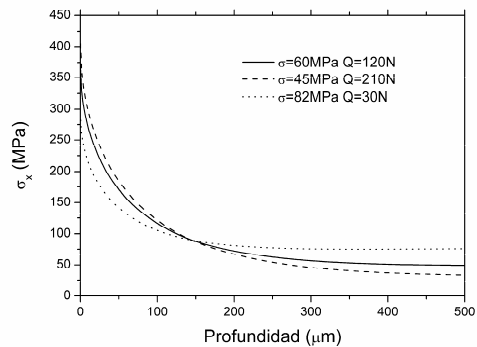


Figura 6. Tensión σ_x máxima en función de la profundidad.

4.2 Predicción de vida

Aplicando el modelo de predicción de vida al conjunto de 19 ensayos realizados con Al 7075 T651 y radio de la esfera 100 mm [2] se obtiene un resultado como el mostrado en la figura 7, donde se representan las vidas estimadas frente a las reales, tomando como longitudes de iniciación 5 y 140 micras. Al igual que en el apartado anterior, para estimar la vida de iniciación se utiliza la tensión media entre la superficie y a_i .

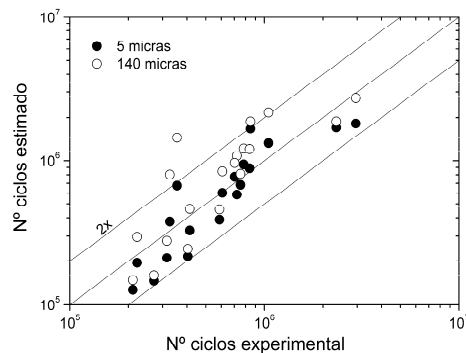


Figura 7. Vidas estimadas frente a experimentales con una longitud de iniciación de 5 y 140 micras.

Las vidas estimadas con una longitud de iniciación de 140 micras son más altas que con 5 micras. Para poder comparar mejor y de forma objetiva los resultados se van a definir dos parámetros estadísticos. Para cada

ensayo se calcula el cociente entre la vida estimada y la real:

$$c_i = \frac{N_{i\ est}}{N_{i\ exp}} \quad (4)$$

Idealmente, el valor de c_i debería ser la unidad pero el modelo nunca es perfecto y además siempre hay una dispersión de resultados en los ensayos de fatiga. En fatiga es usual representar los resultados en una escala logarítmica y usar una distribución logarítmico-normal para ajustar las vidas para un determinado nivel de tensiones. Por esta razón la media y desviación típica se calculan sobre los logaritmos de c_i . Finalmente, los parámetros que describen los resultados, y que serán los mostrados en adelante, son los antilogaritmos:

$$\hat{c} = 10^{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log c_i} \quad (5)$$

$$\sigma_c = 10^{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log c_i - \log \hat{c})^2}} \quad (6)$$

Siguiendo esta metodología se ha analizado la influencia sobre la estimación de vida del valor de la longitud de iniciación escogida, figura 8. Además, en esta figura se ha incluido el resultado de estimar la vida despreciando la fase de iniciación y considerando exclusivamente la propagación desde las diferentes longitudes de iniciación definidas. En la figura 8 se puede comprobar que para longitudes de iniciación por debajo de 20 micras los resultados son prácticamente idénticos para los dos modelos de estimación de vida.

La figura 9 muestra la proporción media, entre todos los ensayos, de vida dedicada a iniciación, según el modelo iii para iniciación. Tal como se muestra en la figura, el valor medio de la fase de iniciación en los ensayos analizados para una longitud de iniciación de 20 micras está por debajo del 5%. Para longitudes mayores de 20 micras los dos modelos de predicción de vida divergen. La figura 8 muestra cómo las predicciones de vida utilizando el modelo que combina las fases de iniciación y propagación se mantienen dentro de un rango bastante razonable para longitudes de iniciación menores de 100 micras. Esto quiere decir que en los casos analizados, con este modelo, la elección del valor de la longitud de iniciación no es algo crítico en la aplicación del mismo dentro del rango de 0 a 100 micras. Por encima de este valor las predicciones se disparan. La razón se puede encontrar una vez más en la figura 6, donde se representa la evolución de las tensiones en tres casos distintos. El alto gradiente de las tensiones cerca de la superficie hace más difícil la caracterización del comportamiento de la grieta a través de una tensión media en dicha zona, como ya se comentó en el apartado 4.1, debido a que una pequeña variación de tensiones implica una gran variación en la vida a fatiga obtenida de la curva S-N. El que las vidas predichas sean excesivamente altas para longitudes de iniciación mayores de 100 micras es debido a la fase de iniciación

e inducen a pensar que se están minusvalorando las tensiones a la hora de estimar la vida de iniciación.

En cambio, si sólo se tiene en cuenta la propagación desde la longitud de iniciación elegida el error siempre aumenta cuando se incrementa el valor de la longitud de iniciación.

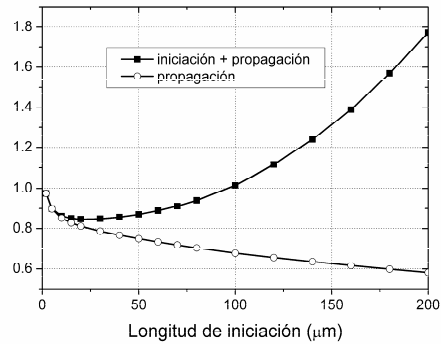


Figura 8. Parámetro de estimación de vida, \hat{c} , en función de la longitud de iniciación con dos modelos de predicción.

