

EFECTO DEL MODELO GEOMÉTRICO EN LA PREDICCIÓN DE VIDA A FATIGA POR FRETTING

J. Vázquez^{1,*}, C. Navarro¹, J. Domínguez¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, Sevilla, España.

*E-mail: jesusvaleo@us.es

RESUMEN

Este trabajo estudia la influencia que tiene en la estimación de la vida a fatiga por fretting el tipo de geometría utilizada para calcular los estados de tensiones/deformaciones producido en un par de contacto cilindro-plano. Además, en este trabajo se analiza el efecto que tiene la forma de la grieta en las predicciones a fatiga por fretting. El cálculo de los estados de tensiones/deformaciones se realiza mediante una serie de modelos de elementos finitos que simulan tres tipos de comportamiento: tensión y deformación plana (geometrías 2D) y 3D. Con cada uno de estos modelos se obtiene una vida de iniciación además de una evolución distinta para el factor de intensidad de tensiones (FIT) (el cual se calcula mediante el método de las funciones de peso) y por lo tanto una estimación de vida a fatiga por fretting distinta. Los resultados obtenidos con cada uno de los distintos modelos se comparan entre si además de con la vida experimental obtenida en una serie de ensayos.

ABSTRACT

This paper analyses the influence on the fretting fatigue life predictions of the type of geometry used for obtaining the stress/strain fields produced in a cylindrical contact. Also, this work takes into account the effect produced in the fretting fatigue predictions by the fatigue crack shape. The strain/stress fields are calculated using a series of finite elements models which consider three types of behaviour: plane stress, plane strain (2D geometries) and 3D. Each of these models gives a different crack initiation phase and also a different evolution of the stress intensity factor (SIF) (which is calculated by means of the weight function method) and therefore a different fretting fatigue life prediction. Finally, the lives obtained with the numerical models are compared with the experimental lives.

PALABRAS CLAVE: Fatiga por fretting, efecto 3D, modelos de predicción de vida.

1. INTRODUCCIÓN

Fretting es un fenómeno de daño superficial que se produce en determinadas uniones mecánicas que se encuentran sometidas a cargas variables en el tiempo. Como consecuencia de estas cargas, en las superficies de contacto de las uniones se producen unas distribuciones de tensiones, también variables en el tiempo, que pueden dar lugar a la formación de grietas superficiales [1]. Si además del campo de tensiones creado por las cargas de contacto, existe una tensión global fluctuante, al fenómeno se le denomina fatiga por fretting, pudiendo ocurrir en esta situación que las grietas superficiales crezcan de tal forma que se produzca el fallo mecánico de la unión [2].

Debido a que la forma más habitual de transmitir los esfuerzos entre sólidos es mediante un contacto mecánico, la fatiga por fretting, o el fretting, está presente en una gran variedad de componentes mecánicos. Este motivo hace que actualmente el fenómeno de fretting sea objeto de estudio por parte de muchos investigadores [3]-[5].

Con objeto de prever el fallo en estos componentes mecánicos, se han desarrollado una serie de modelos de predicción de vida a fatiga por fretting [6]-[10]. En muchas ocasiones estos modelos de predicción se aplican a geometrías y sistemas de cargas cuyo comportamiento, y por motivos de simplicidad, se puede asimilar a condiciones de tensión (T.P.) o deformación plana (D.P.), esto es, a modelos 2D, aunque la geometría real sea 3D.

El objeto de estudio de este trabajo es mostrar el efecto que tiene en las predicciones de vida a fatiga por fretting el uso de modelos 2D o 3D. Para ello, se han realizado simulaciones de vida, considerando ambas geometrías (2D y 3D), sobre una serie de ensayos experimentales. La clase de contacto usado en los ensayos es del tipo cilindro-plano. En este tipo de contacto, un elemento cilíndrico se pone en contacto con una probeta de tipo “dog-bone” mediante una carga normal N . Ambos componentes están fabricados con una aleación de aluminio Al 7075-T651. Posteriormente, a la probeta se le somete a una tensión axial cíclica, σ , que a través del montaje realizado y de la fricción existente entre ambas superficies de contacto,

genera una carga tangencial cíclica Q (figura 1). Más detalles acerca de la realización de estos ensayos se muestran en [11].

