

CONDICIONES UMBRALES DE CRECIMIENTO DE GRIETAS PEQUEÑAS POR FATIGA EN ENTALLAS. PARTE I: TEORÍA

C. Vallellano, A. Navarro, J. Domínguez
 Dpto. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales
 E.T.S.I.I. de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, SEVILLA

Resumen. El presente trabajo propone una descripción micromecánica del proceso de crecimiento grietas por fatiga en entallas. La interacción de la grieta con las barreras al deslizamiento plástico del material (e.g. los bordes de grano) y la influencia del gradiente de tensiones originado por la entalla son tenidos en cuenta intrínsecamente por el modelo desarrollado. Dicho modelo permite obtener las mínimas condiciones de tensión requeridas para que una grieta pueda propagarse en el fondo de la entalla (condiciones umbrales), identificando claramente el límite de iniciación y el límite de propagación hasta el fallo. Así mismo, el modelo propuesto permite explicar la formación de grietas no-propagantes.

Abstract. The present work presents a micromechanical description of the fatigue crack growth process at notches. Crack interaction with the plastic slip barriers of the material (e.g. the grain boundaries) and the influence of the notch stress gradient are intrinsically taken into account in the model. Both the notch fatigue crack initiation limit and the limit for propagation up to failure (i.e. the conventional notch fatigue limit) are clearly identified and calculated. The formation of non-propagating cracks is also explained.

1. INTRODUCCION

La formación de grietas por fatiga ocurre casi invariablemente en la raíz de concentradores de tensión o entallas, los cuales son en general inevitables en elementos de máquinas. Dado su claro interés práctico, el estudio de la reducción de resistencia a fatiga de componentes entallados ha recibido una gran atención y esfuerzo investigador durante las últimas décadas.

Las teorías pioneras en esta materia relacionan el factor de reducción de resistencia a fatiga de la entalla K_f (cociente entre los límites de fatiga de una pieza sin y con entalla) con la concentración de tensiones y el gradiente de las mismas sobre una cierta distancia característica del material. La idea que subyace en este tipo de relaciones K_f - K_t es que la tensión necesaria para iniciar una grieta en la raíz del concentrador es también suficiente para propagar la grieta hasta el fallo de la pieza. Sin embargo, como pusieron de manifiesto Frost y Dugdale [1], esto sólo ocurre en entallas suaves (K_t típicamente inferior a 4), limitando así el rango de aplicación de tales expresiones.

Los trabajos de Frost y Dugdale, y más recientemente de otros autores [2,3], evidenciaron claramente, en entallas agudas, la existencia de grietas que, tras iniciarse en la raíz del concentrador y propagarse una determinada distancia, se paraban sin provocar el fallo de la pieza (*grietas no-propagantes*). El hecho destacable era que cuando aparecían dichas grietas no-propagantes, en entallas de igual profundidad, el límite de fatiga del componente era casi independiente de la concentración de tensiones en la entalla.

Según lo anterior, el evento crucial que determina la resistencia a fatiga de un componente entallado no es nucleación de una microgrieta en la raíz del concentrador, sino la capacidad de ésta para propagarse a través del material sin detenerse. Por tanto, para abordar este problema es necesario estudiar qué factores gobiernan el crecimiento de una grieta sometida a un gradiente de tensiones relativamente fuerte como consecuencia de la entalla. Dado que los efectos de la concentración de tensiones son en general muy localizados, el tamaño de las grietas involucradas es también muy reducido, es decir, se trata de un problema de crecimiento de lo que se conoce como grietas pequeñas, las cuales exhiben en su comportamiento una notable interacción con la microestructura del material.

En general, las propuestas actuales en esta área se centran en describir el proceso de crecimiento desde un plano macroscópico, obviando las peculiares características de las grietas pequeñas. El presente trabajo pretende precisamente cubrir este hueco, planteando una descripción del proceso de crecimiento que permita recoger la influencia tanto de la microestructura del material como del gradiente de tensiones originado por la entalla. El modelo propuesto permite obtener las condiciones umbrales para la propagación de una grieta en un componente entallado, identificando claramente entre el límite de iniciación y el límite de fatiga de la pieza, así como predecir la aparición de grietas no-propagantes en el material.

