CÁLCULO DE LOS FACTORES DE INTENSIDAD DE TENSIONES EN FISURAS INICIADAS EN LOS BORDES DE TALADROS DE CHAPAS SOMETIDAS A TRACCIÓN

Aragón A. [(1)], Alegre J.M. [(1)], Gutiérrez-Solana F. [(2)]

[(1)] Area de Mecánica de Medios Continuos y TE. Universidad de Burgos.
[(2)] Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Universidad de Cantabria.

Resumen. Para estudiar el comportamiento en fatiga de chapas punzonadas y taladradas es necesario conocer los factores de intensidad de tensiones (FIT) de las diferentes formas y tamaños de fisura que se originan en esta geometría a lo largo del número de ciclos. Los resultados disponibles en la literatura para los FIT en chapas taladradas suponen una forma de cuarto de elipse en el frente de la fisura, y consideran únicamente los casos de fisuras simétricas (iniciadas simultáneamente a ambos lados del taladro) o una fisura única iniciada solo en uno de los bordes. En numerosos ensayos de fatiga desarrollados se ha comprobado que ni la forma elíptica ni la simetría se cumplen en la mayoría de los ensayos, lo que puede conducir a resultados erróneos en los posteriores estudios y previsiones de vida en fatiga. En el presente artículo se presenta la metodología y resultados de los FIT obtenidos para este tipo de geometría considerando diferentes formas de fisura. Se ha calculado el factor de intensidad de tensiones en varios puntos del frente de fisura lo que permitirá estimar la evolución de su forma con el número de ciclos. Como validación de la metodología y resultados obtenidos, se han realizado también la simulación de fisuras elípticas que han sido comparadas con los resultados disponibles en la literatura, obteniendo muy buenos resultados.

Abstract. In order to analyse the fatigue behaviour of punched and drilled plates it is necessary to know the stress intensity factors (FIT) for the different cracks fronts and cracks sizes that are originated in this geometry throughout the number of cycles. The results available in literature for the FIT for drilled plates are based on a quarter-elliptical crack front, and consider only symmetrical cracks (initiated simultaneously to both sides of the drill) or a single crack initiated in one side. A number of fatigue tests developed shown that the quarter-elliptical crack front and symmetric cracks are not real for the majority of the tests. This can lead to erroneous results in the later studies of fatigue life. This article shown the methodology and results for the FIT obtained for this geometry, considering different crack fronts. The stress intensity factor for several crack front points has calculated which will allow to consider the crack front evolution with the number of cycles. In order to validate the methodology and the obtained results, simulation of elliptical cracks has been made and compared with the results available in Literature, obtaining very good results.

1. INTRODUCCIÓN

Para analizar y predecir el comportamiento en fatiga de chapas punzonadas o taladradas sometidas a esfuerzos de tracción es necesario conocer los factores de intensidad de tensiones (FIT) de las diferentes formas y tamaños de fisura que se presenta en esta geometría durante el proceso de crecimiento de la fisura con el número de ciclos.

Durante las últimas dos décadas se han desarrollado numerosos trabajos para evaluar el FIT en este tipo de geometría, no solo en los extremos de la fisura sino en todos los puntos del frente de la misma [1,4]. Los métodos utilizados han sido principalmente analíticos, elementos finitos, funciones de peso y otras experimentales como fotoelasticidad o ensayos de fatiga.

Sin embargo, los resultados disponibles en la literatura presentan el inconveniente de que la mayoría suponen una forma de cuarto de elipse en el frente de la fisura, bien sea para el caso de fisuras simétricas, iniciadas simultáneamente a ambos lados del taladro, o para una fisura única iniciada en uno de los bordes.

Los numerosos ensayos experimentales desarrollados para este tipo de geometría, sometida a esfuerzos de tracción, muestran que ni la forma elíptica ni la simetría se cumplen en la mayoría de los ensayos, lo que puede conducir a resultados erróneos en los posteriores estudios y previsiones de vida en fatiga utilizando los FIT de fisuras con forma elíptica [5,6].