2. MODELO DE PREDICCIÓN DE VIDA

Para la predicción de vida a fatiga por fretting se ha utilizado un modelo basado en otro previamente propuesto por los autores [7]. Este modelo combina las fases de iniciación y de propagación de grieta, y en donde cada fase se analiza por separado. En la fase de propagación, y utilizando los procedimientos de la mecánica de la fractura, se obtiene una curva en la que se proporciona el número de ciclos, $N_p(a)$, que tarda en propagarse una grieta desde una longitud inicial a hasta la rotura. Esta curva se obtiene integrando la ley de propagación desde cada longitud de grieta, a , hasta la longitud de grieta que produce la fractura de la probeta. Por otra parte, analizando la fase de iniciación de grieta, se obtiene una segunda curva que proporciona el número de ciclos de iniciación, $N_i(a)$, necesarios para que se genere una grieta de longitud a . Esta curva $N_i(a)$ se calcula a partir de los estados de tensiones y deformaciones existentes a lo largo del camino prospectivo de la grieta. Combinando ambas curvas se obtiene la vida total a fatiga por fretting, $N_f(a) = N_i(a) + N_p(a)$, en función del valor que se tome para la longitud de grieta, a , que separa las fases de iniciación y propagación. Se ha mostrado [7] que cerca de la superficie domina el proceso de iniciación y que lejos de ella lo hace el de propagación, pudiéndose considerar el nexo entre las dos fases el mínimo de la curva de vida total $N_f(a)$ [8]. Por esta razón, y porque además es el valor más conservativo, se toma como solución el mínimo de la curva de vida total.

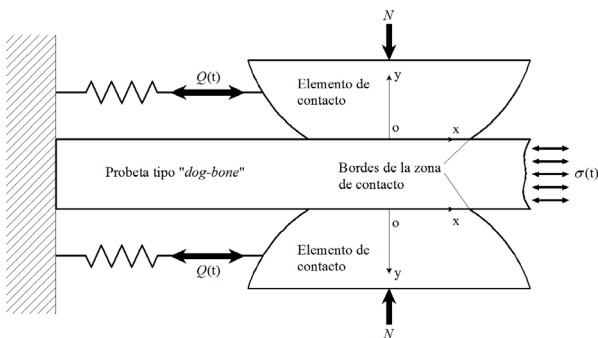


Figura 1. Esquema del montaje experimental

2.1. Fase de propagación

Para calcular la fase de propagación se emplea una ley de crecimiento basada en la mecánica de la fractura, y en la que se toma como longitud inicial de grieta una longitud genérica, a . La ley de crecimiento utilizada trata de modelar también el crecimiento de grietas pequeñas ya que la longitud de iniciación considerada puede ser del orden de micras. Para ello se introduce un umbral de crecimiento modificado en función de la longitud de grieta [9]:

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

En la ecuación (1) ΔK_{th_x} es el rango del factor de intensidad de tensiones (FIT) umbral para grietas largas, f es un parámetro que de forma general se toma igual a 2.5 [10], l_0 es la distancia típica hasta la primera barrera microestructural, C y n son las constantes de la ley de Paris y a_0 es la constante de El Haddad que viene definida por la expresión

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

En donde $\Delta \sigma_{FL}$ el rango de tensiones en el límite de fatiga. El factor que multiplica al FIT umbral para grietas largas 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 analizado diferentes opciones para modelar el crecimiento de grietas pequeñas [9], siendo la mostrada en la ecuación (1) la que mejor se ajusta a los resultados experimentales.

