ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO EN EL CIERRE EN FATIGA DE LA LONGITUD DE GRIETA

A. Cordero, J. García-Manrique, B. Moreno, J. Zapatero, A. González-Herrera

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación
Universidad de Málaga. E.T.S.I. Industriales, Plaza El Ejido s/n, 29013 Málaga

Resumen. Resulta complejo e impreciso la medición y el estudio experimental de las tensiones de cierre o apertura debido a la dificultad en conocer cuando se produce este fenómeno. Por ello como alternativa se recurre al análisis numérico, siendo una de las mejores opciones el estudio mediante elementos finitos. Un problema de interés en el estudio del crecimiento de grieta en fatiga es la evolución de la grieta desde el estado de nucleación hasta que está completamente desarrollada. Durante esta transformación, de grieta corta a grieta larga, la grieta presenta un comportamiento cualitativamente distinto que indudablemente debe repercutir en los valores de la tensión de cierre. Se analiza en este trabajo la influencia de la longitud de grieta pero extendida a un rango amplio, profundizando en los resultados obtenidos en trabajos previos donde se desestimó la influencia de la longitud de grieta en el rango de grietas largas. Para ello se va a modelar un tipo de probeta denominada CCT en las cuales según la relación *a/w* con la que estemos trabajando, podemos considerar que estamos estudiando grietas pequeñas o grietas grandes.

Abstract. The measurement and experimental study of the fatigue crack closure is a complex and imprecise process because of the difficulty in knowing when the phenomenom occurs. As alternative the numerical analysis is used, being the Finite Element Method one of the more appropriate options in the representation of the problem. An interesting aspect in the study of crack growth is the crack evolution from nucleation state until final crack size. In this evolution, it has been well established that the behaviour mechanisms of small fatigue cracks are fundamentally different from those of the long cracks. This so-called "anomalous" behaviour must have effects on crack closure levels. The objective of this study is to analyse in detail crack lenght influence, extending the results obtained in previous studies in which crack lenght influence was disapproved in long cracks. The analysis was made on a CCT specimen, so that depending on diverse *a/w* ratios modelled, it can be considered that we study short or long cracks.

1. INTRODUCCIÓN

La estimación de las tensiones de cierre o apertura de grieta resulta de gran importancia para la estimación correcta de su vida a fatiga. La medición y el estudio experimental es un proceso complejo e impreciso que repercute en una apreciable variabilidad en los resultados obtenidos en función de los procedimientos empleados. Por ello como alternativa se recure al análisis numérico, siendo el Método de los Elementos Finitos una de las opciones que mayor precisión puede aportar en la representación del problema del cierre de grieta en fatiga [1-3].

Un parámetro que puede influir en el valor de las tensiones de apertura y cierre es la longitud de grieta. En la evolución de grieta corta a grieta larga se produce un cambio de comportamiento, a nivel de deformaciones y tensiones, cuya repercusión en el punto de apertura o cierre puede ser importante ya que está fundamentalmente influenciada por la estela plástica generada.

En este artículo se presentan los resultados del estudio del efecto que distintas longitudes de grieta tienen en el fenómeno del cierre por medio de la simulación mediante modelos de elementos finitos del crecimiento de la grieta, tanto en el propio valor de las tensiones de apertura y cierre como en la caracterización de la zona plastificada.

Se analizan, tanto en tensión plana como en deformación plana, modelos con longitudes de grieta que podemos considerar largas (desde 0.5w) hasta tamaños de grieta que entrarían en la consideración de grietas físicamente cortas (del orden de 0.02w) [4]. El límite mínimo en estudio está marcado por la dificultad numérica de poder simular la estela y por la consideración de que, a partir de ciertos tamaños de grieta, son dominantes en el cierre otro tipo de aspectos tales como el mecanismo de cierre por rugosidades o asperezas y la propia microestructura del material, aspectos no tenidos en cuenta en el modelo y que es necesario evaluar en la discusión de los resultados.