2. RESISTENCIA A FATIGA DEL MATERIAL. EL DIAGRAMA DE KITAGAWA-TAKAHASHI

La resistencia a fatiga de un material metálico viene dictada por la oposición al crecimiento de las grietas que ofrecen los bordes de grano, límites de fase y en general todas las barreras al deslizamiento plástico existentes en el material [4]. El primer paso para abordar el proceso de propagación de una grieta en un especimen entallado será caracterizar la resistencia que ofrecen tales barreras microestructurales.

En la última década Navarro y de los Ríos [5] han propuesto un modelo de crecimiento de grietas por fatiga en componentes sin entallas que permite caracterizar la interacción con las barreras microestructurales. La idea básica de este modelo es considerar que la zona plástica de la grieta progresa bloqueándose en los sucesivos bordes de grano del material. De esta manera, la grieta podrá sólo crecer más allá de dichas barreras si es capaz de activar deslizamiento plástico en los granos adyacentes; en caso contrario, se parará al alcanzar el borde de grano.

Calculando la tensión necesaria para activar fuentes de dislocaciones en el material, los citados autores obtienen una expresión que les permite relacionar la tensión umbral para que una grieta crezca por fatiga más allá de una barrera genérica (τ_{Li}) con el límite de fatiga del material (τ_{FL}), esta es,

$$\frac{\tau_{Li}}{\tau_{FL}} = \left(\frac{m_i^*}{m_1^*} \right) \frac{1}{\sqrt{i}}, \quad i = 1, 3, 5, \dots \quad (1)$$

donde i es la longitud de grieta adimensional cuando la grieta ha alcanzado el borde de grano ($i = a/D/2$), siendo D el tamaño de grano característico del material. Los factores m_i^* son unos coeficientes que afectan a la tensión crítica de activación en la barrera considerada y fueron introducidos originariamente como factores de orientación cristalográfica (m_1^* es el coeficiente relativo a la primera barrera). Dicha ecuación no es más que la expresión en términos micromecánicos del diagrama de Kitagawa-Takahashi [6].

La forma típica del diagrama de Kitagawa es bien conocida (véase Figura 1) y puede explicarse fácilmente analizando la evolución de los términos de la ecuación (1). En efecto, en primer lugar, el término $1/\sqrt{i}$ representa la dependencia típica con $1/\sqrt{a}$ de la tensión necesaria para propagar una grieta predicha por la Mecánica de la Fractura Elástica-Lineal (MFEL). En el citado modelo dicho término describe la creciente "presión" que la grieta ejerce sobre la barrera al aumentar su tamaño.

Los diagramas de Kitagawa obtenidos experimentalmente muestran una primera zona sensiblemente horizontal en la región de grietas pequeñas, correspondiendo con el límite de fatiga del material, y disminuyen paulatinamente, hasta confundirse, con la recta de pendiente $-1/2$ predicha mediante el Factor de Intensidad de Tensiones Umbral ($K_{I\infty}$) de la MFEL.

Esta evolución es debida a que, en los primeros estadios del crecimiento, la resistencia ofrecida por las sucesivas barreras puede aumentar, proporcionado una sucesión (m_i^*/m_1^*) inicialmente creciente. Sin embargo, su valor se estabiliza cuando la grieta es suficientemente grande. Dicho aumento de resistencia es debido fundamentalmente a dos efectos: a) una creciente oposición cristalográfica, como consecuencia de que la grieta se ve forzada a crecer a través de un número mayor de granos cada vez y en general no favorablemente orientados, y b) el efecto de un creciente aumento en los niveles de cierre de grieta, lo cual se traduce en una menor presión efectiva sobre la barrera.

