

MODELO DE FRACTURA CON FRICCIÓN EN CARAS DE GRIETA

E. Arenas, A. de Andrés

Universidad Pontificia Comillas
 Departamento de Ingeniería Mecánica
 E.T.S.I. ICAI. c/ Alberto Aguilera, 23, 28015 Madrid

Resumen. El fenómeno de fricción entre las caras de una grieta es especialmente relevante en fractura para los modos de deslizamiento (modos II y III). Con este trabajo se propone estudiar los efectos que produce dicha fricción en el proceso de crecimiento de grietas por fatiga en un caso de torsión alternativa, mediante el uso del método de los elementos finitos. El proceso de crecimiento de grietas se estudia mediante un modelo cohesivo de fractura. La fricción entre las caras de la grieta se modela utilizando técnicas de mecánica del contacto, siguiendo dos tipos de leyes: leyes clásicas y leyes micromecánicas, que tienen en cuenta parámetros físicos de la superficie, como la rugosidad y la dureza.

Abstract. Friction between crack faces is specially relevant in fracture problems when dealing with sliding modes (modes II and III). In this work we try to study the effects produced by friction in fatigue crack growth in a cyclic torsion application, using the finite element method. Fatigue crack growth is calculated by means of a cohesive model of fracture. Friction between crack faces is modelled following a contact mechanics approach with two different types of laws: classical laws and micromechanical laws which take into account physical surface parameters such as roughness and hardness.

1. INTRODUCCIÓN

El fallo por fatiga producido por cargas cíclicas de torsión es frecuente en muchos componentes usados en automoción, en ejes de turbogeneradores o en sistemas de transmisión. Bajo ese tipo de carga (torsión cíclica), el modo de fractura predominante es el modo III. Este modo se caracteriza, al igual que el modo II, por mantener siempre unidas las superficies de fractura, por lo que la interacción entre éstas juega un papel fundamental.

Según Tschegg [1], el rozamiento entre las superficies de fractura reduce el coeficiente de intensidad de tensión en la punta de la grieta a un valor efectivo que es menor que el valor nominal, a medida que la longitud de la grieta aumenta. Esto provoca que la velocidad de crecimiento de la grieta disminuye según la longitud de la grieta va siendo mayor.

Se tratará de verificar ese comportamiento mediante la simulación numérica de la evolución de una grieta en modo III.

Para el estudio del crecimiento de grietas, se utiliza un modelo cohesivo de fractura propuesto por de Andrés [2] y Ortiz y Pandolfi [3] en el marco del método de los elementos finitos. Sin embargo, ese modelo no tiene en cuenta la interacción (contacto-fricción) entre las caras de la grieta, por lo que no es del todo adecuado para algunos casos de torsión, o, en general, donde se produzcan modos mixtos de fractura. El objetivo de este trabajo es, por tanto, acoplar a ese modelo de fractura leyes de contacto y fricción que nos permitirán estudiar la influencia de la interacción de las caras de la grieta en el crecimiento de ésta.

Partiendo de un elemento cuyo comportamiento sigue una ley cohesiva de fractura, se le acopla otro elemento que modela el contacto-fricción en el caso de que la grieta esté cerrada y, por tanto, sus caras en contacto. Un aspecto muy importante en este estudio es el modelo

de fricción que se utilice, debido a las irregularidades de la superficie de las caras de la grieta. Se hace una comparativa de tres modelos de contacto diferentes. El primero es un modelo sin fricción, en el que simplemente se evita la penetración de una cara en la otra desde el punto de vista geométrico. El segundo modelo incorpora el rozamiento, adoptando la ley clásica de Coulomb. Es un modelo de fricción sumamente simplificado, por lo que acudimos después a un modelo micromecánico que contempla la influencia de parámetros de la superficie como la dureza o la rugosidad.

2. LEY COHESIVA DE FRACTURA

El proceso de formación y crecimiento de grietas se modela mediante una ley cohesiva de fractura. Las leyes cohesivas consideran la fractura como un fenómeno gradual de pérdida de resistencia (decohesión, separación) en la punta de la grieta (zona cohesiva), soportada por fuerzas (cohesivas), hasta llegar a la apertura total y formación de la superficie libre.