Con objeto de estudiar el efecto producido por el tipo de geometría (2D o 3D) en la fase de propagación, el FIT se ha calculado de forma diferente en función de si el conjunto “elemento de contacto-probeta” se modela mediante una geometría 2D o 3D. En aquellos modelos en donde se ha considerado un estado de tensión o deformación plana (2D), el FIT se ha obtenido mediante la integración de la función de peso para grietas bidimensionales obtenida por Orynyak [12], de modo que el FIT viene dado por:

$$K(\phi) = \int_{\Omega} \sigma(y) w(g, \phi) dA, \quad (3)$$

donde Ω representa el plano contenedor de la grieta, ϕ es ángulo que determina el punto del frente de grieta en donde se quiere evaluar el FIT, $\sigma(y)$ es la distribución de la tensión normal a el plano Ω (obtenido mediante el modelo sin grieta), que aunque es bidimensional, sólo varía con la coordenada y , ya que mediante un modelo 2D solo es posible obtener este tipo de distribución, y por último g simboliza la geometría de la grieta. Cuando se considera un modelo 3D, el cálculo del FIT se realiza mediante una adaptación de la anterior ecuación (3) al caso bidimensional, de modo que

$$K(\phi) = \int_{\Omega} \sigma(y, z) w(g, \phi) dA, \quad (4)$$

en donde la distribución de la tensión normal al plano contenedor de la grieta, $\sigma(y,z)$, en este caso 3D es realmente bidimensional.

El uso de las ecuaciones (3) y (4) para el cálculo del FIT es válido hasta la situación en la que la grieta se hace pasante. Una vez alcanzado este punto, el FIT se calcula mediante la función de peso unidimensional, $w(y,l)$, desarrollada por Bueckner [13]

$$K(l) = \int_0^l \sigma(y)w(y,l)dy \quad (5)$$

En (5), de nuevo $\sigma(y)$ es la tensión normal al camino prospectivo de la grieta, y que para los casos 3D ésta se ha promediado a lo largo del espesor de la probeta.

Ambas distribuciones de tensiones, $\sigma(y)$ (para las ecuaciones (3) y (5)) y $\sigma(y,z)$, se ha obtenido mediante una serie de modelos elastoplásticos de elementos finitos que simulan el par de contacto utilizado en los ensayos. Para la realización de este modelo de elementos finitos se ha utilizado el software comercial ANSYS 14.0. En la figura 2 se muestra la malla utilizada en el modelo de elementos finitos además de las condiciones de contorno impuestas para el caso de una geometría 2D. En estos casos considerando las condiciones de simetría presente en los modelos 2D (T.P. y D.P.), y con objeto de reducir el número de grados de libertad, sólo se ha modelado la mitad de la probeta

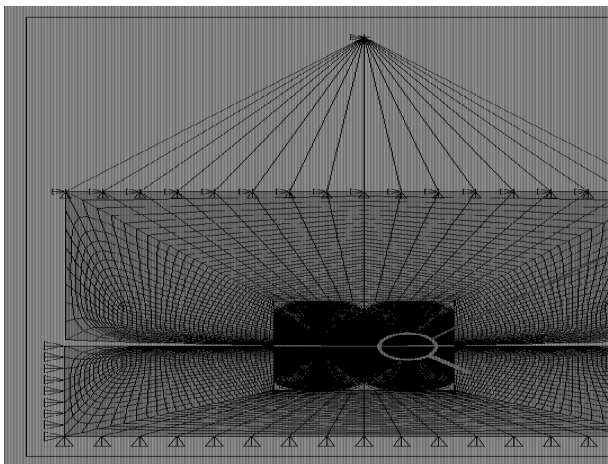


Figura 2. Malla del modelo 2D

En la figura 3 se muestra una imagen con la malla del modelo 3D, en el que de nuevo y debido a las condiciones de simetría existentes en los modelos 3D, sólo se ha modelado la mitad del elemento de contacto y un cuarto de la probeta.

