

## ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN GRIETA-CONTACTO EN ENSAYOS DE FRETTING FATIGA

M. Tur, E. Giner, A. Roda, J. Fuenmayor

Departament d'Enginyeria Mecànica i de Materials,  
Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, 46022 València

**Resumen.** La estimación de vida a fatiga en problemas de fretting se suele descomponer entre la fase de iniciación y la de propagación. En la fase de propagación es imprescindible conocer cómo varía el factor de intensidad de tensiones (FIT) de la grieta en su crecimiento. El objetivo del presente artículo es el estudio de la interacción entre la grieta y la zona de contacto durante un ensayo de fretting fatiga. Se pretende evaluar si la presencia de una grieta modifica las condiciones de contacto de forma significativa y de qué manera las tensiones de contacto afectan al FIT de la grieta. El análisis se ha llevado a cabo utilizando un modelo de elementos finitos. Los resultados muestran que se produce interacción entre la grieta y el contacto y que los modelos analíticos pueden sobrestimar el FIT.

**Abstract.** Fatigue life prediction during a fretting fatigue test is usually divided into two phases: initiation and propagation. During the propagation phase the evolution of the stress intensity factor (SIF) has to be known. The aim of this paper is to analyze the interaction produced between the crack and the contact zone during a fretting fatigue test. The changes in the contact condition produced by the crack have been studied. Also, the SIF of the crack has been computed. This is achieved by means of a finite element model. The results show that there exists important interaction between the crack and the contact and the analytical methods to calculate the SIF can overestimate the values.

### 1. INTRODUCCIÓN

En determinados componentes mecánicos como los álabes de las turbinas, uniones por interferencia, uniones remachadas, etc. es posible que se produzca un tipo de fallo mecánico debido a la nucleación y crecimiento de grietas en la zona de contacto. Este tipo de fallo se denomina fretting. Cuando las grietas crecen paralelas a la superficie o hacia fuera provocando la pérdida de esquiras en el material el fallo se denomina fretting wear y cuando crecen hacia el interior fretting fatiga.

Para el estudio del fretting fatiga se han desarrollado diferentes tipos de ensayos [1] cuyo objetivo es el desarrollo de modelos que permitan predecir la vida de componentes en condiciones de fretting. El estudio del fretting fatiga se suele realizar diferenciando dos fases: la iniciación de grietas y el crecimiento hasta provocar fallo o no propagación del daño [2-4]. Una cuestión importante en estos modelos es conocer el tamaño de grieta en la cual pasa de crecer por mecanismos de iniciación a hacerlo por mecanismos de propagación. Basándose en trabajos anteriores sobre componentes con entallas, Navarro y Domínguez [4] proponen un método de iniciación-propagación para estimar la vida de un componente en condiciones de fretting y lo han validado en ensayos realizados con elementos de contacto de geometría esférica.

En la primera fase de iniciación de grietas hay que tener en cuenta que el campo de tensiones generado es multiaxial y no proporcional [5] y se necesita conocer de forma precisa su evolución en la zona cercana al contacto. En la fase de crecimiento es necesario obtener el FIT de la grieta y su cómo varía durante el ensayo de fretting, con el fin de estimar la vida a fatiga.

El objetivo del presente artículo es el estudio de la interacción entre la grieta y la zona de contacto durante un ensayo de fretting. Se pretende evaluar si la presencia de una grieta modifica las condiciones de contacto de forma significativa y de qué manera las tensiones de contacto afectan al FIT de la grieta. El análisis se ha llevado a cabo utilizando un modelo de elementos finitos. Los valores obtenidos para el FIT se han comparado con valores basados en modelos analíticos presentes en la literatura que desprecian la interacción grieta-contacto y son habitualmente utilizados en la estimación de vida.