Cuando la grieta es aún pequeña, puede ocurrir que el aumento en la resistencia de las barreras compense en gran medida la disminución de la tensión umbral por efecto de la longitud de la grieta (término $1/\sqrt{i}$) y, por tanto, el diagrama de Kitagawa se mantenga aproximadamente horizontal. Sin embargo, conforme la grieta es mayor el incremento de la resistencia de las barreras comienza a perder importancia relativa y la curva del diagrama de Kitagawa comienza a separarse significativamente de la horizontal. En particular, cuando la grieta cubre un gran número de granos y los niveles de cierre no varían sustancialmente, la resistencia de las barreras estará totalmente estabilizada y las condiciones umbrales de propagación estarán sólo controladas por el efecto de la longitud de la grieta. A partir de dicho punto, la curva del diagrama de Kitagawa se confunde con la recta representativa del Factor de Intensidad de Tensiones Umbral de grieta grande $K_{I\infty}$.

Según lo anterior, la evolución de la tensión umbral en el diagrama de Kitagawa puede entenderse como el resultado de una competencia entre dos mecanismos, el aumento en la oposición ejercida por las sucesivas barreras y la creciente fuerza de la grieta para superarlas. En dicho diagrama, por tanto, está contenida toda la información necesaria para caracterizar la resistencia interpuesta por el material al crecimiento por fatiga de las grietas.

Sin embargo, la obtención experimental del diagrama de Kitagawa-Takahashi es costosa en términos de tiempo y dinero por lo que es interesante poder recurrir a expresiones aproximadas, fáciles de obtener con pocos resultados experimentales. La siguiente expresión,

inspirada en el modelo micromecánico descrito, recoge las características típicas observadas en los materiales metálicos y puede servir como primera aproximación a falta de resultados más precisos

$$\frac{\tau_{Li}}{\tau_{FL}} = \frac{\sqrt{a_0}}{(i^f + \bar{a}_0^f - 1)^{\frac{1}{2f}}} \quad (2)$$

siendo $\bar{a}_0 = a_0/D/2$ la longitud de grieta adimensional correspondiente a la intersección de las dos rectas límites, la trazada por el límite de fatiga y la recta dada por la MFEL, $a_0 = \frac{1}{\pi} (K_{th\infty}/Y\tau_{FL})^2$, donde Y es factor de corrección geométrico. El exponente f controla la rapidez de la transición entre ambas rectas límites, es decir, la rapidez a la que se satura la oposición de las barreras. Nótese que para $i=1$, es decir, cuando la grieta se encuentra bloqueada por la primera barrera, la tensión umbral se corresponde con el límite de fatiga del material, $\tau_{Li} = \tau_{FL}$. Para ilustrar la bondad de esta expresión, la Figura 1 muestra el diagrama de Kitagawa experimental para un acero 2.25Cr-1Mo [8] sometido a carga axial junto con el ajuste de la ecuación (2), expresada en tensiones normales.

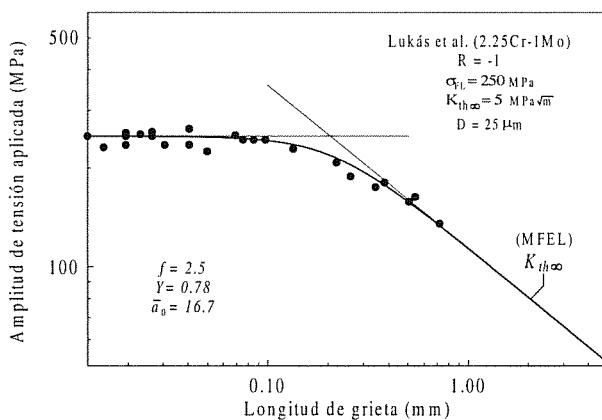


Fig 1. Diagrama de Kitagawa experimental. Ajuste de la expresión (2).

3. MODELADO DE UNA GRIETA EN LA RAÍZ DE UNA ENTALLA

Consideremos una grieta en la raíz de una entalla elíptica en un sólido semi-infinito que crece a través del material, bloqueándose su zona plástica en las sucesivas barreras microestructurales (Figura 2). Dicha grieta puede ser representada mediante una distribución de dislocaciones infinitesimales donde se distinguen tres zonas. La grieta propiamente dicha, sobre la que existe una tensión de fricción σ_1^i , su zona plástica asociada, donde las dislocaciones soportan una tensión σ_2^i que se opone a su movimiento, y la barrera microestructural (r_0^i), la cual soporta una tensión σ_3^i como consecuencia

del empuje del apilamiento de dislocaciones contra el borde de grano. Por simplicidad matemática se supone, en principio, que el componente está sometido a un estado de tensiones antiplano y la generalización práctica de las expresiones obtenidas al caso de tensión axial se discutirá en la Parte II del presente trabajo.