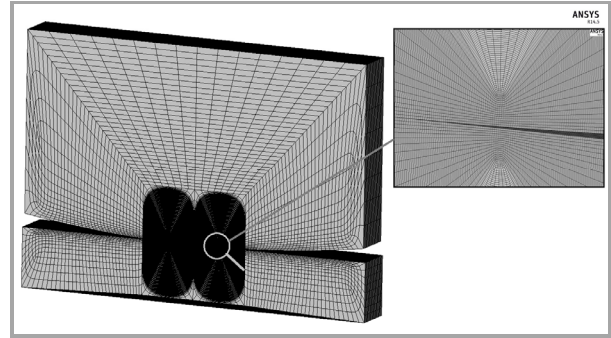


Figura 3. Malla del modelo 3D

Tanto para los casos 2D como para los 3D, y en base a las observaciones experimentales, se ha considerado un único tipo de grieta superficial. Ésta emana del borde de la zona de contacto, es semi-elíptica y está centrada en el espesor de la probeta (figura 4).

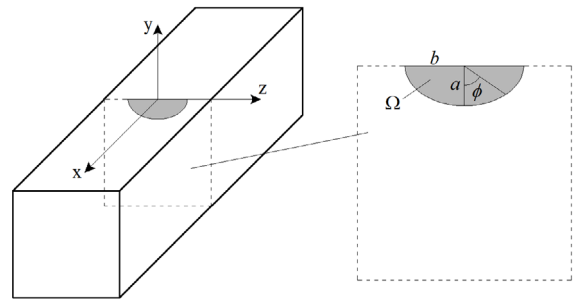


Figura 4. Configuración de la grietas en las probetas

Para obtener K en las simulaciones realizadas, se han supuesto una relación de aspecto variable, es decir, que cambia conforme crece la grieta. Esta relación de aspecto variable se ha calculado considerando que los puntos del frente de grieta situados en $\phi=0$ y $\phi=\pi/2$ (véase la figura 4), crecen acorde al valor del FIT en esos puntos, y que teniendo en cuenta una ley de crecimiento de tipo Paris, lleva a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{db}{da} = \left(\frac{K_{\phi=\pi/2}(a,b)}{K_{\phi=0}(a,b)} \right)^n \quad (6)$$

Para ello se han utilizado las expresiones del FIT en la superficie ($\phi=\pi/2$) y fondo de la grieta ($\phi=0$) proporcionadas por la referencia [12]. La resolución de la ecuación (6) se ha hecho mediante una integración numérica y en donde se ha tomado como condición inicial para $b(a)$, que $b(1\mu\text{m})=1\mu\text{m}$. Se ha comprobado que la suposición tomada para esta condición inicial sólo influye en la evolución de la relación de aspecto de la grieta, b/a , para longitudes menores de $20\mu\text{m}$ tal y como se puede ver en la figura 5. En esta figura, se recogen los resultados de una simulación mediante un modelo 3D de uno de los ensayos realizados.

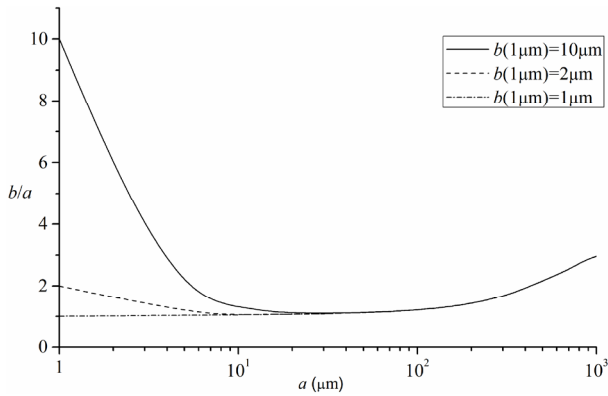


Figura 5. Evolución de la relación de aspecto b/a .