Se parte de una metodología desarrollada en trabajos anteriores con probetas tipo CT (compact tension). Este tipo de probetas no nos permite el estudio de grietas pequeñas por lo que se adaptan los procedimientos de trabajo al análisis de probetas CCT (center crack

tension). Esta geometría añade, para el caso de grietas pequeñas, nuevos problemas de convergencia numérica que se unen al ya de por si costoso proceso de modelización del crecimiento de grieta en fatiga.

En el trabajo se describe brevemente la metodología empleada y su justificación, haciendo especial hincapié en los aspectos que afectan a la modelización del comportamiento de grietas pequeñas. A partir de ahí se muestran y discuten los resultados obtenidos tanto en términos de tensiones de apertura o cierre como en la propia caracterización de la estela plástica cuyo tamaño (radio plástico) y forma se ve influenciada de manera muy directa por la longitud de grieta.

2. METODOLOGÍA EMPLEADA

En este apartado haremos un breve repaso de los principales aspectos referentes al modelado de un problema de fatiga. A partir de referencias y con la propia experiencia adquirida por los autores se ha establecido una metodología específica [5-9].

El primer aspecto clave es el tamaño de elemento en la zona en torno al vértice de grieta. Si pretendemos captar el fenómeno de plastificación que se produce en el borde de grieta nos vemos obligados a mallar esta zona con un tamaño de elemento muy pequeño y realizar una transición violenta desde esta zona hasta las más alejadas. Hemos seguido la recomendación obtenida en trabajos previos: tomando como referencia el radio plástico de Dugdale, éste lo hemos mallado en un número de elementos lineales igual a 30.

Por otro lado, el proceso de carga real no es posible modelarlo de manera completa. Se han simulado ciclos de carga constante con avance de grieta. Para ello hemos supuesto una carga máxima fija K_{max}=10Mpa·$m^{1/2}$ y se ha estudiado la influencia de la relación de tensiones R, con valores de 0.3 y 0.1 que consideramos los más representativos. La grieta se hace avanzar un elemento en cada ciclo de carga hasta alcanzar el valor de longitud final de grieta deseado. Se libera un nodo cada vez que se alcanza la carga máxima y se añade un ciclo adicional con carga constante para estabilizar las nuevas condiciones de contorno (figura 1).

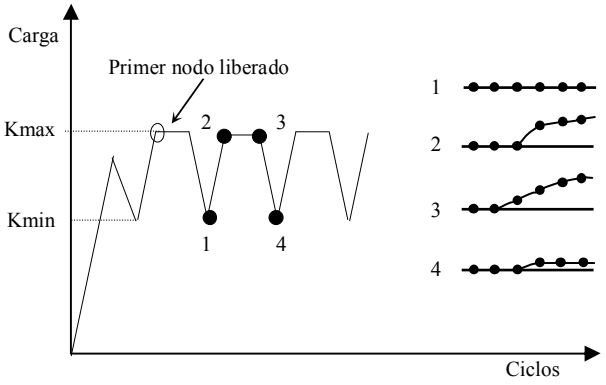


Fig. 1. Proceso de aplicación de los ciclos de carga.

Para la determinación de la tensión de apertura (o cierre) se ha considerado que la grieta abre cuando el vértice de grieta pasa de compresión a tracción (K_{tt}). No se presentarán los resultados obtenidos con el criterio de contacto del último nodo (K_{nc}) debido a la sensibilidad de este criterio ante los cambios en el modelado, ya que será necesario realizar un mallado de la probeta distinto para cada longitud de grieta estudiada. Se ha demostrado con anterioridad la convergencia de los dos criterios mencionados [5].

Finalmente indicar que el avance total de grieta que se ha simulado con objeto de poder considerar que su efecto es equivalente al de la estela completa (que no es posible simular), se ha ajustado acorde con las conclusiones obtenidas en trabajos previos [6].

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Como ya hemos indicado se ha modelado un tipo de probeta denominada CCT. Modelaremos estas probetas de forma que según la relación *a*/w con la que estemos trabajando podemos considerar que estamos estudiando grietas pequeñas o grietas grandes.