El artículo se estructura de la siguiente forma: en el apartado 2 se detalla el ensayo de fretting y se revisan los modelos analíticos utilizados para el cálculo de las condiciones de contacto y del FIT de la grieta. En el siguiente apartado se define el modelo de elementos finitos utilizado para el cálculo y la metodología del

cálculo del FIT. A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante elementos finitos y se comparan con los analíticos obteniendo finalmente las conclusiones.

2. MODELOS ANALÍTICOS

En la Fig. 1 se muestran de forma esquemática las cargas que se transmiten durante un ensayo de fretting fatiga en el que se utilizan elementos de contacto de geometría cilíndrica. En la Fig. 2 aparece un esquema de estas cargas en la zona cercana al contacto. En primer lugar se aplica una carga  $P$ , que genera una zona de contacto de semi-ancho,  $a$ . A continuación se somete la probeta a una tensión de tracción alternante,  $\sigma$ . Como consecuencia del rozamiento que existe en la superficie de contacto y de las rigideces de los soportes, se transmite una fuerza de rozamiento,  $Q$ , tangencial al contacto.

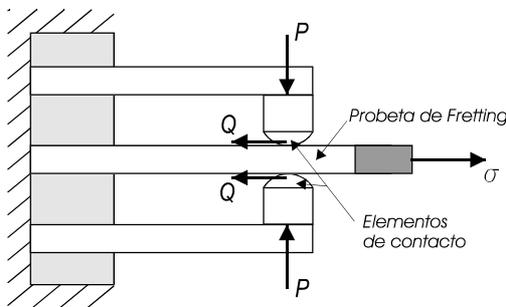


Fig. 1. Esquema del ensayo de fretting fatiga.

La consecuencia de la carga,  $Q$ , es la división del área de contacto en dos zonas, una de adhesión (sombreada en la Fig. 2) y otra de deslizamiento. El semi-ancho de la zona de adhesión es  $c$ . En estas condiciones de carga, la distribución de tensiones en la zona cercana al contacto, suponiendo que los cuerpos se comportan como semiplanos infinitos, es conocida como problema de Cattaneo-Mindlin y posee una expresión analítica [6,7]. La tensión  $\sigma$  provoca un descentramiento,  $e$ , de la zona de adhesión [8] o la aparición de deslizamiento reverso [9].

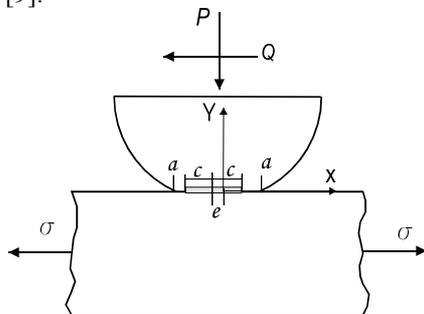


Fig. 2. Cargas y condiciones de contacto en el ensayo.

Para el cálculo del FIT en problemas de fretting fatiga en la bibliografía se han utilizado métodos analíticos. Estos se basan en la hipótesis de que la grieta no afecta a las condiciones de contacto y por lo tanto la distribución de tensiones durante un ensayo de fretting

es conocida. Además se suele suponer que la grieta se propaga perpendicular a la superficie. De esta forma en un problema 2D se puede utilizar el método propuesto por Bueckner [10] válido para grietas en un semiplano, basado en la evaluación de la siguiente integral a lo largo de la grieta de longitud,  $a_g$ :

$$K_I = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{a_g} w(t) \sigma_x(t) dt \tag{1}$$

La función  $w$  es una función de peso que depende del espesor de la probeta y  $\sigma_x$  es la tensión normal perpendicular a la grieta que se obtiene de la solución analítica del problema de contacto. Este modelo no tiene en cuenta la interacción grieta-contacto, es decir, utiliza la solución clásica para la distribución de tensiones de contacto sin considerar que la grieta puede variar dicho campo. Para el caso de una tensión  $\sigma_x$  constante esta ecuación da resultados idénticos a los de una grieta perpendicular al contorno en una probeta bajo Modo I de carga (caso SENT en mecánica de la fractura (ver por ejemplo [11])).

