

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DEL PERFIL DE FRENTE DE GRIETA EN LA EVOLUCIÓN DEL ESTADO TENSIONAL A LO LARGO DEL ESPESOR EN PROBETAS CT

D. Camas-Peña ^{1a}, J. García-Manrique ^{1b}, P. López-Crespo ^{1c}, A. González-Herrera ^{1d}

¹ Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación, E.T.S. de Ingenieros Industriales,
Universidad de Málaga, C/ Dr. Ortiz Ramos s/n, 29071 Málaga, España.
E-mail: ^{1a}dcp@uma.es; ^{1b}josegmo@uma.es; ^{1c}plc@uma.es; ^{1d}agh@uma.es

RESUMEN

El presente trabajo es un estudio numérico sobre la evolución del estado tensional a lo largo del espesor de la grieta y la influencia de variables como la carga aplicada, el espesor de la probeta y la curvatura del frente de grieta. El objetivo final es poder determinar la influencia de estos parámetros en el cierre de grieta en fatiga. Para ello se ha modelado por elementos finitos una probeta CT de aluminio en tres dimensiones, realizando una batería de cálculos combinando las distintas variables cuya influencia se desea estudiar. A partir de los resultados obtenidos relativos a la zona plastificada en el entorno del frente de grieta y del estado tensional a lo largo de la misma, se puede concluir que el cierre de grieta se ve afectado por la carga aplicada, desplazándose al interior al aumentar ésta; por el radio de curvatura del frente de grieta, desplazándose hacia el interior al disminuir el radio de curvatura; siendo sin embargo independiente del espesor de la probeta.

ABSTRACT

In this paper is presented a numerical study of the influence of the load level, the specimen thickness and the crack front curvature on the stress state. The aim of the work is to determine the influence of these parameters on fatigue crack closure. For this, a CT aluminium specimen has been modelled tri-dimensionally and several finite elements calculations have been made considering a large combination of the variables under consideration. From the analysis of the evolution of the plastic zone and the stress state along the thickness, it is concluded that the crack closure is under the influence of the load level, moving to the inside of the specimen when it increase; of the crack front curvature, moving to the inside of the specimen when it decrease; and that it is independent of the specimen thickness.

PALABRAS CLAVE: Elementos finitos, curvatura frente de grieta, zona plástica, estado tensional.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando la teoría clásica de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal aborda el estudio del comportamiento de grietas bidimensionales, ignora cualquier tipo de efecto tridimensional que pueda afectar a la propagación del frente de la grieta.

Aspectos como la potencial influencia del espesor de la probeta o la propia curvatura del frente de grieta no son tenidos en cuenta. Simplemente se consideran dos casos extremos: tensión plana o deformación plana, de forma que se asume como bidimensional un problema que en esencia es tridimensional.

En trabajos anteriores en los que se ha analizado el efecto del cierre de grieta en fatiga con simulaciones por elementos finitos [1], se ha detectado que el efecto tridimensional de transición desde el interior al exterior de la probeta cobra gran importancia. El cierre se produce en una franja exterior de la probeta que no es proporcional al espesor, y la distribución y forma de la

zona plástica depende del valor de la carga máxima (K_{max}) y del espesor [2].

Dado el gran coste computacional de estas simulaciones, se ha abordado el problema desde la mecánica de la fractura en simulaciones en las que únicamente es aplicado el primer ciclo de carga.

De la misma forma, en un trabajo anterior [3] se estudiaba la evolución del estado tensional, en función de diversas combinaciones de niveles de K_{max} y espesores. Los modelos numéricos empleados siempre consideraban que el frente de grieta era recto.

Es conocido que el perfil del frente de una grieta que ha crecido bajo cargas cíclicas no es recto y presenta cierta curvatura. Por tanto, en este nuevo trabajo se añade una nueva variable de estudio y se analiza la dependencia de la evolución del estado tensional en las proximidades del frente de grieta en función de tres parámetros: la carga máxima aplicada, el espesor y la curvatura del perfil del frente de la grieta.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se ha modelado con elementos finitos una probeta CT de aluminio Al-2024-T35 ($w=50$ mm, $a=20$ mm) en tres dimensiones, con comportamiento plástico del material.