Dada la doble simetría de la probeta, se modela únicamente una cuarta parte de la misma, sobre la que actúan las correspondientes solicitaciones. Esto provoca que el modelo esté sometido a una gran cantidad de ligaduras, dificultando ostensiblemente la obtención de una solución de equilibrio. Este fenómeno se hace cada vez más patente a medida que disminuimos la longitud de grieta.

En la figura 2 se muestra el esquema de una probeta CCT.

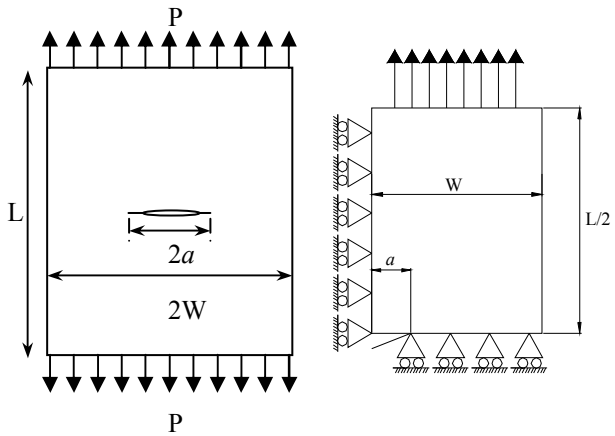


Fig. 2. Esquema de una probeta CCT y modelo sólido.

La influencia de la longitud de grieta final en el modelado es doble. Por un lado, a medida que modelamos grietas de menor tamaño, las condiciones de contorno del problema imponen mayor número de ligaduras a la probeta dificultando ostensiblemente la obtención de una solución de equilibrio por el programa. La utilización de elementos de mallado de

mayor orden nos permitirá aumentar los grados de libertad y relajar así las condiciones.

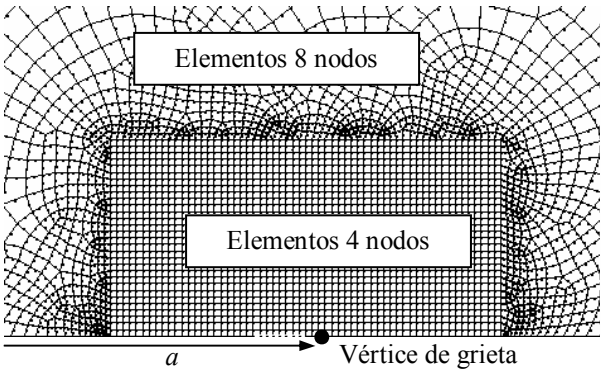


Fig. 3. Orden de interpolación de los elementos usados.

Por otro lado, cuando trabajamos con grietas pequeñas, la superficie de probeta que queda inmediatamente delante del vértice de la grieta se va estrechando, dificultando la transición del mallado entre la región de mallado fino (entorno del vértice final de grieta) a las zonas cuyo mallado es más basto.

Se ha tratado de aislar cada modelo lo más posible de la influencia del mallado que, sin lugar a dudas, es uno de los factores más determinantes en la correcta simulación de la estela plástica. Para ello, se han considerado diferentes geometrías de mallado dependiendo del intervalo de longitud de grieta que estemos estudiando.

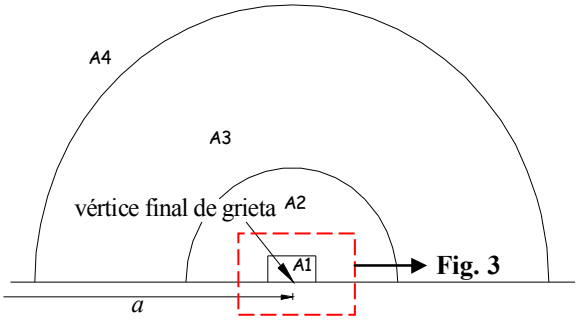


Fig. 4. Geometría 1: mallado de modelos con *a/w* entre 0.5 y 0.2.