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para analizar mediante elementos finitos el problema planteado se ha utilizado el modelo que se muestra en la Fig. 3. La probeta se modela como un rectángulo de dimensiones  $2L \times 2d$ . La grieta se encuentra a una distancia  $x = l$  del centro de la zona de contacto y tiene una longitud  $a_g$ . El elemento de contacto cilíndrico, de radio  $R$ , es de dimensiones suficientemente grandes como para que su comportamiento pueda asimilarse al de un semiplano infinito.

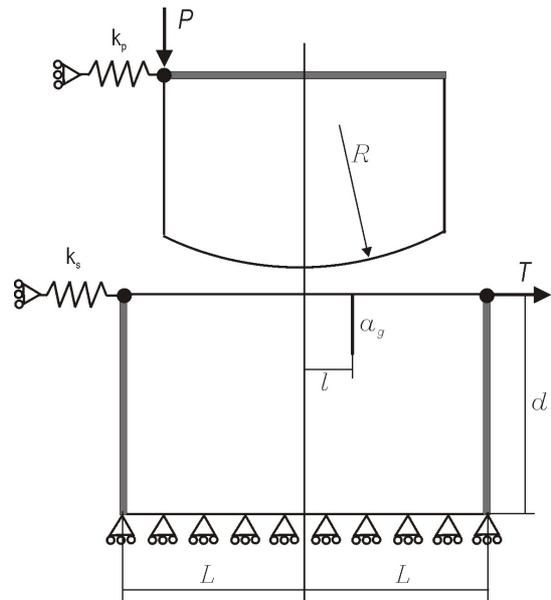


Fig. 3. Modelo geométrico de elementos finitos.

En primer lugar se aplica la carga normal,  $P$ , restringiéndose en este caso los desplazamientos en

dirección X de los nodos que pertenecen a la línea  $x = -L$  y  $x = L$ , para evitar movimientos de cuerpo rígido. A continuación se liberan estas restricciones y se aplica la carga  $T$ . Como el problema de contacto no es lineal, cada una de las cargas se aplica con incrementos suficientemente pequeños para que las distribuciones de tensiones en el contacto sean las correctas. Las zonas sombreadas en la Fig. 3 corresponden a nodos que poseen restricciones en los desplazamientos. En la línea  $x = -L$  se impone el desplazamiento en dirección X igual al del nodo de conexión con el resorte. Lo mismo ocurre con la línea  $x = L$ . En la parte superior del cilindro se restringen los desplazamientos en dirección Y del mismo modo.

Para la resolución se ha utilizado el código comercial de elementos finitos, ABAQUS [12]. Con el fin de obtener una solución suficientemente precisa con un coste computacional razonable, se ha utilizado un procedimiento  $h$ -adaptativo de refinamiento de malla por subdivisión de elementos cuadriláteros. En [13] se detalla cómo se ha programado este procedimiento de cálculo. En los análisis realizados se han utilizado mallas de elementos cuadriláteros cuadráticos de 8 nodos con integración estándar en 3x3 puntos de Gauss y un estado de deformación plana.

En cada análisis se ha refinado la malla para obtener un error global en norma energética estimado menor del 0.5 %. En la Fig. 4 se observa la secuencia de mallas obtenida para un determinado análisis.