En la figura 1 se muestra una representación de un modelo cohesivo. La zona cohesiva es la zona en la que aparecen las fuerzas t (fuerzas cohesivas que se oponen a la formación de la grieta) mientras que δ es la apertura en la punta de la grieta, y nos sirve como medida de la decohesión que está teniendo lugar.

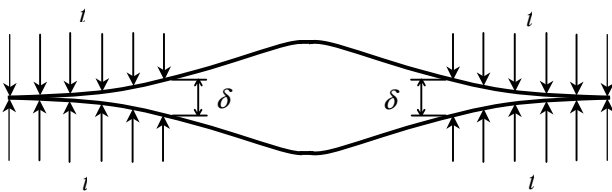


Fig. 1. Descripción del modelo cohesivo de fractura.

La ley cohesiva es una relación entre las fuerzas y la apertura, en cualquier punto de la zona cohesiva. Además, por medio de dicha ley podemos calcular la energía de fractura.

Para poder considerar modos mixtos de fractura, definimos, siguiendo a Camacho y Ortiz [4], un desplazamiento de apertura efectiva δ_{eff} , a partir de los desplazamientos en la dirección normal (δ_3) y en la tangencial (δ_1 y δ_2).

$$\delta_{eff} = \sqrt{\delta_3^2 + \beta^2(\delta_1^2 + \delta_2^2)} \quad (1)$$

donde β define la relación entre las fuerzas críticas cortantes y normales.

La ley cohesiva que utilizamos se basa en la ley de Rose-Smith-Ferrante [5] (figura 2) donde t_c es la tracción cohesiva normal máxima, δ_c es un desplazamiento de apertura característico y G_c es la energía liberada en la fractura.

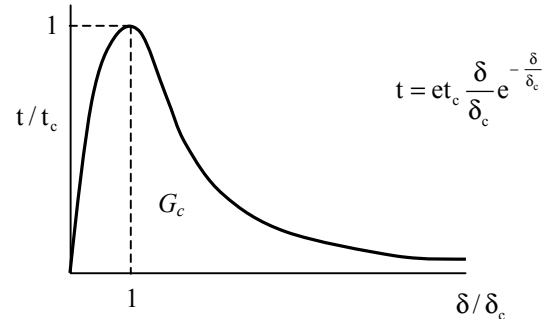


Fig. 2. Ley cohesiva basada en la ley de Rose-Smith-Ferrante.

Para registrar la evolución del crecimiento de la grieta, se define una variable de daño D como:

$$D = \frac{\phi(\delta_{max})}{G_c} \quad (2)$$

donde δ_{max} es la máxima apertura alcanzada en el punto en el que se quiere calcular el daño, y ϕ es la energía liberada en ese punto hasta ese valor de apertura. Por lo tanto es una relación entre la energía liberada hasta un determinado momento y la máxima energía que se puede liberar. Es evidente que D sólo puede tomar valores entre 0 y 1. D es igual a cero en un punto cuando el material está sin fracturar en ese punto, y es igual a 1 cuando se ha formado totalmente la grieta. Debido al carácter irreversible de la formación de grietas, $D \geq 0$.

La ley cohesiva se implementa en un programa de elementos finitos (en nuestro caso FEAP), en un elemento de 8 nodos de espesor inicial nulo, como el que se representa en la figura 3.

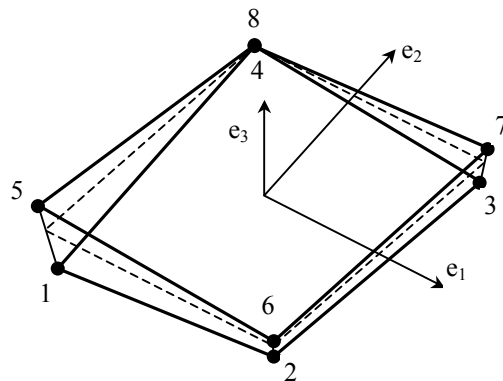


Fig. 3. Geometría del elemento utilizado.