La zona más crítica corresponde al vértice de la grieta donde se produce la mayor concentración de tensiones y los mayores gradientes en tensiones y deformaciones. Por tanto, es necesario disponer de un elevado número de elementos para captar con cierta precisión estas variaciones.

Pero al mismo tiempo, para no penalizar en exceso el coste computacional, es preciso realizar una transición grande y violenta desde estas zonas hasta las más alejadas. Para ello se ha dividido la probeta en dos zonas distintas, una en el entorno del vértice de grieta, que ha sido mallada de una forma ordenada con elementos hexaédricos, y una segunda zona, mallada con elementos tetraédricos que permiten transiciones más bruscas.

Existen en la bibliografía recomendaciones sobre cómo seleccionar el número preciso de elementos [4,5]. En el presente trabajo se considera el radio plástico de Dugdale como parámetro de referencia para establecer el orden de magnitud de la zona plastificada. De esta forma, se consigue que en todos los casos estudiados, el radio plástico siempre se encuentra dividido en el mismo número de elementos, y que el tamaño de los mismos sean proporcionales a la carga aplicada.

Cuando el frente de grieta es recto, todos los nodos que constituyen el frente de grieta se colocan a una distancia igual a la longitud de la grieta. Sin embargo, cuando el frente de grieta es curvo, hay que definir un punto a lo largo del espesor que defina la longitud de la grieta, a partir de la cual se determina el valor de K . En el presente trabajo se ha considerado que el centro de gravedad de la línea que constituye el frente de grieta es el que determina la longitud de la grieta.

En cuanto al espesor, el tamaño de los elementos se ha realizado considerando que el elemento más cercano al plano medio de la probeta tiene una longitud doble que el situado en el exterior de la probeta, con el fin de poder determinar con mayor definición la zona de transición propia de la zona plastificada, la cual se manifiesta en las proximidades al exterior de la probeta, mientras que en el interior, donde predominan las condiciones de deformación plana, la zona plastificada es homogénea y requiere una menor definición. En la figura 1 se muestra tanto el mallado empleado en el entorno del vértice de grieta, como el modelo completo para una probeta de 3 mm de espesor y frente de grieta curvo.

Las propiedades que determinan el comportamiento elástico del material son el módulo de elasticidad E y el módulo de Poisson ν , suponiendo que el comportamiento del material es isótropo. Para la probeta

de estudio estos valores han sido de 73.5 GPa y de 0.35, respectivamente.

El modelo de plastificación que se emplea es del tipo elasto-plástico con endurecimiento por deformación, el cual se asemeja bastante al comportamiento de muchos metales entre los que se encuentra el aluminio.

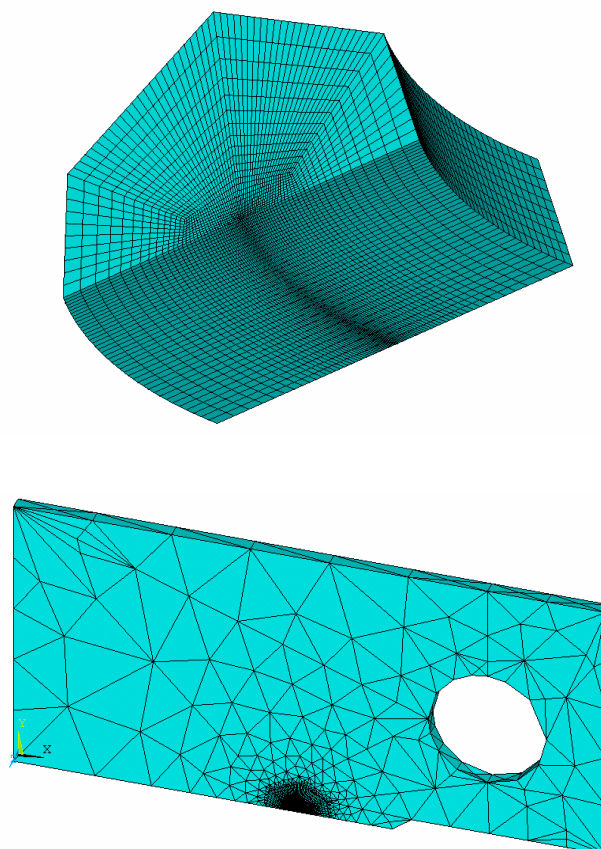


Figura 1. Mallado del entorno del frente de grieta y de una probeta de 3 mm de espesor