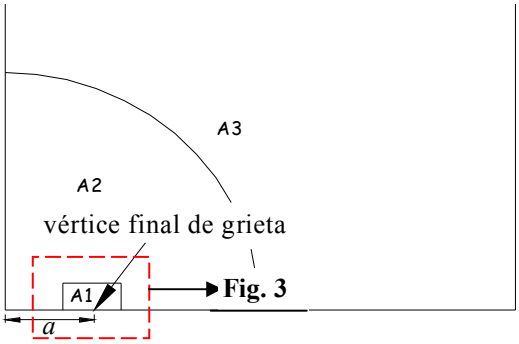


Fig. 5. Geometría 2: mallado de modelos con *a/w* entre 0.15 y 0.03.

Para longitudes de grieta con *a/w*<0.03 se ha ampliado la superficie que abarca el área A1 hasta el mismo origen de coordenadas y se ha mallado dicho área con elementos de tamaño uniforme (figura 6).

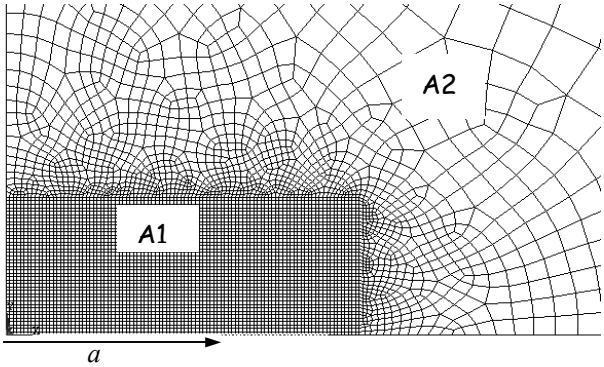


Fig. 6. Geometría 3: mallado de modelos con *a/w*<0.03

El modelo de comportamiento plástico del material es un aspecto de suma importancia. En nuestro caso se ha usado un modelo con un nivel de endurecimiento muy pequeño, H/E=0.003, para una aleación de aluminio Al-6082-T6 con E= 74 Gpa, módulo de Poisson 0.33 y límite elástico 300 Mpa. Con esto perseguimos mejorar los problemas de convergencia y reducir las distorsiones que surgen cuando consideramos modelos elasto-plástico perfectos.

4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA GRIETAS LARGAS

Con el objetivo de obtener resultados lo más precisos posible de la influencia del tamaño de grieta, se ha hecho un barrido desde valores de *a/w* de 0.5 hasta valores próximos a 0.02. Es importante señalar que por debajo de este valor entraríamos en el campo de las grietas microestructurales que no son objeto de estudio debido a la imposibilidad de tomar en consideración (a través de modelos numéricos) importantes efectos tales como barreras microestructurales o asperezas en la superficie.

Los resultados obtenidos son muchos, pero vamos a centrarnos en los que tienen mayor interés, las tensiones de apertura de la grieta en el último ciclo de carga K_{ttop} y las tensiones de cierre $K_{ttcl.}$ En la figuras 7 y 8 se han representado los valores de estas tensiones adimensionalizadas por la carga máxima (K_{max}) en función de *a/w* para el caso de tensión plana y deformación plana respectivamente, con R=0.1 y 0.3.

El aspecto más característico en tensión plana es que las tensiones de apertura (K_{ttop}) presentan una ligerísima tendencia descendente a medida que modelamos grietas de menor longitud (diferencias en torno al 3-4% entre los valores extremos) lo cual dado el margen de error con el que trabajamos, pueden considerarse despreciables. Las tensiones de cierre K_{ttcl} se mantienen prácticamente constantes.

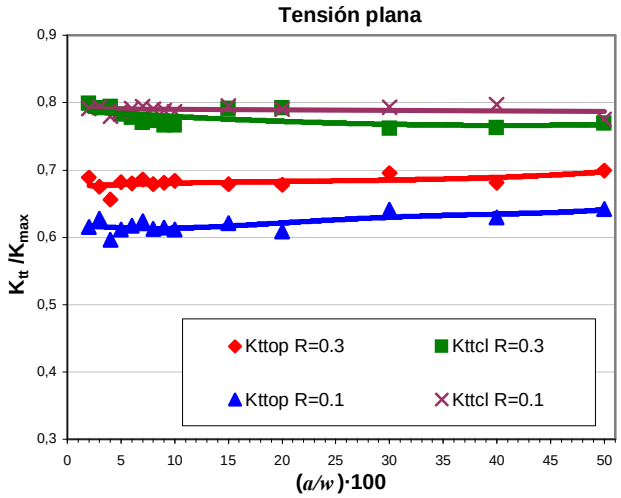


Fig. 7. K_{tt}/K_{max} frente a *a/w* en tensión plana.