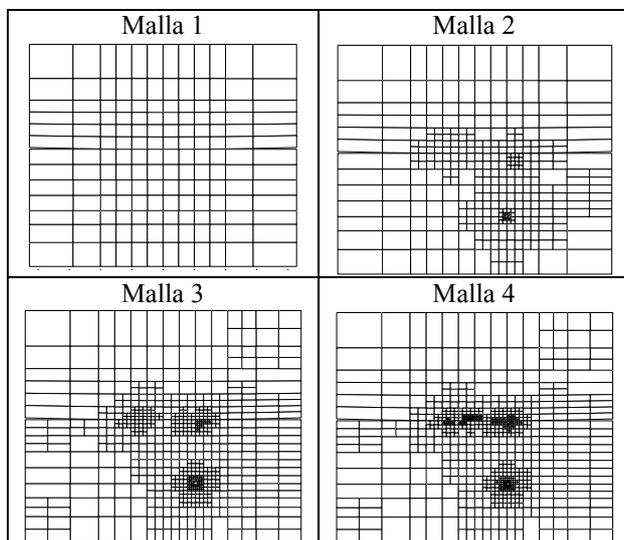


Fig. 4. Secuencia de mallas obtenida por refinamiento.

El material para el cual se ha realizado el estudio es aluminio Al 7075-T6 con un módulo de Young  $E = 71.7$  MPa y un coeficiente de Poisson  $\nu = 0.33$ . Se ha utilizado un modelo de rozamiento de Coulomb con un valor del coeficiente de rozamiento de  $\mu = 0.75$  que se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente para ensayos de fretting con elementos de contacto cilíndricos utilizando este material [3].

Las grietas reales que aparecen durante un ensayo tienen geometría similar a una semielipse y están inicialmente inclinadas respecto a la superficie de la probeta (aunque pronto crecen en dirección aproximadamente perpendicular). El modelo de elementos finitos utilizado simplifica la realidad ya que se pretende evaluar la interacción entre la grieta y el contacto y comparar el FIT obtenido con otras soluciones analíticas que realizan la misma aproximación. De este modo, se ha modelado una grieta perpendicular a la superficie. En el modelo geométrico la línea inferior de la probeta está restringida con condiciones de simetría (ver Fig. 3). El problema analizado de esta forma correspondería (sin considerar el contacto) al de dos grietas simétricas con una carga en Modo I (utilizando la nomenclatura de mecánica de la fractura, caso DENT [10]). Sin embargo el modelo analítico de la ecuación 1 supone que el comportamiento de la probeta se asemeja al caso SENT de mecánica de la fractura, si no se considera el contacto. Este hecho es importante a la hora discutir los resultados obtenidos (ver siguiente apartado).

Se han utilizado dos métodos para calcular el FIT de la grieta a partir de los resultados de elementos finitos. En primer lugar el método de extrapolación de desplazamientos que permite obtener de forma rápida los FIT en Modo I y Modo II ( $K_I$  y  $K_{II}$  respectivamente). También se ha programado el método EDI (integral de dominio equivalente a la integral de contorno J) que permite calcular la tasa de liberación de energía  $G$ . Este segundo método es más preciso que el primero y dado que en los análisis se ha comprobado que el  $K_{II}$  de las grietas es despreciable frente al  $K_I$ , la relación entre el FIT y  $G$  para deformación plana se obtiene a partir de la ecuación 2:

$$K_I = \sqrt{\frac{G E}{1 - \nu^2}} \tag{2}$$

4. RESULTADOS

El ensayo de fretting que ha servido de referencia para realizar el presente estudio se puede encontrar en [3].

	Casos E-1 y E-2	Caso E-3
$P$ (N/m)	$52 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$
$Q$ (N/m)	$23.4 \cdot 10^3$	$18 \cdot 10^3$
$\Sigma$ (MPa)	90	90
$\mu$	0.75	0.75
$R$ (mm)	25	25
$A$ (mm)	0.193	0.1695
$c/a$	0.6325	0.6325
$e/a$	0.175	0.2
$p_0$ (MPa)	157	150.2

Tabla 1. Condiciones de los ensayos de fretting.

En la Tabla 1 se muestran las condiciones del ensayo. Se han realizado tres bloques de análisis mediante

elementos finitos. El primero con un espesor de la probeta  $d=2$  mm (E-1) y los siguientes con  $d=20$  mm. En los casos E-1 y E-2 se sitúa la grieta en  $l=a$  y en el caso E-3 la grieta está en  $l=1.2a$ . Para cada caso se han estudiado 8 tamaños de grieta diferentes.