2.2. Fase de iniciación

El modelo presentado en este artículo analiza la fase de iniciación usando algunas de las ideas mostradas en el trabajo de McClung et al. [14]. El primer paso consiste en la obtención de una curva de fatiga, $\varepsilon-N(a_i)$, en probetas lisas que proporcione el número de ciclos necesario para generar una grieta de longitud a_i en función de la deformación aplicada. Para cada nivel de deformaciones, ε_j , el número de ciclos de esta curva, $N(a_i)_{\varepsilon_j}$, se obtiene a partir de la ecuación:

$$N(a_i)_{\varepsilon_j} = N_{\varepsilon_j} - N_p(a_i) = N_{\varepsilon_j} - \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{f(a)} \quad (7)$$

Donde N_{ε_j} es el número de ciclos hasta el fallo obtenido en un ensayo de fatiga simple y sometida a niveles de deformación ε_j , a_i es la longitud de grieta, a_f es la longitud a la que se produce la fractura y $f(a)$ es la ley de crecimiento, que en este caso viene dada por (1).

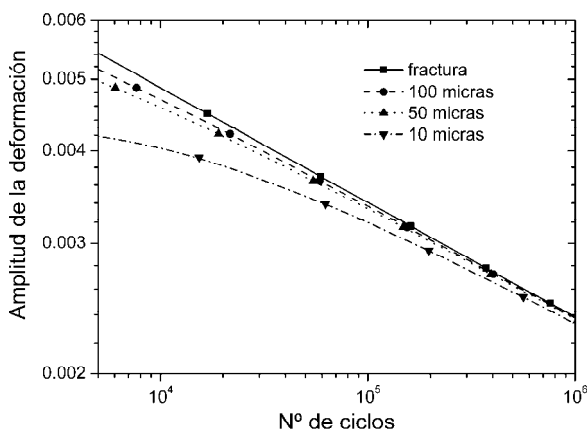


Figura 6. Curvas $\varepsilon-N(a_i)$ de iniciación para distintas longitudes de grieta en fatiga simple.

En el caso de que se estuviera aplicando el modelo a un ensayo de fatiga simple se podría calcular el número de ciclos necesario para generar una grieta de longitud, a_i , utilizando la curva apropiada $\varepsilon-N(a_i)$.

Las curvas, $\varepsilon-N(a_i)$ para el Al 7075-T651, a las que se referirá como curvas de iniciación, se presentan en la figura 6 para cuatro casos distintos: fractura total, generación de una grieta de 100, 50 y 10 μm .

En una situación en la que haya un gradiente de tensiones, como el que se produce en un componente sometido a fatiga por fretting, se puede aplicar el mismo procedimiento aunque con algunas modificaciones. En primer lugar, es necesario utilizar un criterio de fatiga multiaxial dado el carácter de las tensiones, en este caso se empleará el de Fatemi-Socie (FS) [15]. El valor de este parámetro se calcula para cada nivel de deformación en las curvas de iniciación, $\varepsilon-N(a_i)$, obtenidas anteriormente. Con estos valores se construyen las nuevas curvas $FS-N_i(a_i)$. Por otro lado, cuando hay un gradiente, el campo de tensiones varía con la profundidad y por lo tanto también lo hace el valor del parámetro FS. La vida de iniciación será una u otra en función de dónde se evalúe el parámetro de daño. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en otros trabajos [16], la opción que se considera más apropiada es calcular el FS medio entre la superficie y la longitud de grieta a_i , y con este valor entrar en la curva $FS-N_i(a_i)$ para obtener el número de ciclos necesario para generar una grieta de longitud a_i . Evidentemente, el cálculo será aproximado al usar un valor medio, lo cual tiene asociado un cierto error, tanto mayor cuanto mayor sea la zona sobre la que se calcula el valor medio del parámetro de daño. Esta opción significa que se está haciendo la hipótesis de que a igual valor medio del parámetro de daño en la zona, igual número de ciclos para iniciar la grieta de esa longitud.