El presente trabajo pretende establecer una metodología y recomendaciones para el cálculo de los FIT en todos los puntos del frente de fisura con una forma cualquiera. Una vez conocido el FIT de todo el frente de fisura se podrá determinar la forma que adoptará el frente de la fisura transcurrido un determinado número de ciclos. Se presentan también una serie de consideraciones acerca de esta evolución y

su tendencia a alcanzar una forma constante independientemente de la forma del defecto inicial.

Para validar la metodología desarrollada y el grado de fiabilidad de los análisis efectuados se ha comparado con la solución de Newman y Raju [1]. De dicha validación se han extraído importantes conclusiones acerca del tipo de elementos a utilizar, número y tamaño de los mismos, o recomendaciones acerca del mallado de transición.

2. GEOMETRIA Y MATERIAL

La geometría utilizada en los análisis del presente trabajo se presenta en la Figura 1, junto con la denominación de las diferentes dimensiones y la referencia para localizar un punto en el frente de fisura.

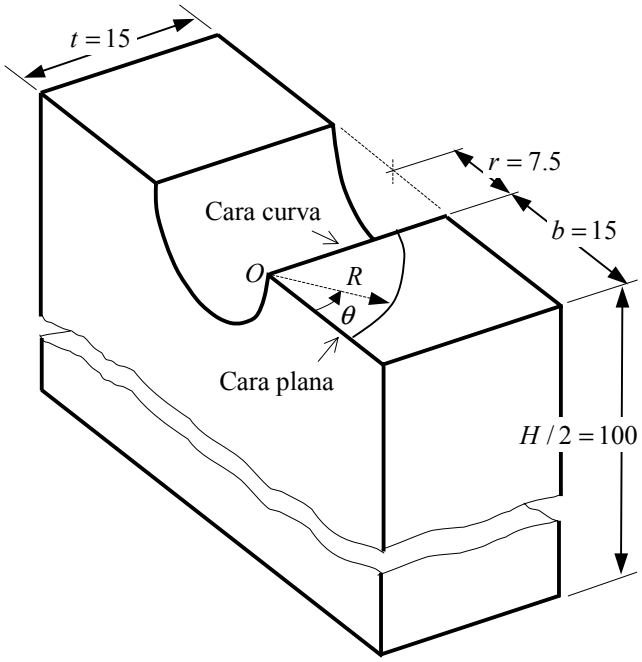


Fig. 1. Geometría y dimensiones de las probetas utilizadas en la simulación numérica (mm).

Para todos los análisis efectuados en este trabajo se ha considerado un comportamiento elástico lineal del material con un módulo de elasticidad $E = 200\ GPa$ y un coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$.

Dado que se va a realizar un análisis sobre la base de la Mecánica de Fractura Elástico Lineal, se ha considerado una tensión de valor unidad en los extremos de la chapa ($\sigma = 1$ MPa). Para cualquier otro valor de tensión, el FIT se obtiene multiplicando el correspondiente a la tensión unidad por el valor de la tensión deseado. Para las simulaciones de la propagación se ha usado la Ley de Paris, para la cual el crecimiento de fisura es $da/dN = C \cdot (\Delta K_I)^m$ con $C = 2 \cdot 10^{-9}$ y $m = 3.1$ para unidades de MPa y mm.

3. OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

Los ensayos experimentales efectuados para conocer el comportamiento en fatiga de este tipo de geometría muestran una serie de inconvenientes que impiden el uso de las soluciones analíticas del FIT, basadas en la suposición de frente de fisura cuarto-eliptica, y que hacen necesaria una simulación numérica.

Estos inconvenientes, resumidos en la Figura 2, son básicamente tres: (a) la propagación de las fisuras no es simétrica en ambos lados del taladro, dado que cada una de ellas puede iniciarse a partir de un tamaño diferente de defecto, (b) para las probetas punzonadas la iniciación no se produce en el centro del espesor, sino en la zona de transición entre el corte y el desgarro, y (3) el crecimiento de la fisura no presenta una forma cuarto-elíptica sino que en su desarrollo adopta una forma diferente.