En el caso de deformación plana existe una tendencia alcista de las tensiones de apertura y cierre a medida que se modelan grietas de menor longitud.

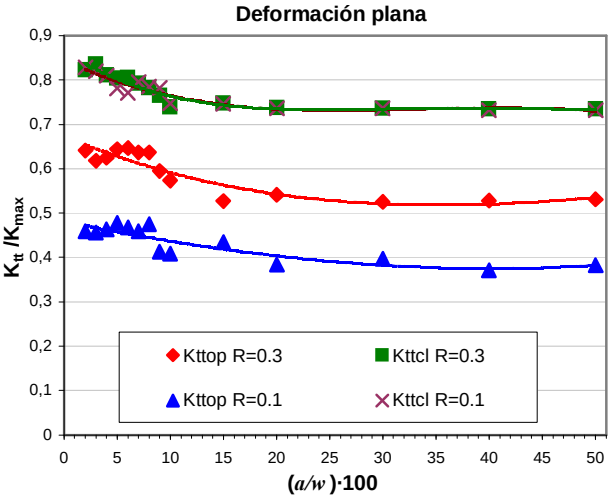


Fig. 8. K_{tt}/K_{max} frente a *a/w* en deformación plana.

Por último, a partir de los datos obtenidos, lo que parece claro es que las tensiones de cierre son menos sensibles a las variaciones en la relación de tensiones R, tanto en tensión plana como en deformación plana. No obstante, las tensiones de apertura están muy influenciadas por dicho parámetro, presentando variaciones importantes para una misma longitud de grieta estudiada. En la figura se aprecia claramente como las curvas correspondientes a las tensiones de apertura llevan una tendencia prácticamente paralela, con una diferencia aproximada de un 15% de K_{max}.

Otro aspecto de interés es el campo de deformaciones plásticas en la descarga que nos da una visión muy clara de la estela plástica dejada a su paso por la grieta al crecer. Son ilustrativas las diferencias entre tensión plana y deformación plana (figuras 9 y 10). En estas figuras se representa el gradiente de deformaciones plásticas en dirección transversal al de avance de grieta.

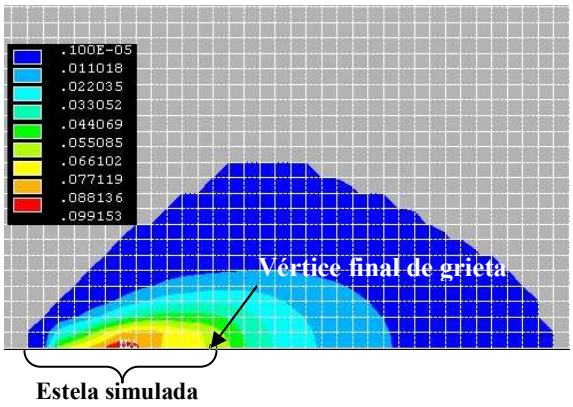


Fig. 9. Estela plástica en tensión plana. *a/w*=0.5, R=0.3, K=10Mpa·m$^{1/2}$.

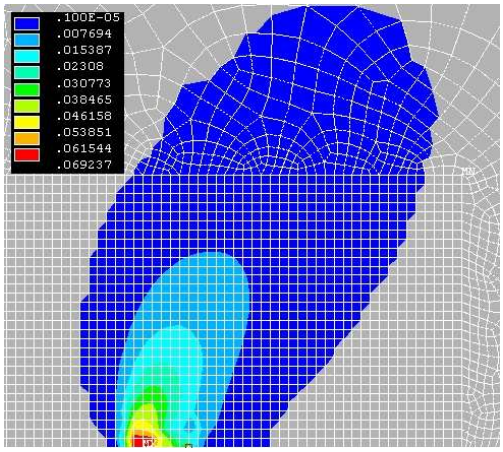


Fig. 10. Estela plástica en deformación plana. *a/w*=0.5, R=0.3, K=10Mpa·m$^{1/2}$.