El uso de las leyes cohesivas ha demostrado tener ciertas ventajas, como que no presuponen la ley constitutiva del material ni de la forma y tamaño de la zona plástica, y que la forma y situación de los sucesivos frentes de grieta son un resultado directo de los cálculos. Para un análisis más exhaustivo del modelo cohesivo utilizado remitimos al lector a de Andrés [2], de Andrés *et al.* [6] y Ortiz y Pandolfi [3].

3. FORMULACIÓN DE LAS LEYES DE CONTACTO Y FRICCIÓN.

En general existen dos tipos de leyes de contacto y fricción: leyes macromecánicas y leyes micromecánicas. Las primeras son leyes simplificadas que consideran parámetros generalizados a la superficie, mientras que las segundas se basan en parámetros a nivel microscópico, como la rugosidad y la microdureza. Por lo tanto, y dadas las irregularidades que presenta una superficie fracturada, las segundas serán mucho más realistas, ya que reflejan el estado físico de la superficie.

Al formular el problema de contacto entre dos cuerpos, se estudia por separado la ley que rige el comportamiento en la dirección normal y la que rige el comportamiento en la dirección tangencial.

3.1 Dirección normal

Se trata de modelar el contacto en esa dirección entre las dos caras de la grieta. Básicamente se intenta evitar que una cara penetre dentro de la otra. Aunque ésto físicamente no puede ocurrir, numéricamente es algo que ocurriría si no se programara el algoritmo de contacto.

Desde el punto de vista macroscópico, el problema se reduce a forzar que g_N (separación entre las superficies, negativa si hay penetración, ver figura 4) sea cero. La formulación de ese problema es:

$$g_N \geq 0, \quad F_N \leq 0, \quad F_N g_N = 0 \quad (3)$$

donde F_N es la fuerza de contacto.

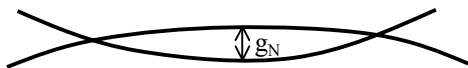


Fig. 4. Método del penalty.

Esas ecuaciones corresponden a un problema ampliamente estudiado en el campo de la optimización y que se resuelve utilizando el método del penalty o el de los multiplicadores de Lagrange. En el presente trabajo se utiliza el método del penalty, que físicamente consiste en interponer un muelle de constante k_N de valor muy alto (parámetro de penalty) entre las dos superficies:

$$F_N = k_N g_N \quad (4)$$

Cuanto mayor sea k_N , menor será la penetración (g_N) entre las superficies, y por tanto, más real será la solución. Idealmente, el parámetro de penalty debería ser infinito para conseguir la solución correcta, pero eso numéricamente es imposible, así que se elige un valor de k_N tan alto como sea posible.

Con ese método se evita la penetración geométrica, sin estudiar el fenómeno físico del contacto. Por ello, debemos acudir a un modelo micromecánico, que considere las deformaciones de las microasperidades de las superficies. Como se sabe, no existen las superficies planas. Toda superficie, por plana que parezca, a nivel microscópico presenta un relieve de picos y valles. Llamamos asperidades a los picos que aparecen a ese nivel microscópico. Cuando dos cuerpos en general entran en contacto, lo hacen en solo un porcentaje reducido de sus superficies aparentes, ya que realmente el contacto se produce entre las asperidades de las superficies (figura 5).

Song y Yovanovich [7] han propuesto un modelo que relaciona la fuerza de contacto normal con la separación de los planos medios de las superficies en contacto (d en la figura 5), por medio de parámetros micromecánicos de la superficie tales como la rugosidad y la microdureza.

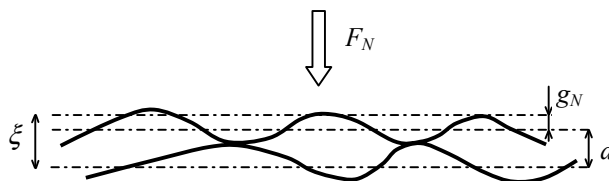


Fig. 5. Modelo micromecánico de contacto.