Para el cálculo del FIT se ha programado el método expuesto en el apartado 2. Para cada caso de carga y longitud de grieta, el programa de adaptación de la malla de elementos finitos realiza una serie de iteraciones hasta conseguir el error deseado. Para cada malla se ha obtenido el FIT de la grieta con el fin de observar la convergencia a un determinado valor. Como ejemplo se muestra en la Fig. 5 el cálculo realizado para la grieta 2 del caso de carga E-2. En esta gráfica aparece el FIT en función del número de grados de libertad de la malla.

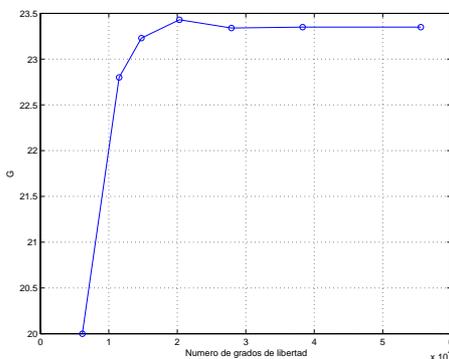


Fig. 5. Cálculo de  $K_I$  para la grieta G-2 del caso E-2.

En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos para los tres casos de carga.

$a_g$ (mm)		$K_I$ Caso E-1	$K_I$ Caso E-2	$K_I$ Caso E-3
0.025	G-1	24.7	23.1	--
0.05	G-2	39.8	35.5	--
0.075	G-3	39.5	43.2	--
0.1	G-4	38.5	43	45.5
0.2	G-5	68	62	66.0
0.3	G-6	95	91	101.4
0.4	G-7	125	121	128.5
0.5	G-8	161	151	159.6
1	G-9	--	--	309.2

Tabla 2. Resultados obtenidos del FIT en  $\text{MPa m}^{1/2}$ .

Se han analizado dos aspectos de la interacción grieta-contacto durante un ensayo de fretting. En primer lugar la influencia de la grieta sobre el contacto, es decir, si la presencia de grietas modifica la distribución de tensiones y las condiciones de adhesión y deslizamiento. En segundo lugar, si los modelos analíticos de estimación del FIT en problemas de fretting (que suponen que las condiciones de contacto no cambian por la presencia de una grieta) son adecuados, es decir si la modificación de la

distribución de tensiones en el contacto afecta de manera significativa. Esto se ha cuantificado a través del cálculo del FIT mediante elementos finitos para los problemas mencionados anteriormente.

Respecto a la influencia de la grieta en la distribución de tensiones de contacto, a partir de los análisis se puede ver que para grietas muy pequeñas (menores de 25 micras) las grietas no influyen de forma apreciable. En las Figs. 6 y 7 se muestra la presión normal en el contacto y la tensión tangencial, respectivamente. La línea continua corresponde a la solución analítica del problema sin tener en cuenta la presencia de la grieta. Los círculos corresponden a la solución de elementos finitos, en concreto los valores de la tensión promediada en nodos. Las condiciones de contacto son similares y sólo se modifican ligeramente en la zona muy cercana a la grieta.

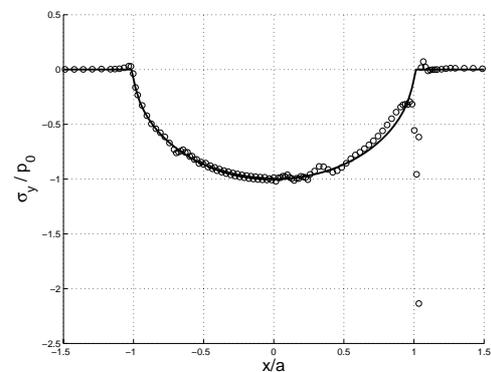


Fig. 6. Presión normal de contacto para G-1 (E-2).