Se ha caracterizado igualmente la estela plástica cuyo tamaño (radio plástico) y forma se ve influenciada de manera muy directa por la longitud de grieta, tal y como se puede ver en la figura 12.

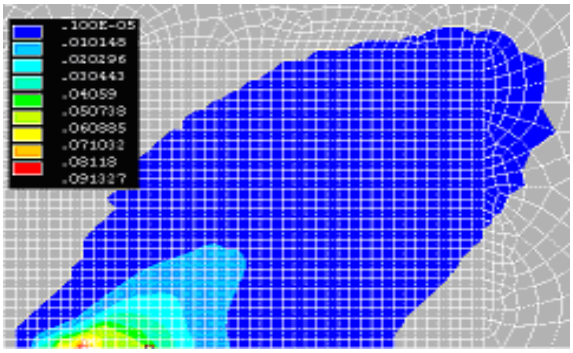


Fig. 11. Estela plástica en tensión plana. *a/w*=0.04, R=0.3, K=10Mpa·m$^{1/2}$.

A medida que el tamaño de la grieta es más pequeño la superficie de la estela plástica aumenta, provocando un alargamiento de la misma en la dirección de crecimiento de la grieta (figura 11).

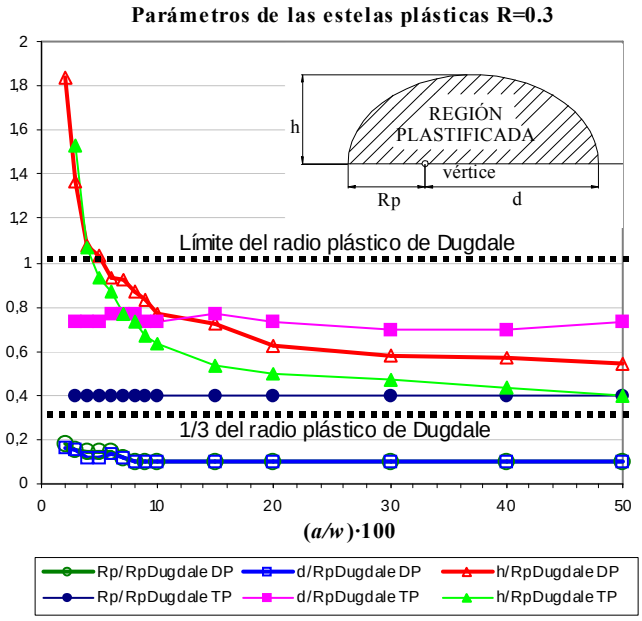


Fig. 12. Caracterización de la estela plástica en tensión plana y deformación plana. R=0.3.

Como vemos, la estimación de considerar, en deformación plana, el radio plástico como la tercera parte del radio plástico de Dugdale es más que suficiente para estimar las plastificaciones que se producen en la línea de avance de la grieta.

5. RESULTADOS OBTENIDOS PARA GRIETAS CORTAS

Hasta el momento se han estudiado regímenes del parámetro *a/w* correspondientes a grietas largas y a grietas físicamente cortas (se hicieron cálculos con grietas desde 12.5 mm a 0.5 mm). Son dos los mecanismos de cierre prematuro de estas grietas, cierre por asperezas y cierre por plasticidad. En este estudio se trataba de estudiar uno de los mecanismos causantes del cierre prematuro de estas grietas, el cierre inducido por plasticidad, y por tanto, no se han tenido en consideración importantes efectos tales como el cierre por rugosidad, o el hecho de que se propagan en niveles de tensión por debajo del umbral de tensiones de las grietas largas.