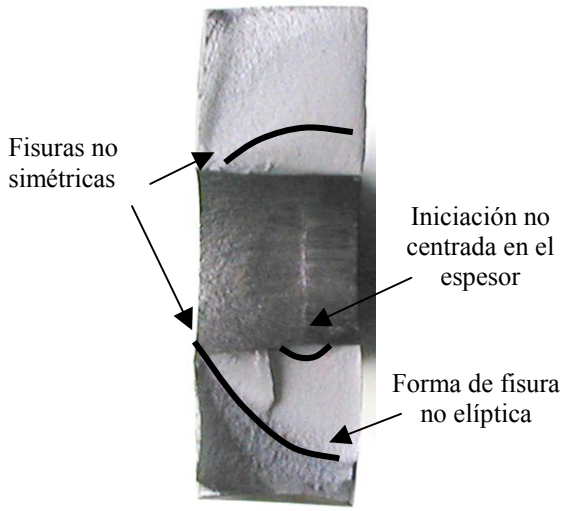


Fig 2. Observaciones experimentales de la propagación de fisuras en probetas punzonadas durante la fatiga.

En consecuencia, el análisis efectuado debe permitir simular fisuras iniciadas en cualquier punto de la cara curva o cara plana, y para cualquier forma que presente el frente de fisura. El hecho de que las fisuras a ambos lados del taladro no sean simétricas tiene poca influencia en la posterior simulación de fatiga, dado que el mayor número de ciclos se emplea en las fases iniciales de crecimiento, para las cuales las fisuras son pequeñas y no se van a ver influidas por otras posibles pequeñas fisuras de la cara opuesta del taladro.

4. TECNICAS NUMERICAS PARA OBTENER EL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES

Las técnicas de elementos finitos se han impuesto como una excelente herramienta para la evaluación de estructuras fisuradas. Actualmente se está avanzando en el desarrollo de métodos adecuados para obtener el factor de intensidad de tensiones de estructuras con

fisuras tridimensionales y en todos los puntos del frente de la fisura. Entre los métodos numéricos más utilizados para obtener el factor de intensidad de tensiones tenemos los siguientes

Métodos directos

En la década de los años 70, Barsoum [7] o Hensell y Shaw [8] descubrieron independientemente que desplazando los nodos situados en la mitad de los lados adyacentes a la punta de la fisura hasta una distancia de un cuarto de la misma, se puede reproducir la singularidad de tensiones que aparece en el frente de una fisura. A este tipo de elemento, con el nodo intermedio situado a un cuarto de la punta de la fisura, le denominaremos elemento degenerado (ED).

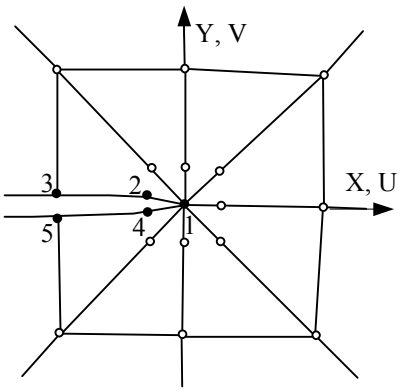


Fig. 3. Elementos degenerados en la punta de una fisura, con los nodos utilizados para evaluar el FIT.

Actualmente se utilizan dos métodos diferentes para obtener el FIT con este tipo de elementos degenerados. Uno de ellos denominado *displacement correlation technique* (DCT) que utiliza los cuatro nodos de los elementos degenerados del plano de la fisura, tal y como se presenta en la Figura 3. La técnica utiliza las diferencias de los desplazamientos de los nodos adyacentes para evaluar el factor de intensidad de tensiones para deformación plana o fisuras en tres dimensiones:

$$K_I = \frac{E}{8(1-\nu^2)}\sqrt{\frac{2\pi}{L}}\left[4(\mathrm{V}_2 - \mathrm{V}_4) - (\mathrm{V}_3 - \mathrm{V}_5)\right] \qquad (1)$$

donde E es el módulo de elasticidad lineal o módulo de Young, L es la longitud del elemento degenerado (es decir 1-3 o 1-5 de la Figura 3), ν es el coeficiente de Poisson, y V_i representan los desplazamientos perpendiculares al plano de la fisura.