2.3. Combinación de las fases de iniciación y propagación

Una vez obtenidas las curvas $N_p(a)$ y $N_i(a)$, ambas se suman para obtener una nueva curva, $N_f(a)$, que nos da el número de ciclos totales, $N_f(a) = N_i(a) + N_p(a)$, para cada longitud inicial de grieta a . El valor mínimo de $N_f(a)$ se toma como la vida a fatiga, y el valor de a para el que se produce este mínimo se toma como la longitud de iniciación. La ventaja que presenta este modelo, es que a priori no hay que tomar una decisión de para qué longitud de grieta termina la fase de iniciación, y por lo tanto empieza la fase de propagación, ya que esta elección se realiza en base a la longitud de grieta, a , que ofrece el menor valor de N_f o la predicción de vida a fatiga más conservativa. En la figura 7 se muestran las curvas $N_f(a)$, $N_p(a)$ y $N_i(a)$ obtenidas con la simulación 3D de los ensayos del tipo 3. Los parámetros que definen este tipo de ensayos que se mostraran más adelante En esta figura se observa como la longitud de iniciación, esto es, aquella que ofrece un valor más bajo de $N_f(a)$, es de aproximadamente 65 μm .

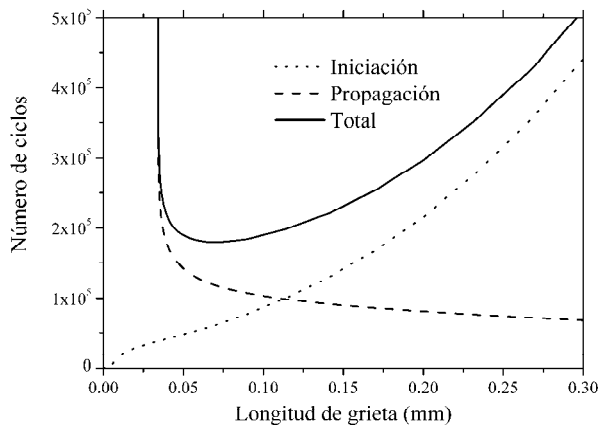


Figura 7. Aplicación del modelo de predicción a uno de los ensayos.

3. ENSAYOS

Los detalles para la realización de los ensayos se pueden encontrar en [11]. Siguiendo la misma metodología mostrada en la anterior referencia, se han realizado una serie de ensayos de fatiga por fretting, cuyos datos y resultados se muestran en la tabla 1. En estos ensayos se han aplicado 7 tipos o configuraciones de cargas diferentes, de modo que se consigan los siguientes objetivos: en primer lugar obtener ensayos con diferentes niveles de vida, y en segundo lugar ensayar configuraciones de fatiga por fretting en las que alguna de las cargas aplicadas sea predominante.

Tabla 1. Fuerzas (N y Q), tensión axial (σ) y número de ciclos (N_{exp}) hasta el fallo en los ensayos.

Ensayo	tipo	$N(N) / Q(N)$	σ (MPa)	N_{exp}
1	1	5800 / 850	40	1070886
2	1	5800 / 850	40	1793368
3	2	5800 / 850	50	577540
4	2	5800 / 850	50	382064
5	2	5800 / 850	50	676704
6	3	5800 / 1100	70	303509
7	3	5800 / 1100	70	347072
8	4	5800 / 1100	55	252878
9	4	5800 / 1100	55	283110
10	5	5800 / 1350	70	167324
11	5	5800 / 1350	70	165421
12	6	4750 / 1100	110	52440
13	6	4750 / 1100	110	57032
14	7	3690 / 1350	110	32395
15	7	3690 / 1350	110	57479

4. RESULTADOS

Para realizar las predicciones de vida a fatiga por fretting mediante el modelo anteriormente expuesto, se han utilizado las propiedades mecánicas y de fatiga para el aluminio Al 7075-T651 mostradas en la tabla 2 [17]. En esta tabla, σ_f' , b , ε_f' y c son los parámetros de la

curva ε - N , y K' y n' son las constantes de la curva de Ramberg-Osgood del material.