Aproximadamente hasta este tamaño de grieta suele ser más importante el mecanismo de iniciación que el de propagación [4]. Los modelos de iniciación de grieta parten del conocimiento de la evolución del campo de tensiones durante un ensayo de fretting. Por lo tanto, la utilización de la solución analítica del problema de contacto parece razonable aunque existan grietas pequeñas.

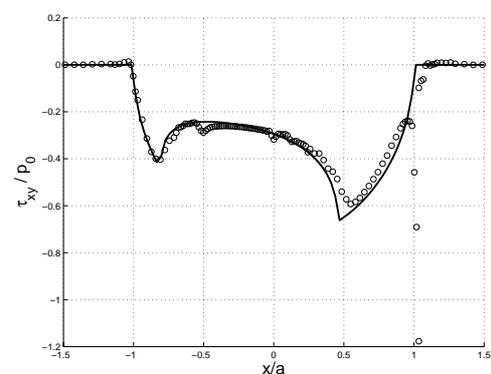


Fig. 7. Tensión tangencial de contacto para G-1 (caso E-2).

Para grietas mayores las tensiones de contacto se ven alteradas respecto de la solución cuando no hay grieta. En las figuras 8 y 9 se representa la presión de contacto y la tensión tangencial, respectivamente. De nuevo, la

línea continua corresponde a la solución analítica y los círculos corresponden a la solución de elementos finitos. El elemento de contacto se ve desplazado hacia la derecha debido a la presencia de la grieta de forma que ésta queda dentro de la zona de contacto. Esto ocurre en los casos E-1 y E-2 para grietas grandes. La tensión tangencial se ve completamente alterada por la presencia de la grieta como se observa en la figura 9. En el caso E-3 como las condiciones de carga son diferentes, la grieta permanece fuera de la zona de contacto para los tamaños de grieta analizados.

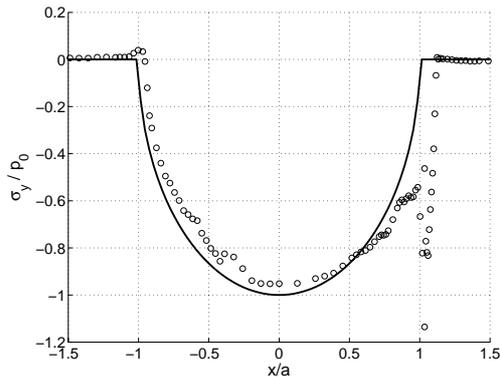


Fig. 8. Presión normal de contacto para G-5 (E-2).

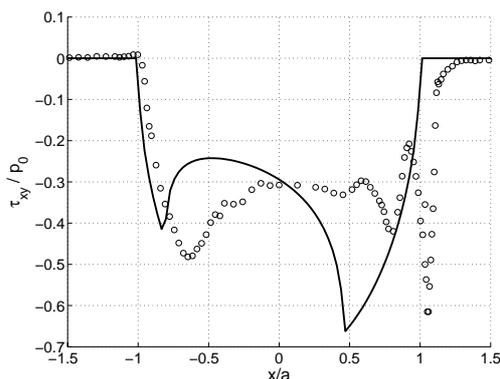


Fig. 9. Tensión tangencial de contacto para la grieta G-5 (caso E-2).

Los resultados anteriores muestran en qué medida la grieta puede modificar las tensiones que aparecen en el contacto. Este hecho puede afectar al crecimiento de grieta. Para cuantificar como afecta la nueva distribución de tensiones se ha obtenido el FIT en cada uno de los casos y se ha comparado con el valor analítico obtenido a partir de la ecuación 1, suponiendo que la grieta no afecta a la distribución de tensiones.

En todos los análisis de elementos finitos, mediante el método de extrapolación de desplazamientos se ha podido comprobar que el factor  $K_{II}$  es despreciable frente al factor  $K_I$  de forma que la expresión para el cálculo de FIT se ha obtenido de la ecuación 2.