Se ha realizado una matriz completa de cálculos combinando tres espesores (3, 6 y 12 mm) con 7 valores de K_{\max} , que abarcan desde $K=10$ hasta $K=40$ MPa·m^{1/2} y 5 valores distintos de radio de curvatura que abarcan desde el frente de grieta recto, radio de curvatura infinito, hasta un radio de curvatura de valor igual a las dos terceras partes del espesor de la probeta, lo cual permite cubrir un amplio rango de comportamiento.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Zona plástica

De entre los distintos mecanismos de cierre, el inducido por plasticidad es el más determinante en una gran variedad de situaciones prácticas. Según éste, el crecimiento de la grieta se encuentra muy influenciado por el efecto de una pequeña zona deformada plásticamente en el entorno del frente de grieta. Por lo tanto, es necesario conocer con profundidad la forma de esta zona plastificada y su dependencia con parámetros

hasta ahora ignorados como el espesor y la curvatura del frente de la grieta. La forma de tener una visión precisa de la zona plástica es por medio de la representación de las plastificaciones alcanzadas en los elementos.

En la figura 2 se muestra la zona plastificada en una probeta de 6 mm de espesor con un frente de grieta que presenta un radio de curvatura de 10 mm, sometida a una carga $K_{\max}=25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Se observa que, al igual que ocurre cuando el frente de grieta es recto [3] las zonas plastificadas en la superficie y en la zona cercana a la misma no coincide con los resultados habituales para tensión plana en dos dimensiones, según los cuales, la zona plastificada en el exterior de la probeta (tensión plana) debería ser tres veces superior a la zona plastificada en el interior de la probeta (deformación plana).

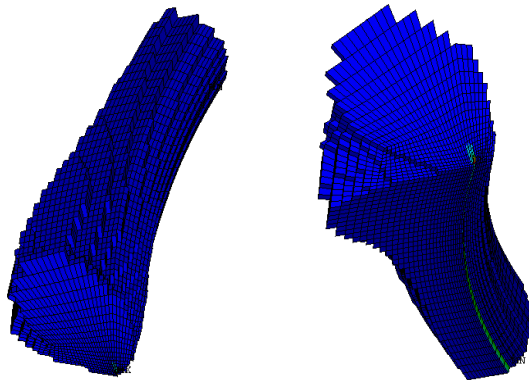


Figura 2. Zona plastificada en el entorno del frente de grieta

En la figura 3, se muestra una imagen comparativa de las zonas plastificadas en el exterior, el plano donde el radio plástico es máximo y el plano medio de la probeta. En la fila superior se muestran los resultados obtenidos cuando el frente de grieta es recto, mientras en la fila inferior se muestran los resultados con frente de grieta curvo. Se observa que el área plastificada en el plano medio de la probeta apenas se ve influenciada por el radio de curvatura, mientras que el área plastificada en el exterior de la probeta aumenta significativamente al disminuir el radio de curvatura del frente de grieta.

Debido a esto, se estudia la influencia de la curvatura del frente de grieta en las áreas plastificadas tanto en la superficie como en el plano medio de la probeta. En la figura 4 se muestra la evolución del área plastificada (A_p) en la superficie adimensionalizada por el área asociada al radio plástico de Dugdale en tensión plana ($A_{\text{rpd tp}}$), de probetas de 3mm de espesor al variar la carga aplicada y la curvatura del frente de la grieta. En primer lugar, se observa que en el caso de frente de grieta recto (fgr), los resultados muestran la existencia de una dependencia lineal del área plastificada adimensionalizada en las condiciones de tensión plana con la K_{\max} aplicada. Por otro lado, para los valores inferiores de carga, se muestra una gran dependencia del

área plastificada en el exterior con el radio de curvatura, de tal forma, que radios de curvatura menores implican mayores áreas plastificadas. Al incrementarse el valor de la carga aplicada se produce una convergencia de los resultados obtenidos para los distintos radios de curvatura considerados hacia los valores obtenidos con el frente de grieta recto.