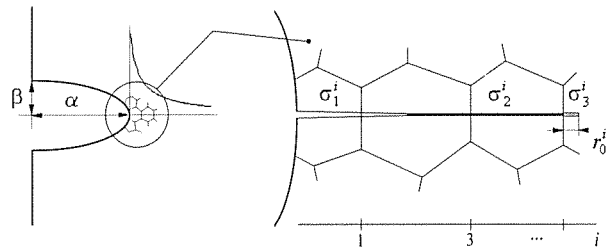


Fig 2. Representación esquemática de la grieta, la zona plástica y barrera microestructural en la raíz de la entalla.

Al igual que en un espécimen sin entalla la capacidad de la grieta para propagarse en el material está gobernada por la resistencia interpuesta por las barreras microestructurales, el factor diferenciador ahora es que las condiciones de tensión a las que estará sometida la grieta al enfrentarse con cada una de las barreras serán diferentes, como consecuencia del gradiente de tensiones de la entalla. Dependiendo de la evolución de dichas tensiones (decrecientes al alejarse del fondo de la entalla), es posible encontrar situaciones en las que la grieta es capaz de superar las primeras barreras del material, pero quede bloqueada definitivamente en alguna barrera más interna, conduciendo a la formación de una grieta no-propagante. Así, para caracterizar el fallo por fatiga del componente entallado es necesario analizar cuales deben ser las condiciones umbrales para que una grieta pueda superar cada una de las sucesivas barreras del material.

Considerando el instante genérico mostrado en la Figura 2, en el que la zona plástica de la grieta se encuentra bloqueada por el i -ésimo borde de grano, el proceso por el cual la grieta supera dicha barrera será el siguiente. A medida que la grieta se aproxima a la barrera la "presión" local σ_3^i va aumentando, como consecuencia de la intensificación de tensiones provocada por ésta. Una vez que esta tensión alcance un determinado valor crítico, tal que permita activar fuentes de dislocaciones en el grano vecino, la zona plástica se extenderá cubriendo por entero dicho grano y la grieta podrá, entonces, propagarse más allá de la barrera. La mínima tensión aplicada requerida para ello (tensión umbral) se obtiene cuando el frente de la grieta esté lo más próximo posible al borde grano, en teoría, justo en el borde de grano. La resistencia de la barrera en estas condiciones puede obtenerse a partir del diagrama de Kitagawa de un espécimen sin entalla, según se ha discutido antes.

Empleando las técnicas de transformación conforme en

el plano complejo es posible reducir el dominio entallado y el conjunto de dislocaciones al caso simple de una grieta en un medio infinito, donde el problema es más fácil de resolver. Como resultado de este análisis, la tensión umbral τ_{Li}^N para que una grieta supere una barrera genérica i en el fondo de una entalla elíptica se expresa como [7].

$$\frac{\tau_{Li}^N}{\tau_{FL}} = \left(\frac{\tau_{Li}}{\tau_{FL}} \right) \frac{\sqrt{i}}{\bar{\alpha} + \bar{\beta}} \left[\frac{\bar{\beta}}{\lambda_i} + \frac{\bar{\alpha}}{\sqrt{1 + \lambda_i^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

con $\lambda_i = \frac{1}{\bar{\alpha}^2 - \bar{\beta}^2} \left[\bar{\alpha} \sqrt{(\bar{\alpha} + i)^2 - \bar{\alpha}^2 + \bar{\beta}^2} - \bar{\beta}(\bar{\alpha} + i) \right]$, donde

$\bar{\alpha} = \alpha/D/2$, $\bar{\beta} = \beta/D/2$ son la profundidad y el ancho de la entalla, respectivamente, adimensionalizados por la mitad del tamaño de grano característico del material. La ecuación (3) pone de manifiesto que la tensión umbral para el crecimiento de una grieta en el espécimen entallado puede expresarse como la combinación de dos contribuciones: la debida al material, representada por el cociente τ_{Li}/τ_{FL} , y la debida a la presencia de la entalla, representada por el resto de los términos.