Zavarise [8] adapta ese modelo al método de los elementos finitos, obteniendo la siguiente ecuación en la que se obtiene la presión de contacto en función de d ($d = \xi - g_N$):

$$p_N = c_1 \left(1617646.152 \frac{\sigma}{m} \right)^{c_2} e^{\frac{[-(\xi - g_N)^2 \frac{1 + 0.0711c_2}{(1.363\sigma)^2}]}{5.589^{1 + 0.0711c_2}}} \quad (5)$$

donde c_1 , c_2 , ξ , σ y m son parámetros del material relacionados con la dureza y la rugosidad de las superficies.

En este trabajo se ha utilizado esa adaptación de Zavarise para calcular la presión normal de contacto entre las superficies de fractura.

3.2 Dirección tangencial (fricción)

Existen diferentes leyes de rozamiento que se pueden aplicar. En primera aproximación se utiliza una ley clásica, la ley de Coulomb, en la que el coeficiente de rozamiento (μ), es un coeficiente macroscópico promedio de toda la superficie. La fuerza de rozamiento F_T es:

$$F_T \leq \mu F_N \tag{6}$$

De igual manera que en el problema de la dirección normal, necesitamos un modelo de rozamiento que capture de una manera más realista el comportamiento de la superficie. Por lo tanto se acude a modelos micromecánicos de fricción.

Se elige un modelo propuesto por Wriggers, Vu Van y Stein [9], en el que se calcula la fuerza de rozamiento como:

$$F_T \leq \alpha(F_N)^n - \beta F_N \tag{7}$$

siendo α , β y n parámetros que dependen de propiedades de la superficie como la rugosidad o la dureza. Ese modelo procede de estudios de Tabor [10] y Woo y Thomas [11]. Tabor propone un coeficiente de rozamiento local en cada aspersion calculado como $\mu = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta$, siendo τ_0 la tensión de rotura a cortadura de la aspersion y p_r es la presión real existente en el punto de contacto.

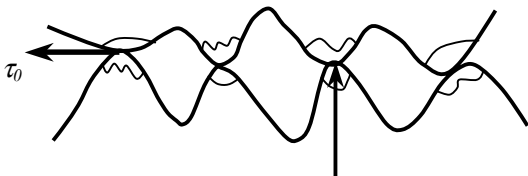


Fig. 6. Modelo micromecánico de fricción de Tabor.

Por otro lado, Woo y Thomas, a partir de diferentes resultados experimentales, sugieren una expresión que relaciona el área real de contacto A_r (teniendo en cuenta que el contacto tiene lugar entre las microasperidades), con el área aparente o geométrica A :

$$\frac{A_r}{A} = \left(\frac{p_N}{AH} \right)^n, \quad n = \frac{5}{6} \tag{8}$$

donde H es la dureza del material.

Cada uno de los modelos descritos anteriormente, se programan junto con la ley cohesiva en un elemento del tipo del representado en la figura 3.

4. APLICACIÓN A EJES SOMETIDOS A TORSIÓN ALTERNATIVA

Los modelos se aplican a cálculos de crecimiento de grieta en un eje sometido a una carga alternativa de torsión. En la figura 7 se representa el mallado del eje, y se ha separado para mayor claridad la superficie mallada con elementos cohesivos, que será la superficie a través de la que la grieta se propagará.

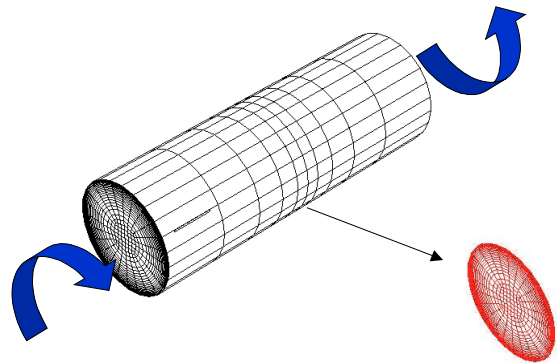


Fig. 7. Mallado del eje para estudio de torsión alternativa.

En la figura 8 se presenta un ejemplo de los cálculos realizados. Representa el daño en los elementos cohesivos al someter al eje a un par. La variable daño nos permite tener una medida cuantitativa de lo degradado que se encuentra un elemento cohesivo.