El segundo método directo para determinar el FIT, conocido como *quarter-point displacement method* (QPDM), utiliza solamente el desplazamiento del nodo a un cuarto del elemento degenerado, de tal forma que obtenemos:

$$K_I = \frac{E}{4(1-\nu^2)}\sqrt{\frac{2\pi}{L_{1/4}}}(\mathrm{V}_2 - \mathrm{V}_4) \qquad (2)$$

donde $L_{1/4}$ es la distancia desde el nodo a un cuarto hasta la punta de la fisura, es decir 1-2 o 1-4 en la Figura 3.

Dada la mayor estabilidad en los cálculos, en este trabajo utilizaremos la primera de las técnicas que evalúa el FIT a partir del desplazamiento de los 4 nodos.

Metodos indirectos

Una técnica indirecta ampliamente utilizada consiste en determinar el factor de intensidad de tensiones a partir del cálculo de la tasa de liberación de energía por unidad de avance de fisura, G. Para deformación plana y unidad de espesor, la relación entre K_I y G es

$$G = \frac{(1-\nu^2)}{E} K_I^2 \qquad (3)$$

La integral J es otro método indirecto desarrollado independientemente por Rice [4] y Cherepanov, y puede ser interpretada como una tasa de liberación de energía. El valor de la integral J es teóricamente independiente del camino utilizado para su definición, y describe el campo de tensiones y deformaciones en la punta de una fisura bajo condiciones elastoplásticas. En condiciones elásticas existe una relación entre la integral J y el factor de intensidad de tensiones K, definido para deformación plana como,

$$J = G = \frac{(1-\nu^2)}{E} K_I^2 \qquad (4)$$

Esta relación permite obtener de forma indirecta el factor K factor a partir del cálculo de la integral J.

La integral J puede ser calculada utilizando el método del Crecimiento Virtual de la Fisura (VCE), desarrollado por Parks [5] y Hellen [6], o por integración a lo largo del contorno de la fisura. Para asegurar la independencia del valor de la integral J con el camino de integración es necesario realizar varios caminos para su cálculo.

5. PARAMETROS OPTIMOS DE MALLADO.

Para la simulación numérica efectuada en el presente trabajo se ha utilizado el código de EF Ansys 6.1 [9]. Con el objetivo de poder modelizar cualquier forma del frente de fisura se ha dividido este en diez segmentos (11 nodos), referenciados a partir de su distancia al punto O (R) y del ángulo con la cara plana (θ), tal y como se esquematiza en la Figura 4. De esta forma es

posible considerar cualquier forma que se desee para el frente de fisura.

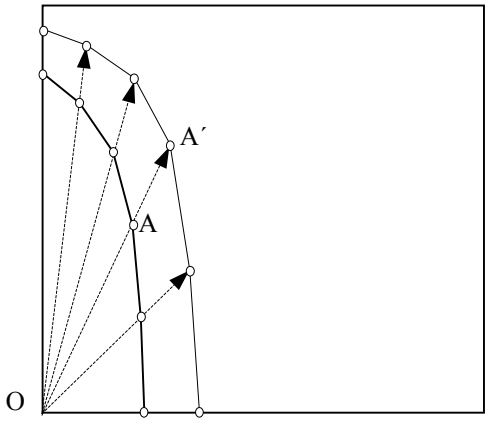


Fig 4. Frente de fisura con una forma cualquiera.