4. LÍMITES DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN HASTA EL FALLO EN ENTALLAS

Numerosos trabajos [1-3] sobre la fatiga en entallas bajo cargas de amplitud constante han puesto claramente de manifiesto la existencia de dos tensiones características: el límite de iniciación, mínima tensión necesaria para apreciar la presencia de grietas en la entalla, y el límite de propagación hasta el fallo, mínima tensión requerida para provocar la rotura de la pieza (límite de fatiga convencional del componente entallado). Se observa que ambos límites son coincidentes para entallas con K_i bajos, indicando que, una vez nucleada una grieta en la raíz de la entalla, ésta se propaga hasta provocar el fallo de la pieza. Sin embargo, las diferencias entre ellos se acentúan sustancialmente al aumentar la severidad del concentrador. Cualquier tensión aplicada comprendida entre dichos límites conduce siempre a la formación de grietas no-propagantes en la entalla, no produciendo, por tanto, la rotura del componente aunque se continúe aplicando la carga cíclica.

En términos ingenieriles, la nucleación física de una grieta, es decir, la primera rotura de vínculos a escala atómica carece de interés, al existir en los materiales usuales gran cantidad de defectos (porosidades, inclusiones, marcas superficiales, etc.) que provocan la temprana aparición de grietas. De acuerdo con la descripción del proceso de crecimiento expuesta aquí, el límite de iniciación de un componente entallado puede ser interpretado como la mínima tensión aplicada para

que una grieta, previamente nucleada en tales defectos, supere la primera barrera microestructural y pueda, al menos potencialmente, continuar propagándose en el material. Así, el límite de iniciación (τ_{Li}^N) se puede obtener haciendo simplemente $i = 1$ en la expresión (3),

$$\frac{1}{K_{f1}} = \frac{\tau_{Li}^N}{\tau_{FL}} = \frac{1}{\bar{\alpha} + \bar{\beta}} \left[\frac{\bar{\beta}}{\lambda_1} + \frac{\bar{\alpha}}{\sqrt{1 + \lambda_1^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Por analogía con el tradicional K_f , K_{f1} es conocido como factor de reducción de resistencia a la iniciación de grietas por fatiga en la entalla. Siguiendo la misma idea, el límite de fatiga del componente entallado (τ_{FL}^N) deberá corresponderse con la mínima tensión necesaria para que dicha grieta sea capaz de superar todas las sucesivas barreras microestructurales que encuentre a su paso. Dicha condición se obtiene fácilmente de la expresión (3) como

$$\tau_{FL}^N = \max_i (\tau_{Li}^N) \quad (5)$$

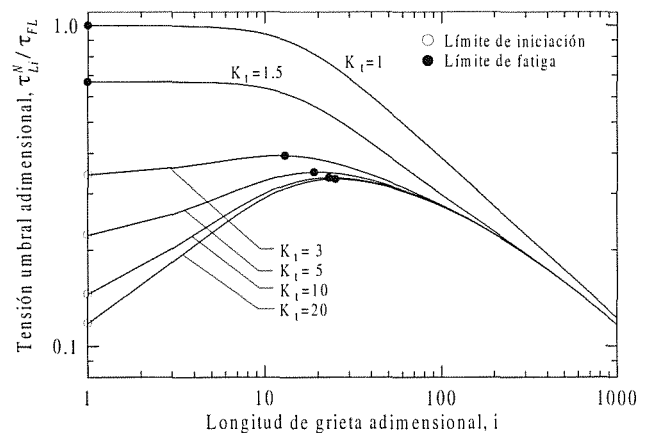


Fig 3. Tensión umbral τ_{Li}^N vs. longitud de grieta no-propagante ($\bar{\alpha} = 100$).