Tabla 2. Propiedades del aluminio Al 7075-T651 empleado en los ensayos.

E	ν	σ_u	σ_y
71GPa	0.33	572MPa	503MPa
C	n	ΔK_{th}	$\Delta \sigma_{FL}$
$8.83 \cdot 10^{-11}$	3.322	2.1MPa \sqrt{m}	169MPa
σ_f'	b	ε_f'	c
1610	-0.155	0.26	-0.806
K'	n'		
694MPa	0.04		

Las predicciones ofrecidas por los modelos 2D (T.P. y D.P.) y 3D, además de los resultados experimentales, se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Predicciones ofrecidas por los diferentes modelos.

Tipo	N_{exp}	T.P.	D.P.	3D
1	1070886 1793368	949195	876623	1997908
2	577540 382064 676704	564307	530292	1017824
3	303509 347072	150253	132687	179496
4	252878 283110	236057	205330	294700
5	167324 165421	94757	87313	104212
6	52440 57032	67845	61666	69356
7	32395 57479	55983	51213	48948

Para tener una visión de conjunto más directa del comportamiento de cada uno de los modelos de predicción, en la figura 8 se ha representado para cada uno de ellos la vida experimental frente a la vida predicha. En esta gráfica se observa que los modelos 2D realizan buenas predicciones de vida, y que además los resultados obtenidos mediante ambos modelos son muy similares. Respecto al modelo 3D, éste de forma general también ofrece resultados aceptables, aunque para los ensayos tipo 2 las predicciones de vida son algo peores que las obtenidas mediante los modelos 2D.

Para completar la información aportada por los distintos modelos, en la figura 9 se encuentran representados el porcentaje y la longitud de iniciación de grieta en función de la vida estimada. En esta gráfica se observa cómo las longitudes de iniciación en cualquier de los casos son siempre mayores que 20 μ m, hecho que

muestra que la relación inicial de aspecto de la grieta no influye en el cálculo de la fase de propagación.

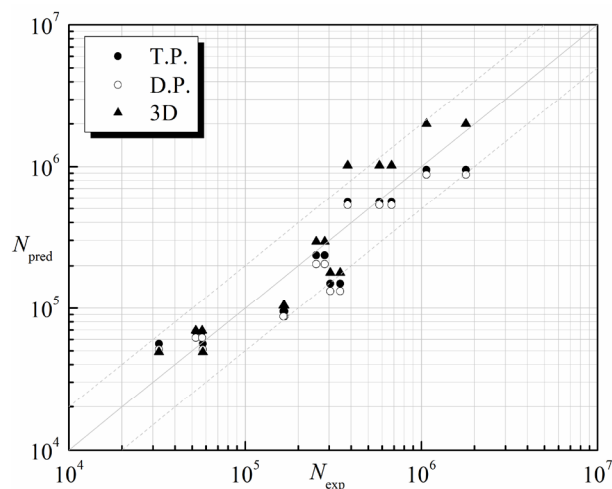


Figura 8. Predicciones obtenidas con los distintos modelos.