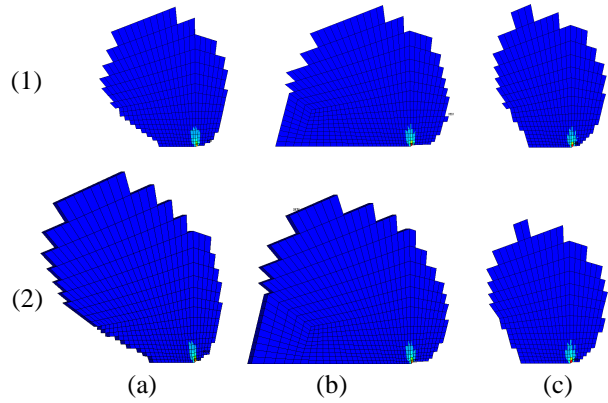


Figura 3. Zonas plastificadas en la superficie (a), plano de máximo radio plástico (b) y plano medio de la probeta (c). Frente de grieta recto (1) y frente de grieta con curvatura (2)

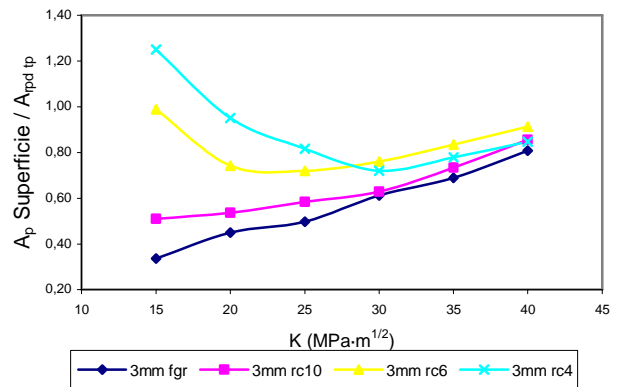


Figura 4. Evolución de las áreas plastificadas en la superficie de probetas de 3mm de espesor

En la figura 5 se muestran las áreas plastificadas (A_p) adimensionalizadas en el plano medio de la probeta, que corresponde con el caso de deformación plana. En esta ocasión, para adimensionalizar el área se ha empleado el área asociada al radio plástico de Dugdale en deformación plana ($A_{\text{rpd dp}}$). Se observa que existe una dependencia del área plastificada adimensionalizada en el plano medio de la probeta con la carga aplicada, en principio lineal hasta que se alcanza un determinado valor de la carga aplicada ($K_{\max}=30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), a partir del cual se produce una saturación y pasa a tener un valor aproximadamente constante. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el radio de curvatura que presenta el frente de grieta, obteniéndose valores prácticamente iguales para los distintos radios de curvatura sometidos a los mismos estados de carga.

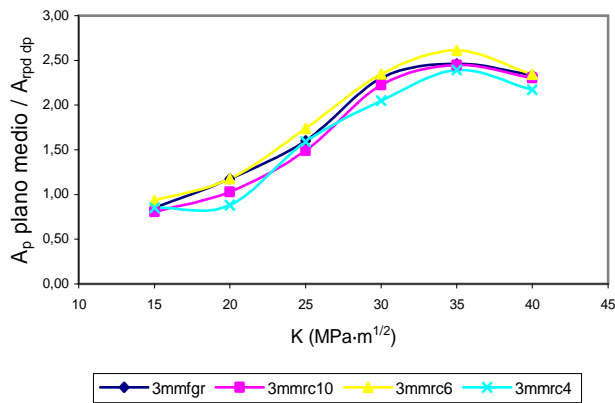


Figura 5. Evolución de las áreas plastificadas en el plano medio de probetas de 3mm de espesor

En la figura 6 se muestra la relación existente entre las áreas plastificadas en la superficie de la probeta, que corresponde con el estado de tensión plana, y en el plano medio de la probeta, que coincide con las condiciones de deformación plana. Se observa que para los casos con frente de grieta recto (fgr), el área plastificada en condiciones de deformación plana es prácticamente igual al área plastificada en las condiciones de tensión plana para todo el rango de cargas considerado. Sin embargo, se observa que la presencia de curvatura provoca que para los valores de carga inferiores el área plastificada en el exterior de la probeta sea muy superior a la que plastifica en el plano medio, tanto más cuanto menor sea el radio de curvatura del frente de grieta. Por otro lado, el incremento de la carga aplicada tiende a igualar las áreas plastificadas en el interior y en el exterior de la probeta independientemente de la geometría del frente de grieta, presentando cuantías prácticamente coincidentes para valores superiores a $K_{\max}=30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