Para constatar los resultados, el siguiente paso fue realizar un barrido partiendo de un defecto inicial de longitud a_0=0.25mm (*a/w*=0.01) hasta el *a/w*=0.025. Obtuvimos así dos soluciones para una misma relación *a/w*=0.02, pero por dos metodologías diferentes. Con ello, pretendíamos validar la metodología usada hasta el momento para un rango de grietas pequeñas y acotar el error cometido. Hay que indicar que debido al pequeño tamaño de las grietas simuladas se han producido reiterados problemas de convergencia de los resultados.

El primer aspecto clave es el tamaño de elemento en el borde de la grieta , que fijamos finalmente dividiendo el radio plástico de Dugdale por 40 elementos. Otro aspecto importante para reducir el efecto de las grandes plastificaciones iniciales debido a que el material inicialmente está virgen, es aplicar la carga de forma gradual

Por tanto, partiendo de un tamaño de defecto inicial a_0 aplicaremos un valor de K=1 Mpa·m$^{1/2}$ para el primer ciclo de carga, e iremos aumentándolo sucesivamente en cada ciclo de carga un valor igual al 0.05K_{max} hasta llegar al valor de la carga K_{max}=10 Mpa·m$^{1/2}$ (la relación de tensiones R=0.3 se ha mantenido constante). Cada cinco nodos liberados se tomarán medidas de las tensiones de apertura y cierre con la finalidad de evaluar la evolución de las mismas.

En la figura 13 se ha representado la evolución de las tensiones de apertura y cierre que hemos obtenido tras simular el barrido. Igualmente se han graficado los modelos correspondientes a *a/w* igual al 0.02 y 0.03, con la idea de poder compararlos.

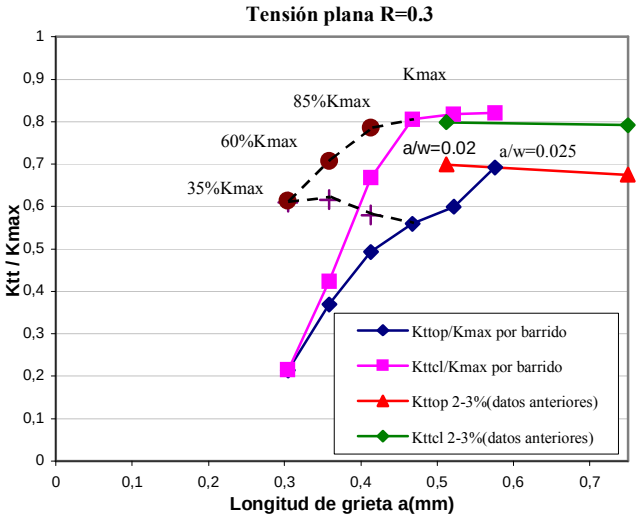


Fig. 13. K_{tt}/K_{max} para un barrido desde *a/w*=0.01 al 0.025, R=0.3, K=10 Mpa·m$^{1/2}$.

Se observa que a partir del momento en el que se alcanza la carga máxima las tensiones de apertura comienzan a crecer gradualmente, alcanzando en el último punto de medición un valor K_{ttop}/K_{max}= 0.629 para una relación *a/w*=0.025. Si lo hubiéramos calculado a partir de la recta de regresión que obtuvimos de los modelos ya estudiados (grietas de mayor longitud), la tensión de apertura sería de K_{ttop}/K_{max}= 0.612, valores, como podemos ver, muy parecidos. Esto parece confirmar que la metodología que hemos venido aplicando es adecuada para la estimación de las tensiones de apertura y cierre en grietas pequeñas, tanto en tensión plana como en deformación plana. Sin embargo, si queremos obtener una representación más adecuada de la estela plástica, parece que sería más conveniente realizar un barrido como el que acabamos de exponer.