El caso E-1 corresponde a un espesor de probeta  $d=2$  mm. Para los tamaños de grieta analizados, existen diferencias importantes entre el valor analítico del FIT obtenido suponiendo una grieta SENT o una

grieta DENT. En la Fig. 10 se muestra cómo varía el FIT con el tamaño de la grieta. La línea a trazos corresponde al valor analítico obtenido para una grieta SENT (despreciando la influencia del contacto). La línea continua corresponde al valor obtenido de la ecuación 1. La línea trazo punto es el valor para una grieta DENT. El valor de la tensión  $\sigma$  elegido en los casos SENT y DENT corresponde con el valor de la tensión de tracción a la derecha de la probeta (ver Fig. 2). Por último, los círculos corresponden a la solución de elementos finitos.

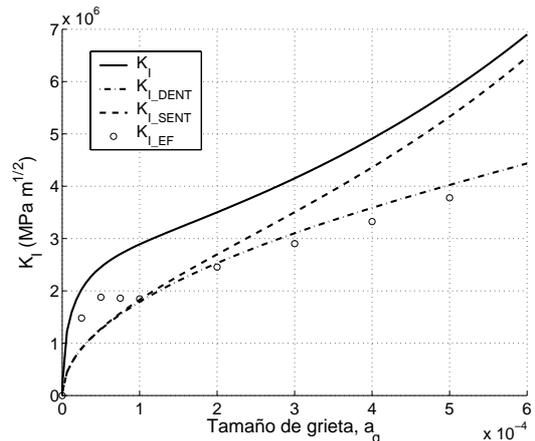


Fig. 10. FIT en función del tamaño de grieta (caso E-1).

En la Fig. 10 se muestra que el valor obtenido por elementos finitos para grietas muy pequeñas (menores de 50 micras) se acerca bastante al FIT que tiene en cuenta las tensiones de contacto (ecuación 1). Sin embargo para grietas mayores la solución de elementos finitos se aleja bastante de la analítica (la cual tiende a la solución SENT). Debido al espesor de la probeta los resultados de elementos finitos se acercan a la solución de una grieta DENT. La discrepancia mostrada en este último caso se debe a que el valor de las tensiones en el contorno izquierdo y derecho de la probeta no son iguales (debido a la carga  $Q$ ). Los resultados de elementos finitos se ajustan bien si se toma el valor medio de estas tensiones.

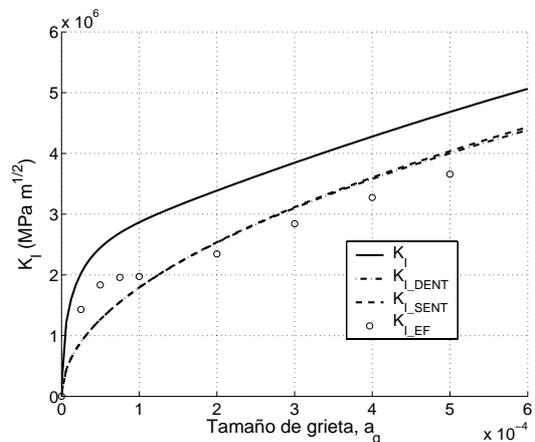


Fig. 11. FIT en función del tamaño de grieta (caso E-2).

En el caso E-2 el espesor de la probeta es mucho mayor que el tamaño de la zona de contacto para simular un semiplano infinito. En la Fig. 11 se muestra el FIT frente al tamaño de la grieta. De nuevo en trazo discontinuo aparece el caso SENT (que ahora coincide con el DENT), en trazo continuo se muestra la solución analítica que tiene en cuenta las tensiones de contacto (ecuación 1) y los círculos corresponden a la solución de elementos finitos.