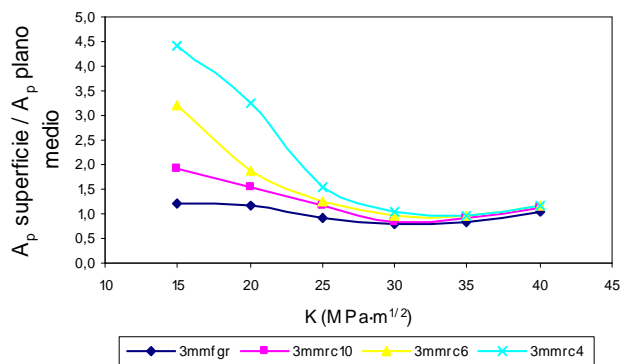


Figura 6. Evolución de la relación de las áreas plastificadas en el exterior y el plano medio de la probeta

Otra variable importante para caracterizar la zona plastificada en el entorno del frente de grieta, es el radio plástico a lo largo del frente de grieta. Se considera que el radio plástico es la zona plastificada en el plano de simetría de la probeta que contiene a la grieta. Para poder comparar los radios plásticos

obtenidos para distintos niveles de carga y las distintas geometrías, es necesario adimensionalizar estos valores. Para ello, se ha dividido los radios plásticos obtenidos por el radio plástico de Dugdale (rpd) correspondiente para cada caso.

En la figura 7 se muestra la evolución del radio plástico de una probeta de 3mm de espesor sometida a una $K_{\max}=15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ al variar el radio de curvatura del frente de grieta. Para todos los casos se observa que en el interior de la probeta, la zona plastificada se mantiene constante, de forma que conforme nos vamos acercando al exterior de la probeta, se produce un notable incremento de las dimensiones de la zona plastificada, la cual disminuye rápidamente, formando un adelgazamiento de la zona plástica en la superficie de la probeta.

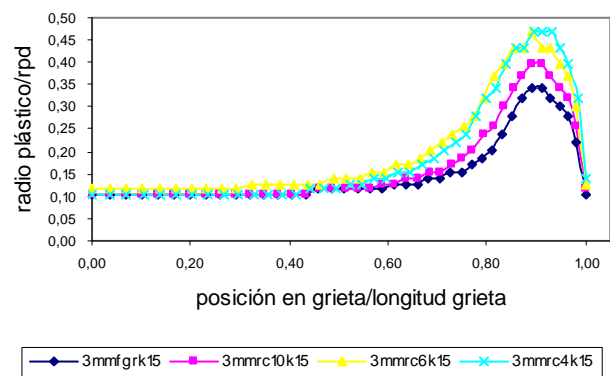


Figura 7. Evolución del radio plástico al variar el radio de curvatura del frente de grieta

Por trabajos anteriores [3] era conocido que conforme aumenta la carga aplicada, la zona de transición se va extendiendo hacia el interior, hasta que llega a ocupar todo el espesor de la misma, siendo este comportamiento más acusado en las probetas de menor espesor. Conforme aumenta el ancho de la pieza, para un mismo estado de carga, disminuye la extensión de la zona plastificada con respecto al espesor de la probeta.

En relación a la influencia del radio de curvatura en el radio plástico, la figura 7 muestra que conforme disminuye el radio de curvatura, se produce una extensión hacia el interior de la zona de transición, así como un aumento de los radios plásticos asociados a esta zona.

Con objeto de cuantificar en cierta medida la dominancia del estado de deformación plana, el estudio de la posición del centro de gravedad del radio plástico a lo largo del frente de grieta con respecto al exterior de la probeta en dirección ortogonal a la misma (d) determina la existencia de tres comportamientos diferenciados en función de la carga máxima aplicada, tal y como se puede observar en la figura 8. Se observa que la curvatura del frente de grieta únicamente afecta al primero de los comportamientos observados.