Respecto a la forma de definir el frente de fisura es necesario realizar algunas consideraciones. Para el caso de fisuras en las que su valor en cara plana sea muy diferente de la cara curva, la línea que define el punto de la fisura estará ligeramente inclinada respecto de la perpendicular al frente de fisura, como ocurre con el eje *OA* del esquema de la Figura 4. Esto indica que el factor de intensidad de tensiones calculado no será exactamente el perpendicular a la fisura, sino el correspondiente a un plano *OAz* siendo *z* el eje perpendicular al plano de la fisura. En consecuencia, el posterior crecimiento de la fisura se hará en la dirección del FIT calculado, es decir en la dirección de la línea *OA*, para obtener un crecimiento de la fisura de valor *AA´*.

Debe tenerse en cuenta que para cualquier análisis que se efectúe por EF, en las caras exteriores de la fisura siempre se producirá este efecto, dado que de otra forma sería imposible mallar la geometría. En consecuencia, se ha considerado conveniente, para evitar diferencias entre los FIT de los extremos y del centro efectuar el mismo tipo de análisis en todos los puntos del frente de fisura.

Además, en la mayoría de los frentes de fisura observados experimentalmente este efecto es prácticamente despreciable, dado que no se dan fisuras excesivamente ovaladas. Sin embargo cuando se utilicen los FIT derivados de este análisis será necesario tener en cuenta estas consideraciones.

En el estudio por EF desarrollado se ha tenido en cuenta el posible efecto de los siguientes parámetros: (a) el mallado de transición entre el frente de la fisura y las zonas alejadas de la misma, (b) el tipo de elementos, (c) el tamaño y número de los mismos.

En primer lugar, la transición de mallado se ha efectuado con una relación de crecimiento aproximada de 1.5. Se ha observado que el paso brusco de elementos pequeños a elementos de gran tamaño inducen a errores en el cálculo del factor de intensidad de tensiones. En general, los valores obtenidos con una mala transición dan como resultado valores inferiores del FIT calculado.

En cuanto al segundo parámetro, el mallado, ha sido realizado utilizando elementos "brick" de 8 nodos. Los elementos que definen la punta de la fisura han sido definidos con elementos degenerados de 10 nodos, que aparecen esquematizados en la Figura 5. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de uno de los mallados realizados.

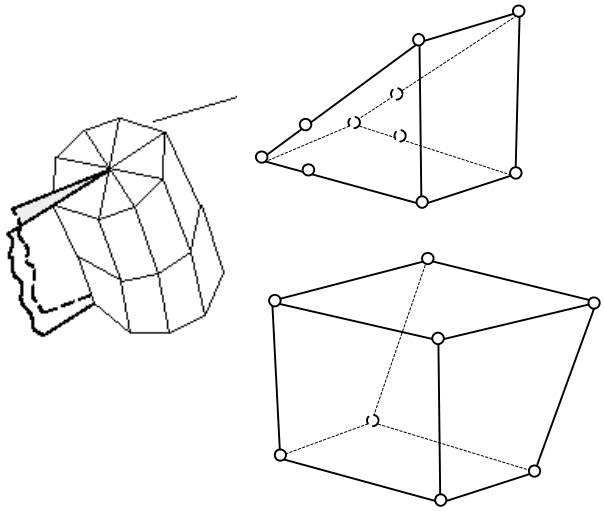


Fig. 5. Elementos utilizados en el análisis por elementos finitos.