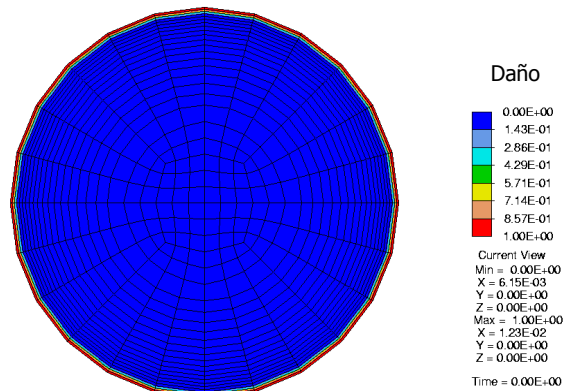


Fig. 8. Daño en los elementos cohesivos.

Por medio de estas simulaciones se intentará comprobar que el contacto entre las caras de la grieta produce una disminución en la velocidad de crecimiento.

5. CONCLUSIONES

Se propone un estudio del crecimiento de grietas en ejes sometidos a torsión alternativa que tiene en cuenta el efecto del rozamiento de las caras de grietas mediante modelos micromecánicos. Este método mejorará

sustancialmente los métodos actuales en los que se evitaba el contacto entre las caras de la grieta mediante la aplicación de una fuerza axial. Además se apuesta por técnicas de la mecánica del contacto para modelar la interacción entre las caras de la grieta, haciendo especial hincapié en los métodos micromecánicos en los que las superficies de contacto se caracterizan con valores de rugosidad y dureza.

Se espera en breve poder comprobar los modelos utilizados comparándolos con valores experimentales obtenidos por Tschegg [1], Nayeb-Hashemi *et al.* [12] y Tschegg *et al.* [13].

6. REFERENCIAS

- [1] Tschegg, E.K., "A contribution to mode III fatigue crack propagation", *Materials Science and Engineering*, **54**, pp. 127-136 (1982).
- [2] de Andrés, A., "Fatiga multiaxial en ejes de gran par", Tesis doctoral, Universidad Pontificia Comillas, Madrid (1997).
- [3] Ortiz, M. y Pandolfi, A. "Finite-deformation irreversible cohesive elements for three-dimensional crack-propagation analysis", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **44**, pp. 1267-1282 (1999).
- [4] Camacho, G.T. y Ortiz, M. "Computational modelling of impact damage in brittle materials", *International Journal of Solids and Structures*, **33**, pp. 2899-2938 (1996).
- [5] Rose, J.H., Ferrante, J. y Smith, J.R. "Universal binding energy curves for metals and bimetallic interfaces", *Phys. Rev. Lett.*, **47**, pp. 675-678 (1981).
- [6] de Andrés, A., Ortiz, M. y Pérez, J.L., "Elastoplastic finite element analysis of three-dimensional fatigue crack growth in aluminum shafts subjected to axial loading", *International Journal of Solids and Structures*, **36**, pp. 2231-2258 (1999).
- [7] Song, S. y Yovanovich, M.M. "Explicit relative contact pressure expression: dependence upon surface roughness parameters and vickers microhardness coefficients", *AIAA Journal*, artículo nº 87-0152 (1987).
- [8] Zavarise, G. "Problemi termomeccanici di contatto – aspetti fisici e computazionali", Tesis doctoral, Universidad de Padua, Italia (1991).
- [9] Wriggers, P., Vu Van, T., y Stein, E. "Finite element formulation of large deformation impact-contact problems with friction", *Computers and structures*, **37**, pp. 319-331 (1990).
- [10] Tabor, D. "Friction –the present state of our understanding", *Transactions of the ASME*, **103**, pp. 169-179 (1981).
- [11] Woo, K.L. y Thomas, T.R. "Contact of rough surfaces: a review of experimental work", *Wear*, **58**, 331-340 (1980).
- [12] Nayeb-Hashemi, H., McClintock, F. y Ritchie, R. "Effects of friction and high torque on fatigue crack propagation in mode III", *Metalurgical Transactions*, **60**, pp. 2197-2204 (1982).
- [13] Tschegg, E., Ritchie, R., y McClintock, F. "On the influence of rubbing fracture surfaces on fatigue crack propagation in mode III", *International Journal of Fatigue*, pp. 29-35 (1983).