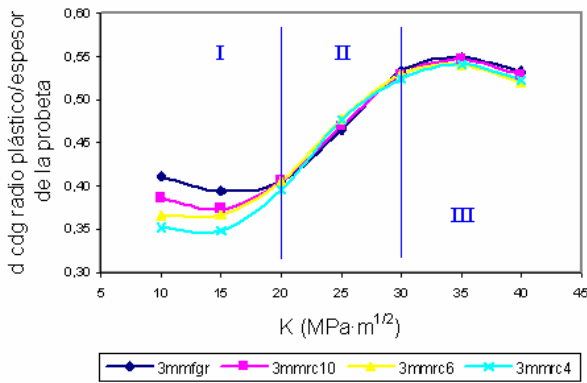


Figura 8. Posición del centro de gravedad del radio plástico respecto al exterior de una probeta de 3mm

Por último, se ha analizado el volumen de la zona plastificada en el entorno del frente de grieta. Para que estos valores sean independientes de la carga aplicada, se adimensionaliza dividiendo cada uno por el volumen que presenta un cilindro de diámetro igual al radio plástico de Dugdale correspondiente en cada caso y de altura el espesor de la probeta.

La curva de comportamiento del volumen adimensionalizado respecto a la carga aplicada presenta dos comportamientos diferenciados [3]. El primero presenta una relación lineal del volumen plastificado adimensionalizado con la carga aplicada y a partir de un determinado valor de K_{max} , el cual depende del espesor de la probeta, se produce una saturación, pasando a tener un comportamiento constante independiente del valor de la carga.

En la figura 9 se refleja la dependencia de los volúmenes plastificados en una probeta de 12 mm de espesor con el radio de curvatura del frente de grieta. Se muestra que se produce un aumento del volumen plastificado al disminuir el radio de curvatura para un mismo estado de cargas. De la misma forma, se observa el mismo comportamiento lineal del volumen plastificado con la carga aplicada para los distintos radios de curvatura considerados.

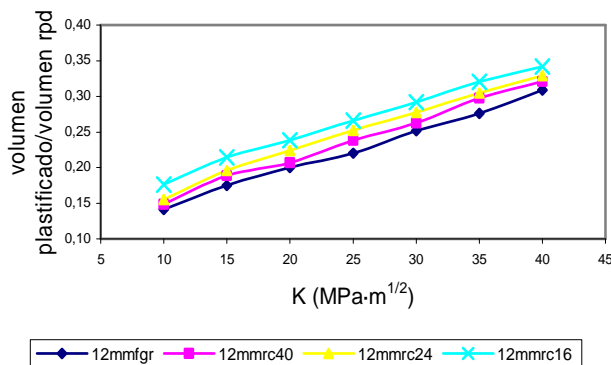


Figura 9. Volúmenes plastificados para una probeta de 12 mm de espesor

3.2 Tensiones

Para poder medir la influencia del estado de deformación plana a lo largo del frente de grieta, se han obtenido los valores de la tensión en la dirección ortogonal a la superficie de la probeta (σ_z) en todos los nodos pertenecientes al frente de grieta.

En la figura 10 se muestra la evolución de las tensiones en z a lo largo del frente de grieta al variar para una misma carga aplicada, la curvatura del frente de grieta. En concreto, se muestran los resultados obtenidos para una probeta de 6mm de espesor sometida a una carga $K_{max} = 35 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. En el eje de abscisas se representa la posición en la grieta adimensionalizada por el espesor de la probeta. En el eje de ordenadas se representa la tensión en la dirección z en N/m^2 . Este valor no se adimensionaliza, ya que su valor está gobernado por el criterio de plastificación (von Mises) y es independiente de la carga aplicada.

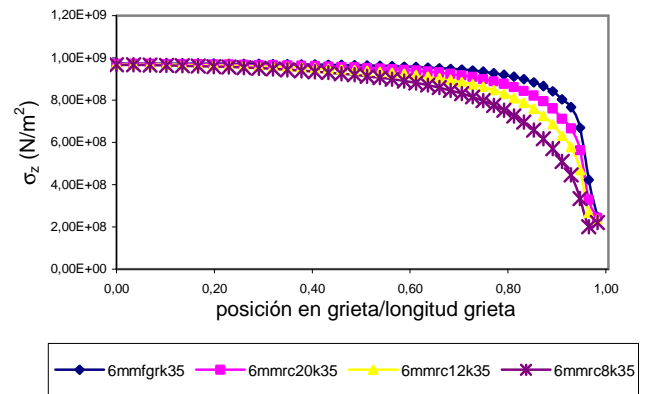


Figura 10. Evolución de las tensiones en z al variar el radio de curvatura del frente de grieta

En el exterior de la probeta no se alcanza el valor nulo debido a que los valores de las tensiones se calculan en los puntos de integración del elemento y, posteriormente, por interpolación, se determina el valor en los nodos. Además, el elevado valor del gradiente de las tensiones en esta zona, acentúa el error cometido.