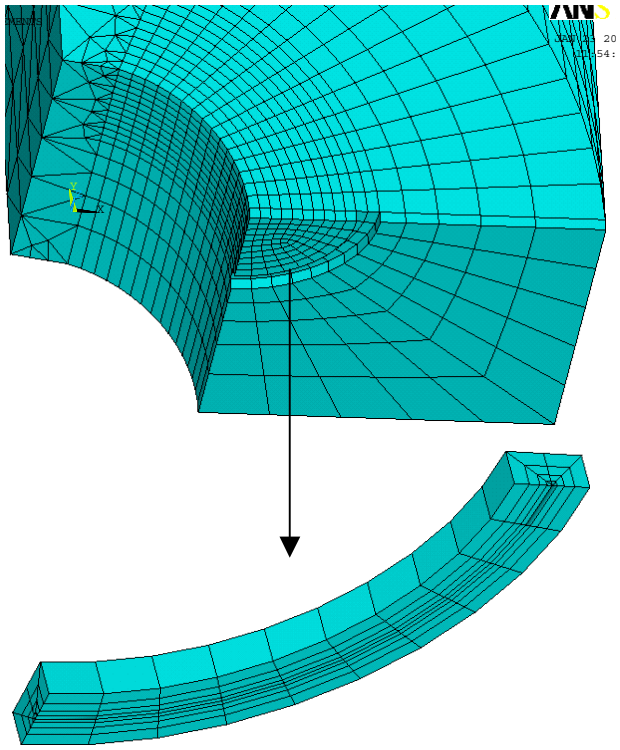


Fig. 6. Mallado de la pieza y del entorno de la fisura con los elementos singulares.

El tamaño de elementos óptimo en la punta de la fisura ha sido elegido de tal forma que se consiga la mayor aproximación con los resultados analíticos disponibles. Un tamaño de elemento en la punta de 1/20 del tamaño de la fisura resulta el más adecuado para no generar un modelo con excesivo número de elementos y obtener una buena aproximación del FIT. Además, el tamaño de la altura del túnel de la fisura es proporcional al tamaño de la misma con el objetivo de abarcar en esta zona la concentración de tensiones y la zona de singularidad.

Para conocer el grado de aproximación de la metodología y resultados obtenidos, es necesario comparar los valores del presente análisis con otras soluciones existentes en la literatura. En la Figura 7 se presenta un ejemplo del grado de aproximación obtenido entre los resultados de Newman-Raju [1] y los resultados del presente trabajo, para dos fisuras cuarto-circular, de 1 mm y de 5 mm de radio respectivamente, cuyo origen esté situado en una de las esquinas del taladro. El ángulo de 0º corresponde a la cara plana, y el de 90º a la cara curva.

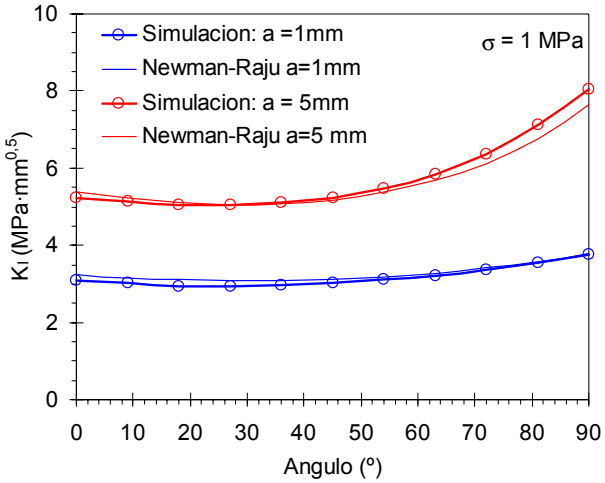


Fig. 7. Comparación del FIT calculado para dos fisuras circulares con los resultados de Newman-Raju [1].

6. FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES PARA UN FRENTE DE FISURA CUALQUIERA.

La parametrización con la que ha sido generada el frente de fisura para esta geometría permite determinar el FIT de cualquier forma que esta presente. Este hecho es fundamental a la hora de simular adecuadamente su evolución a lo largo del crecimiento con el número de ciclos.

La suposición de una forma simplificada para el frente de fisura puede inducir a errores en FIT nada despreciables. Además el error cometido en FIT se eleva por el exponente de la Ley de Paris, con lo que finalmente la estimación del número de ciclos es todavía más errónea (p.e. un error del 10% en el K se convierte en un 33% en el número de ciclos para un exponente m=3)

A modo de ejemplo se presenta en la Figura 8 y 9 este efecto al considerar una forma de fisura elíptica frente a real, y el efecto en el FIT a lo largo del frente. Se puede observar como las diferencias son tan grandes que se obtendrían errores en la estimación del número de ciclos inaceptables.