Para ilustrar la idea anterior, la Figura 3 muestra la evolución de la tensión umbral dada por la ecuación (3) en función de la longitud de la grieta, para una entalla de profundidad relativa $\bar{\alpha} = 100$ y distintos K_i . Se ha supuesto conocido el diagrama de Kitagawa y representado según la expresión (2), tomando como valores representativos $\bar{\alpha}_0 = 15$, de acuerdo con los resultados de Taylor [9], y $f = 2.5$, valor que reproduce un comportamiento adecuado en numerosos materiales [7]. Como se aprecia en la citada figura, el patrón de comportamiento es claramente distinto dependiendo de la severidad de la entalla. Las entallas suaves (véase por ejemplo $K_i = 1.5$) presentan una evolución de la tensión umbral siempre decreciente, similar a la de un espécimen sin entalla, lo que refleja que una vez que la grieta supera la primera barrera microestructural se

propagará hasta la rotura. En otras palabras, el límite de iniciación y el límite de fatiga coinciden. Sin embargo, a medida que la entalla se hace más aguda (por ejemplo, $K_t \geq 5$) comienza a aparecer un tramo creciente hasta alcanzar un máximo, siendo necesario aplicar tensiones superiores a éste para garantizar el crecimiento de una grieta hasta el fallo. Dicho máximo representa, por tanto, el límite de fatiga del componente entallado. El tramo creciente, entonces, determina el rango de tensiones en el cual es posible hacer crecer una grieta en la raíz de la entalla, pero dicha grieta encontrará siempre una cierta barrera microestructural capaz de detenerla y convertirla en no-propagante. El tamaño final de tales grietas dependerá de la tensión aplicada y de la geometría del concentrador [1-3]. Naturalmente, la posición del límite de fatiga define la máxima grieta no-propagante que es posible encontrar en la entalla.

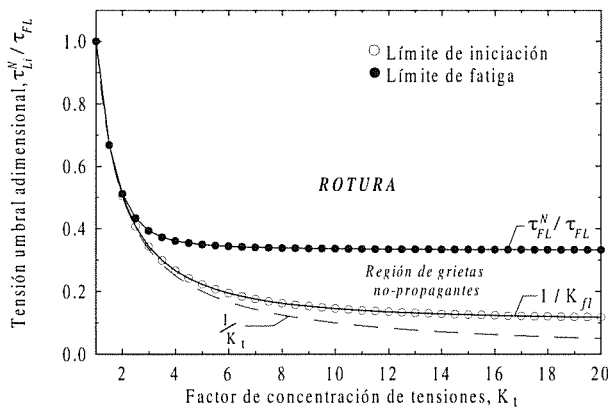


Fig 4. Límites de iniciación y de propagación hasta el fallo vs. K_t ($\bar{\alpha} = 100$).

Una representación más familiar de los resultados de la Figura 3 es la mostrada en la Figura 4, conocido también como diagrama de Frost. Aquí, se aprecia claramente como las diferencias entre el límite de iniciación y el límite de fatiga aumentan al aumentar K_t [1]. Asimismo, pone también de manifiesto que K_{f1} es en general inferior a K_t , especialmente en entallas agudas.

Un resultado experimental destacable, puesto también de manifiesto en la Figura 4, es que, siempre que aparecen grietas no-propagantes en entallas de igual profundidad, el límite de fatiga es aproximadamente constante e independiente de la concentración de tensiones. Según Smith y Miller [10] este fenómeno es consecuencia de que en entallas agudas, sometidas a tensiones próximas al límite de fatiga, el tamaño de las grietas no-propagantes es varias veces superior al de la zona de influencia de la entalla, definida ésta como aquella distancia l a la cual no se aprecian diferencias entre el crecimiento de una grieta de longitud a ($a > l$) en la entalla y el de una grieta de longitud $\alpha + a$ en una pieza sin entalla. Cameron y Smith [11] proponen que el

tamaño de dicha zona se ajusta a la relación $l = 0.21\sqrt{\alpha\rho}$, donde ρ es el radio de la entalla.