6. CONCLUSIONES

Como conclusión principal habría que destacar que en tensión plana y en el rango de valores de *a/*w estudiados existe una independencia de las tensiones de cierre y apertura con la longitud de grieta. Esto viene a corroborar una de las observaciones hechas en trabajos previos [2] y que ahora se confirma y se amplia notablemente. Para R=0.3 las tensiones de apertura K_{ttop} se mantienen en un valor constante (≈69% de K_{max}) y las de cierre se mantienen también invariantes en torno a un 76% de K_{max}. No obstante para R=0.1, la apertura se produce para niveles menores de carga (aproximadamente ≈6%). En cuanto al cierre, las tensiones K_{ttcl} se mueven en un margen muy estrecho de valores tanto para los datos de R=0.1 y R=0.3, observación que está en consonancia con los resultados obtenidos en trabajos previos

En el caso de deformación plana tanto las tensiones de apertura como las de cierre se mantienen prácticamente constantes para valores de *a/w* mayores que 0.15. (K_{ttop}≈52.5%, K_{ttcl}≈73.5% para R=0.3). No obstante para R=0.1, la apertura se produce para niveles menores de carga (aproximadamente ≈15%). Para longitudes de grieta menores se aprecia una clara tendencia alcista en ambas tensiones a medida que modelamos grietas de menor longitud.

Se ha analizado la influencia del parámetro R observándose que su influencia es mayor aún en deformación plana que en tensión plana.

Se ha hecho un estudio de los parámetros de la estela plástica que nos puede ayudar a afinar más aún el mallado de los modelos.

Con los resultados obtenidos de estos análisis tenemos una visión general de la influencia de la longitud de grieta en el comportamiento del cierre en tensión y en deformación plana. No obstante, hay que tener en cuenta las limitaciones de este estudio en cuanto a la imposibilidad de modelar correctamente el comportamiento de las grietas cortas por dos motivos fundamentales: por un lado, no se toman en consideración importantes efectos tales como barreras microestructurales o asperezas en la superficie, y por otro, la metodología que estamos aplicando tampoco permite diferenciar el comportamiento de estas grietas para valores de carga por debajo del valor umbral de crecimiento de grietas largas. Una disminución en el valor de ΔK se refleja únicamente (para la simulación del problema) en un descenso del valor del tamaño mínimo de elemento de mallado, ya que recordemos que el radio plástico de Dugdale es una función directa del cuadrado de ΔK. Por estos motivos, los valores que se obtienen en el modelado de grietas de esta longitud están lejos de los obtenidos con ensayos experimentales.

7. REFERENCIAS

[1] Newman, J.C., "Finite-element análisis of fatigue crack propagation including the effects of crack closure", Ph. D. thesis, VPI&SU, Blacksburg, VA (1974).

[2] McClung, R.C. y Sehitoglu, H., "On the finite-element analysis of fatigue crack closure", (partes 1 y 2), Engineering Fracture of Mechanics, 33, pp. 237-272 (1989).

[3] Wei, L.W., James, M.N., "A study of fatigue crack closure in polycarbonate CT specimens", Engineering Fracture of Mechanics, 66, pp. 223-242 (2000).

[4] Miller, K.J., De los Rios, E.R., "Short fatigue cracks" ESIS (1992).

[5] González Herrera, A., García Vallejo, D., Moreno B. y Zapatero J. "Análisis del tamaño de elemento mínimo para la determinación de la tensión de cierre en fatiga mediante elementos finitos". XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Cádiz (2002).

[6] González Herrera, A., García Vallejo, D., Melgar , A., Moreno B. y Zapatero J. "Simulación de la estela plástica mediante elementos finitos", V Congreso de Métodos Numéricos en la Ingeniería, 118,Madrid (2002).

[7] González Herrera, A., Zapatero, J., Moreno, B. y Pascual, J. "Modelado del cierre de grieta en fatiga mediante elementos finitos" Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 18, 438-445, (2001).

[8] González Herrera, A., García Vallejo, D., Melgar , A., Moreno B. y Zapatero J. "Obtención de la tensión de cierre en fatiga mediante el método de los elementos finitos". Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 19, 445-450 (2002).

[9] Cordero, A., "Análisis numérico de las tensiones de cierre en fatiga en grietas cortas y larga" PFC, ETSII, Universidad de Málaga (2002).