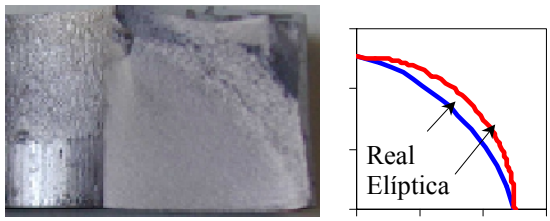


Fig. 8. Frente de fisura real frente a la simplificación elíptica.

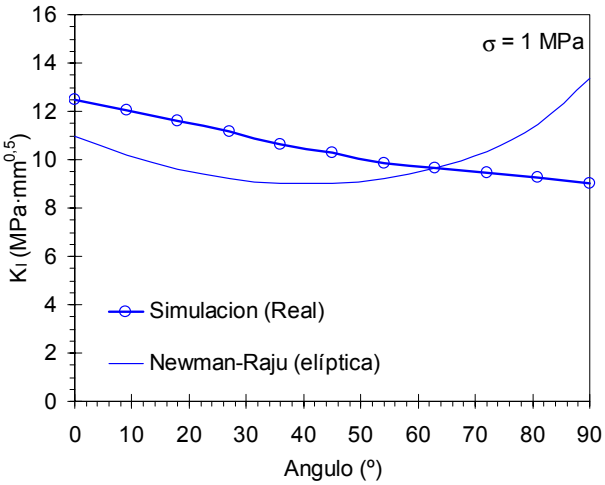


Fig. 9. Comparación de los valores del factor de intensidad de tensiones considerando las dos formas del frente de fisura de la figura 8.

En consecuencia, para realizar un análisis adecuado es necesario utilizar la forma real del frente de fisura, que a lo largo de su crecimiento se irá acomodando proporcionalmente al FIT en cada punto. En la Figura 10 podemos observar como, partiendo de una fisura circular, el mayor FIT de los extremos hace que avancen más que el centro con un FIT menor. Esto hace que para el siguiente paso la fisura de referencia ya no sea circular.

En la Figura 11 se presenta la evolución de la fisura para una forma inicial más irregular. En la Figura 12 los correspondientes factores de intensidad de tensiones. El bajo FIT en el centro del frente comparado con el de los extremos hace que el frente de fisura tienda a equilibrarse hasta encontrar la forma para la cual el FIT se hace prácticamente constante en todo el frente de fisura. En las etapas finales de la propagación, la fisura es tan grande que el efecto de los

límites de la geometría hacen que se pierda el K constante en el frente de fisura.

Además, conviene hacer notar que la forma de equilibrio es una característica propia de cada geometría, como se observa en las Figuras 10 y 11.

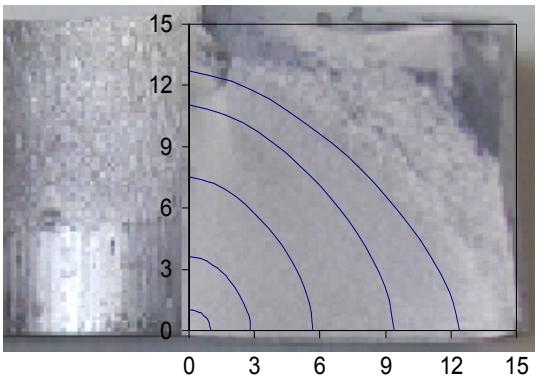


Fig. 10. Evolución del frente de fisura numérico y experimental.