Para explorar este hecho en los términos del modelo propuesto, consideraremos el caso límite de una entalla tan aguda como una grieta (cuasi-grieta), la cual permite calcular el límite al que tiende el umbral de fatiga en el diagrama de Frost. Las condiciones umbrales de crecimiento de una grieta en esta situación se obtienen sin más que hacer $\beta \rightarrow 0$ en (3)

$$\tau_{Li}^N \Big|_{\beta \rightarrow 0} = \tau_{Li} \sqrt{\frac{i}{\bar{\alpha} + i}} \quad (7)$$

Así, siguiendo la propuesta de Smith y Miller, la zona de influencia se corresponderá con aquella longitud de grieta por encima de la cual el comportamiento de una grieta en la entalla (ecuación (3)) difiera muy poco del comportamiento de una cuasi-grieta (ecuación (7)).

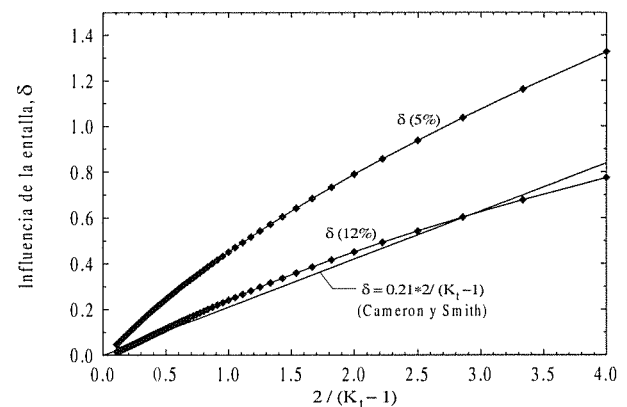


Fig 5. Zona de influencia de la entalla (adimensional) vs. K_t .

La Figura 5 muestra la zona de influencia adimensional, $\delta = l/\alpha$, en la que las diferencias entre ambas configuraciones son siempre inferiores a un 12% ($\delta_{12\%}$) y 5% ($\delta_{5\%}$) respectivamente. Como se puede ver, la expresión propuesta por Cameron y Smith discurre extraordinariamente próxima a $\delta_{12\%}$. Diferencias de un 10% ó 15% están perfectamente dentro de la dispersión típica en ensayos de fatiga de este tipo. Asimismo, en la Figura 6 se comparan las longitudes de grieta no-propagante máximas $a_{np(max)}$ con dichas zonas de influencia. En esta figura se puede comprobar que, incluso en el peor de los dos casos ($\delta_{5\%}$), a partir de un determinado valor de K_t ($K_t \approx 6$) el tamaño máximo de las grietas no-propagantes es siempre superior al de la zona de influencia del concentrador. En consecuencia, para K_t superiores a dicho valor crítico, todos los componentes mostrarán un comportamiento muy similar y, por ello, un límite de fatiga casi independiente de la severidad de la entalla. En particular, éste se corresponderá aproximadamente con el límite de fatiga en la configuración ideal de una cuasi-grieta, el cual

atendiendo a las expresiones (2) (5) y (7) se expresa como

$$\tau_{FL}^N \approx \tau_{FL} \sqrt{\frac{\bar{a}_0}{\bar{\alpha}}} \left(1 + \left[\frac{\bar{a}_0^f - 1}{\bar{\alpha}^f} \right]^{\frac{1}{1+f}} \right)^{\frac{1+f}{2f}} \quad (8)$$

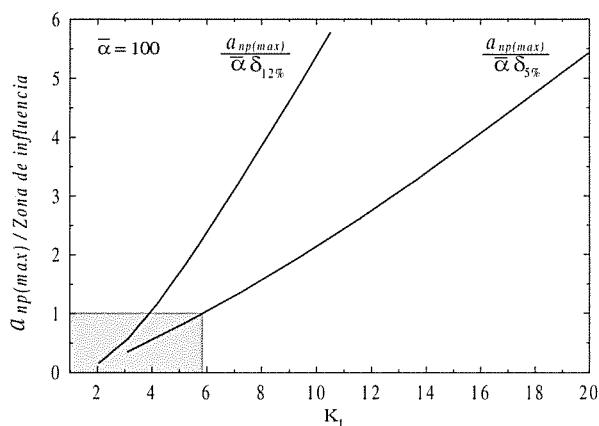


Fig 6. Tamaño relativo de la longitud máxima de grieta no propagante y la zona de influencia de la entalla vs. K_t .