Para grietas muy pequeñas la solución de elementos finitos se acerca a la ecuación 1. De nuevo para grietas mayores la solución de elementos finitos se aleja de la ecuación 1 y tiende en este caso al valor para una grieta DENT. Existe sin embargo una discrepancia para los tamaños de grietas analizados (hasta 0.5 mm de longitud). Esto puede deberse a dos factores: el primero es la presencia del elemento de contacto y la transmisión de la carga tangencial  $Q$ , la cual provoca una reducción de la tensión normal que ve la grieta. El otro es la presencia de la grieta en el interior de la zona de contacto (debido a la modificación de las condiciones de contacto) en el caso E-2 que también contribuye a reducir el FIT en el análisis de elementos finitos. Se ha comprobado que se debe principalmente al primer factor ya que en el caso E-3, donde la grieta está fuera de la zona de contacto, se obtienen las mismas discrepancias.

## 5. CONCLUSIONES

La simulación mediante elementos finitos del crecimiento de una grieta de fatiga, perpendicular a la superficie, durante un ensayo de fretting fatiga ha permitido evaluar cómo es la influencia de la grieta en las tensiones de contacto, y de éstas en el FIT de la grieta. Se ha comprobado que el  $K_{II}$  de grietas perpendiculares al contorno es despreciable frente al  $K_I$ .

Los resultados mostrados indican que las tensiones de contacto se ven modificadas por la presencia de una grieta en la probeta y los cuerpos no se comportan como semiplanos infinitos. Esta modificación del campo tensional no es importante para grietas muy pequeñas.

Además la modificación de las condiciones de contacto afecta al FIT de la grieta, el cual se aleja de la solución analítica utilizada en la bibliografía (ecuación 1) que sobrestima, en general, el valor del FIT. Se ha visto también que la carga tangencial  $Q$  influye reduciendo el valor de la tensión  $\sigma$  que afecta a la grieta.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia por el apoyo recibido a través del proyecto DPI2001-2400-C02-02.

## REFERENCIAS

- [1] D.A. Hills, D. Nowell, "Mechanics of fretting fatigue", Kluwer Academic Publishers, (1994)
- [2] M.P. Szolwinski, T.N. Farris, "Mechanics of fretting fatigue crack formation", *Wear*, 198, 93-107 (1996)
- [3] J.A. Araújo, D. Nowell, "The effect of rapidly varying contact stress fields on fretting fatigue", *International Journal of Fatigue*, 24-7, 763-775 (2002)
- [4] C. Navarro, F.J. García-Lomas, J. Domínguez, "Iniciación de grietas por fretting fatiga en contacto esférico", XVIII Encuentro GEF, (2001)
- [5] J. Domínguez, "Cyclic variations in friction forces and contact stresses during fretting fatigue", *Wear*, 218, 43-53 (1998)
- [6] C. Cattaneo, "Sul contatto di due corpi elastici: distribuzione locale degli sforzi", *Reconditi dell'accademia nazionale dei lincei*, 27, 342-478 (1939)
- [7] R.D. Mindlin, "Compliance of elastic bodies in contact", *Journal of applied mechanics*, 259-268 (1949)
- [8] D. Nowell, D.A. Hills, "Mechanics of fretting fatigue tests", *Int. J. Mech.Sci.*, 29-5, 355-365 (1987)
- [9] M. Tur, R.C. Sáez, F.J. Fuenmayor, F. Denia, "Aproximación analítica al cálculo de tensiones en contacto cilíndrico", XV CNIM, (2002)
- [10] H.F. Bueckner, "Field singularities and related integral representations", In *Methods of analysis and solutions of crack problems*, G.C. Sih, Noordhoff International Publishing (1973)
- [11] H. Tada & C. Paris, G.R. Irwin, "The stress analysis of cracks handbook", Paris Productions Inc., (1985)
- [12] Hibbit, Karlsson & Sorensen, ABAQUS/Standard User's Manual V 5.8, Pawtucket R.I. (1996)
- [13] J.J. Ródenas, M. Tur, J. Tarancón, J. Fuenmayor, "h-Adaptatividad de Elementos Finitos en Refinamiento por Subdivisión de Malla", XIV CNIM – III, 1652-1658 (2000)