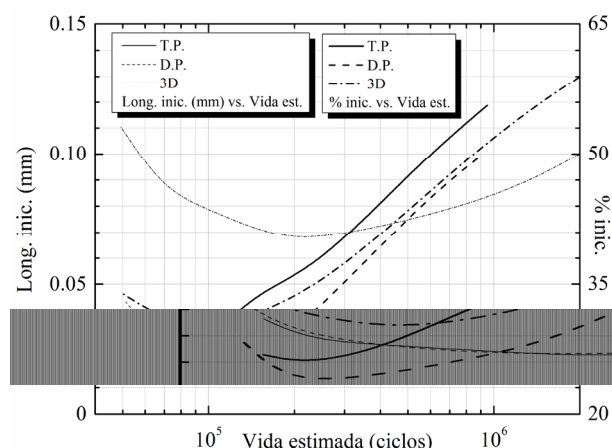


Figura 9. Longitud de iniciación de grieta y % de iniciación en función de la vida estimada.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado en un contacto cilíndrico el efecto que produce en la predicción de vida a fatiga por fretting el tipo de modelado que se realice de la geometría original del par de contacto. Para el par de contacto estudiado, cilindro-plano, se observa que los tres modelos estudiados ofrecen predicciones de vida similares, siendo prácticamente idénticos los resultados obtenidos con ambos modelos 2D. Estos resultados justifican la utilización de modelos de elementos finitos 2D que ofrecen la ventaja de ser modelos con un menor número de grados de libertad que los 3D, y por lo tanto menos costosos desde el punto de vista computacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación de la investigación a través del proyecto DPI-2011-23377.

REFERENCIAS

- [1] Waterhouse, R.B., Fretting Fatigue, Applied Science Publisher, 1981.
- [2] Nishioka, K., Hirakawa, K., *Fundamental investigation on fretting fatigue—part 4. The effect of mean stress.* Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng. pp. 408–414, 1969.
- [3] Navarro, C., Muñoz, S., Domínguez, J., *Propagation in fretting fatigue from a surface defect.* Tribol. Int., pp. 1149–1157, 2006.
- [4] Hattori, T., Kien, V.T., Yamashita, M., *Fretting fatigue life estimations based on fretting mechanisms.* Tribol. Int., pp. 1389–1393, 2011.
- [5] Hills, D.A. y otros, *Correlation of fretting fatigue experimental results using an asymptotic approach.* Int. J. Fat., pp. 62–75 2012.
- [6] Szolwinski M., Farris T., *Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy.* Wear, pp. 24–36, 1998.
- [7] Navarro, C., García, M., Domínguez, J., *A procedure for estimating the total life in fretting fatigue.* Fat. Fract. Engng. Mater. Struct., pp. 459–468, 2003.
- [8] Socie D.F., Morrow, J., Chen, W.C., *A procedure for estimating the total fatigue life of notched and cracked members.* Engng. Fract. Mech., pp. 851–859, 1979.
- [9] Muñoz, S., Navarro, C., Domínguez, J., *Application of fracture mechanics to estimate fretting fatigue endurance curves.* Engng. Fract. Mech., pp.2168–2186, 2007.
- [10] Vallellano, C., Domínguez, J., Navarro, A., *On the estimation of fatigue failure under fretting conditions using notch methodologies.* Fat. Fract. Engng. Mater. Struct., pp.469–478, 2003.
- [11] Tam, R. y otros, *Caracterización de una máquina para realizar ensayos de fretting fatiga con contacto cilíndrico.* Anales de la mecánica de la fractura, pp. 323–328, 2011.
- [12] Orynyak, I.V., Borodii, M.V., Torop, V.M., *Approximate Construction of a Weight Function for Quarter-Elliptical, Semi-Elliptical and Elliptical Cracks Subjected to Normal Stresses.* Eng. Fract. Mech., pp.143–151, 1994.
- [13] Bueckner, H.J., Sih, G.C. (Ed.), *Methods of analysis and solutions of crack problems*, Noordhoff Int. Publishing, 1973.
- [14] McClung, RC, Francis, WL, Hudak, Jr. SJ, *A new approach to fatigue life prediction based on nucleation and growth.* In: 9th International fatigue congress, Atlanta, 2006.
- [15] Fatemi, A. Socie, D. A., *Critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading.* Fatigue. Fract. Eng. Mater. Struct., pp. 145–65, 1998.
- [16] Navarro, C., Muñoz, S., Domínguez, J., *Influence of the initiation length in predictions of life in fretting fatigue.* Strain, pp 283–91, 2011.
- [17] Navarro, C., Vázquez, J., Domínguez, J., *3D vs. 2D fatigue crack initiation and propagation in notched plates.* Int. J. Fat, pp. 40–46, 2014.