Es fácil comprobar que la expresión (8) reproduce correctamente dos extremos de interés práctico. Por un lado, cuando el tamaño de la entalla es muy superior al tamaño microestructural característico del material, $\bar{\alpha} \gg \bar{a}_0$, ésta reduce a la conocida expresión obtenida por Smith y Miller [10],

$$\tau_{FL}^N \approx \tau_{FL} \sqrt{\frac{\bar{a}_0}{\bar{\alpha}}} = \frac{K_{II\infty}}{Y\sqrt{\pi\bar{\alpha}}} \quad (9)$$

Y en el polo opuesto, si la entalla es muy pequeña en relación con la microestructura del material, $\bar{\alpha} \ll 1$, por ejemplo, microdefectos del material, predice una escasa influencia en la resistencia a fatiga del material, $\tau_{FL}^N \approx \tau_{FL}$, en perfecto acuerdo con la evidencia experimental.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con el modelo presentado, el fallo por fatiga de un componente entallado puede ser descrito a partir de un único hecho físico: la capacidad de la grieta para vencer las sucesivas barreras microestructurales del material. Dicho proceso involucra dos factores: el nivel y evolución de las tensiones que asisten a la grieta al enfrentarse con cada una de las barreras y la resistencia efectiva interpuesta por las mismas, inicialmente creciente y tendiendo a estabilizarse cuando la grieta es suficientemente grande. La contribución relativa de ambos efectos permite establecer las condiciones

umbrales para que una grieta pueda propagarse o no hasta el fallo.

Así, el límite de iniciación es interpretado como la mínima tensión aplicada para que una grieta supere la primera barrera microestructural en el fondo de la entalla. El límite de fatiga, en cambio, se identifica con la mínima tensión requerida para que la grieta pueda superar todas las barreras existentes en el material. Cualquier tensión aplicada inferior a este último, provocará que la grieta siempre encuentre una barrera suficientemente robusta capaz de contener su avance, conduciendo por tanto a la aparición de una grieta no-propagante.

5. REFERENCIAS

- [1] Frost, N. E. and Dugdale, D. S., "Fatigue Tests on Notched Mild Steel Plates with Measurement of Fatigue Cracks", *J. Mech. Phys. Solids*, 5, 182-192 (1957).
- [2] El Haddad, M. H., Topper, T. H. and Smith, K. N., "Prediction of Non Propagating Cracks", *Engng. Fract. Mech.*, 11, 573-584 (1979).
- [3] Tanaka, K. and Nakai, Y., "Prediction of Fatigue Threshold of Notched Components", *ASME J. Engng. Mater. Tech.*, 106, 192-199 (1984).
- [4] Miller, K.J., "Material Science Perspective of Metal Fatigue Resistance", *Material Science and Technology*, 9, 453-462 (1993).
- [5] Navarro, A. y de los Rios, E.R., *Proc. R. Soc. Lond. A-437*, 375-390 (1992).
- [6] Kitagawa H. and Takahashi S., "Application of Fracture Mechanics to Very Small Cracks", *Int. Conf. Mech. Behaviour of Materials (ICM2)*, American Society of Metals, 627-631 (1976).
- [7] Vallellano C., "Crecimiento de Grietas Pequeñas por Fatiga en Componentes con Concentradores de Tensión", Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla (1999).
- [8] Lukas, P. and Kunz, L., "Effect of Mean Stress on Short Crack Threshold, in Short Cracks", *ESIS 13* (K. J. Miller and E. R. de los Rios (eds.)). Mechanical Engineering Publications, London, 265-275 (1992).
- [9] Taylor D. and Knott J.F., "Fatigue Crack Propagation Behaviour of Short Cracks: The Effect of Microstructure", *Fatigue Engng. Mater. Struct.*, 4, 147-155 (1981)
- [10] Smith, R. A. and Miller, K. J., "Prediction of Fatigue Regimes in Notched Components", *Int. J. Mech. Sci.*, 20, 201-206 (1978).
- [11] Cameron A.D. and Smith, R.A., "Upper and Lower Bounds for the Lengths of Non-propagating Cracks", *Int. J. Fatigue*, 3, 9-15 (1987).