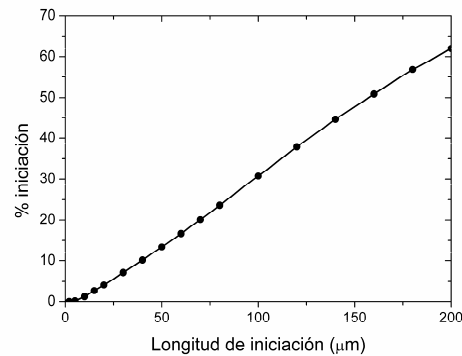


Figura 9. Proporción de vida empleada en iniciación en función de la longitud de iniciación escogida.

La dispersión de los resultados, σ_c , que idealmente debería ser igual a la unidad, no es elevada y aumenta en los dos modelos con la longitud de iniciación desde un valor de 1.45 hasta 1.8 aproximadamente, en el rango de a_i analizado.

En el apartado 3 se comentaron las diferentes formas de estimar la duración de la fase de iniciación en cuanto a dónde y cómo evaluar las tensiones. Tres alternativas eran propuestas: evaluar las tensiones en la superficie, a una profundidad igual a la longitud de iniciación, a_i , y tomar la tensión media entre la superficie y a_i . Las dos primeras pueden servir como cotas inferior y superior de las estimaciones de vida, figura 10, siempre que se tomen como correctas las vidas de propagación estimadas con las leyes de crecimiento utilizadas. Esto quiere decir que estas cotas afectan a la idoneidad del proceso de estimación de la vida de iniciación. La figura 10 muestra cómo evaluando las tensiones en la superficie se obtienen unos resultados muy parecidos a los obtenidos considerando exclusivamente la

propagación, mostrados en la figura 8. Esto es debido a que las tensiones en la superficie son muy altas y por lo tanto el número de ciclos de iniciación muy pequeño. En cambio, la cota superior, que consistiría en evaluar las tensiones en a_i , predice unas vidas excesivamente altas para longitudes de iniciación superiores a 50 micras. Esto implica que su efectividad como cota superior queda muy limitada debido probablemente al alto gradiente de tensiones cerca de la superficie. Los buenos resultados obtenidos por McClung et al. [6] en entallas evaluando las tensiones en a_i , a pesar de haber utilizado valores de a_i del orden de 75 micras, pueden ser debidos al pequeño gradiente, comparado con el caso de fatiga por fretting, existente en los casos que analizaron.

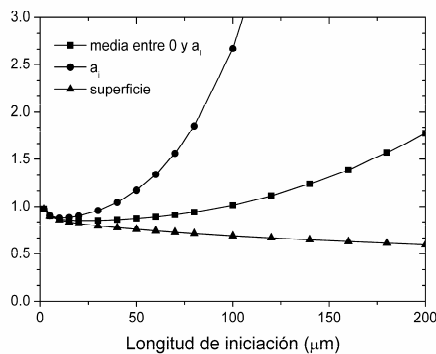


Figura 10. Parámetro \hat{c} , en función de la longitud de iniciación. Cada curva corresponde a uno de los tres modelos para iniciación: i, ii e iii, considerando en este último una tensión media entre la superficie y a_i .

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un nuevo modelo de estimación de vida en fatiga por fretting que combina la iniciación con la propagación de grietas obteniendo buenos resultados tanto en la predicción de la vida como de la evolución de la grieta en fatiga por fretting con contacto esférico. En la fase de iniciación se han empleado unas curvas de fatiga modificadas que determinan el número de ciclos para iniciar una grieta de un tamaño determinado. Las principales conclusiones se detallan a continuación.

La longitud de iniciación escogida influye poco en los resultados si es menor que la profundidad a la que llega la influencia de las tensiones del contacto. Además, la longitud elegida influye más sobre la evolución inicial de la grieta predicha que sobre la vida final.

Es posible modelar el comportamiento de la grieta cuando es pequeña a través de las curvas de iniciación, es decir, las curvas de fatiga simple que proporcionan el número de ciclos para iniciar una grieta de un tamaño determinado.

Para longitudes de iniciación muy pequeñas, del orden de 2 micras, se obtienen muy buenos resultados incluso con el modelo que considera exclusivamente la

propagación. Sin embargo, la aplicabilidad de las leyes de crecimiento para grietas tan pequeñas es dudosa. Por ello es importante un modelo como el propuesto que mantiene una buena calidad de los resultados para longitudes de iniciación mayores, en este caso hasta 100 micras.

En cualquier caso, debe hacerse el análisis de un número mayor de casos, incluyendo otras geometrías con distintos gradientes de tensiones como el contacto cilíndrico, que permitan extender las conclusiones aquí obtenidas.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] R.B. Waterhouse, T.C. Lindley. *ESIS Publication* 18. MEP, London, 1994.
- [2] S. Muñoz, C. Navarro, J. Domínguez, "Application of fracture mechanics to estimate fretting fatigue endurance curves", *Engineering Fracture Mechanics* 74, pp.2168-2186, 2007.
- [3] C. Navarro, S. Muñoz, J. Domínguez. "Crack evolution in fretting fatigue with spherical contact", enviado a *Engineering Fracture Mechanics* en 2007.
- [4] C. Navarro, M. García, J. Domínguez, "A procedure for estimating the total life in fretting fatigue", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 26, pp.459-468, 2003.
- [5] C. Vallengano, 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.
- [6] R.C. McClung, W.L. Francis, S.J. Hudak Jr. "A new approach to fatigue life prediction based on nucleation and growth", *9th International Fatigue Congress*, Atlanta, mayo 2006.
- [7] 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.