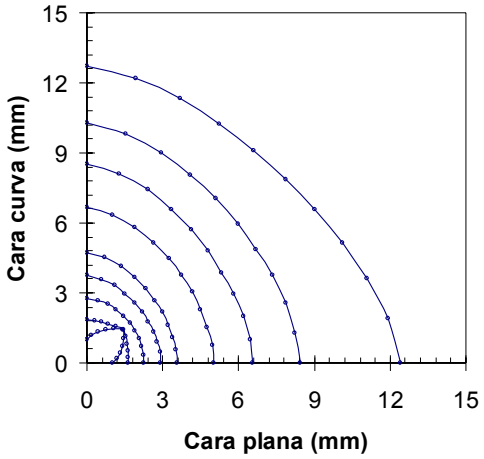


Fig. 11. Evolución del frente de fisura para una fisura inicial con una forma cualquiera.

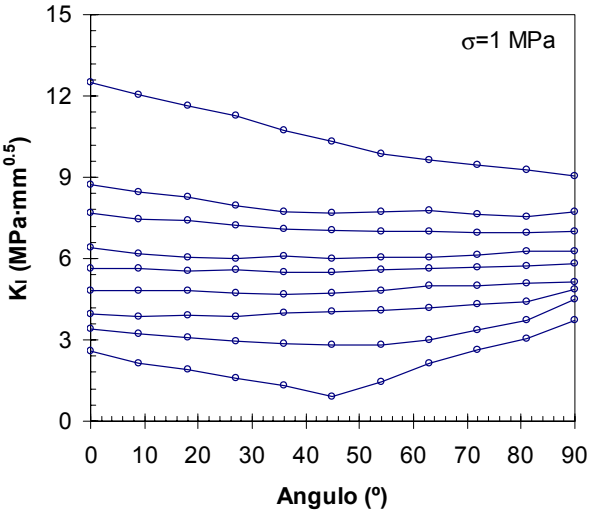


Fig. 12. Evolución del factor de intensidad de tensiones la evolución de fisura de la Figura 10.

7. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se ha efectuado una simulación numérica para obtener el FIT en el frente de fisura de chapas taladradas. Se ha comprobado la sensibilidad del FIT al mallado y tipo de elementos con el que se modele el entorno de la fisura. El uso de elementos singulares en la punta de la fisura es imprescindible para obtener valores de K correctos.

El estudio desarrollado muestra la importancia de determinar el factor de intensidad de tensiones para fisuras 3-D considerando la forma real que adopta la fisura en cada etapa de su crecimiento por fatiga.

La suposición de frentes de fisura circulares o elípticos puede inducir a errores en el FIT, que se ven incrementados por el exponente de la Ley de Paris, hasta alcanzar valores que pueden resultar inaceptables.

Se ha comprobado que la forma de la fisura inicial solo influye en las primeras etapas de crecimiento, hasta que se va equilibrando el FIT en todo el frente, y se alcanza la forma natural de avance. En las etapas finales vuelve a tener influencia las dimensiones finitas de la pieza y se pierde esta tendencia a avanzar con K constante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida por el Proyecto “Criteria Performance for Cold Formed Structural Steels (Coldfoss) a través de la colaboración con el Laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de Cantabria.

REFERENCIAS

[1] Newman Jr J.C., Raju I.S. Computational methods in the mechanics of fracture, vol 2, 1986 chap 9.

[2] Lin X.B., Smith R.A. Eng. Fract. Mech. 62. 1999, pp. 535-553.

[3] Perez R., Grandt Jr A.F., Saff C.R. Surface crack growth: models, experiments and structures, ASTM STP 1060, 1990, pp. 49-62

[4] Grandt Jr AF, Kullgren TE. J Engng Mater Technol 1981;103:171±6.

[5] Shin CS. Int J Fatigue 1991;13:233±40

[6] Lin XB. Numerical simulation of fatigue crack growth. PhD thesis, University of Sheffeld, 1994

[7] Hensell RD, Shaw KG. Int Journal for Num. Meth. In Eng. 1975. pp 495-507.

[8]Barsoum RS. Int J of Fracture. 1974;10. pp603-605

[9] Ansys 6.1. Manual de Referencia