Se observa que conforme disminuye el radio de curvatura del frente de grieta, la transición de los valores propios del estado de deformación plana a los correspondientes al exterior de la probeta es más suave.

Se busca determinar la dominancia del estado de deformación plana a lo largo del espesor de la probeta. Recorriendo el espesor de la probeta desde el interior hacia el exterior, mientras esté presente el estado de deformación plana las tensiones permanecerán inalterables. Por ello, se consideran como variable de estudio, la distancia con respecto al exterior de la probeta en la que se produce un descenso del valor de la tensión correspondiente al estado de deformación plana del 5% para cada uno de los casos estudiados.

En la figura 11 se muestra los valores obtenidos para una probeta de 3mm de espesor. Se observa que existe una clara dependencia lineal entre el espesor de la probeta bajo un estado de deformación plana y la carga aplicada, de tal forma que incrementos de carga implican una menor dominancia del estado de deformación plana. En cuanto a la configuración del frente de grieta, se observa que conforme disminuye el radio de curvatura, disminuye la dominancia del estado de deformación plana.

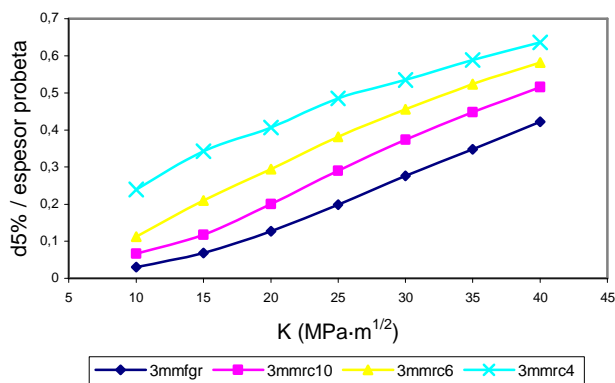


Figura 11. Distancia respecto al exterior de la probeta a la que se encuentra el estado de deformación plana

4. CONCLUSIONES

Del estudio de la zona plástica se concluye que existen diferencias importantes con el modelo teórico. Se ha demostrado la existencia de una fuerte dependencia entre la forma de la zona plastificada en el entorno del frente de grieta con variables tridimensionales no consideradas hasta el momento, tales como el espesor de la probeta y la curvatura del frente de la grieta, así como de variables que en principio no deberían presentar dependencia alguna, tales como el factor de intensidad de tensiones.

De esta forma, las áreas plastificadas en el exterior de la probeta se ven fuertemente influenciadas por el radio de curvatura, de tal forma que radios de curvaturas menores, implican áreas plastificadas mayores. Por el contrario, se ha visto que el área plastificada en el plano medio de la probeta, apenas se ve influenciada por el radio de curvatura del frente de grieta.

Con respecto a la carga aplicada, se ha observado que los valores del área plastificada tanto en el exterior como el interior adimensionalizadas por el área correspondiente al radio plástico de Dugdale muestra una fuerte dependencia, siendo más acusada en el caso de deformación plana.

La relación entre las áreas plastificadas en el exterior y en el interior muestra una dependencia con la curvatura del frente de grieta para valores de carga pequeños. A partir de un determinado valor, esta dependencia desaparece y los valores de las áreas plastificadas en el

exterior son del orden de las áreas plastificadas en el interior.

El volumen plastificado adimensionalizado por el volumen ideal constituido por el radio plástico de Dugdale, muestra un comportamiento lineal con la carga aplicada, hasta que se alcanza un determinado valor a partir del cual se alcanza un estado de saturación. El valor del factor de intensidad de tensiones a partir del cual se obtiene esta saturación depende del espesor de la probeta. Con respecto al radio de curvatura del frente de grieta, se puede observar que una disminución del radio de curvatura implica un aumento del volumen adimensionalizado.

Con respecto a la dominancia del estado de deformaciones, se puede decir que muestra una triple dependencia con el espesor, la curvatura y la carga aplicada. A partir de los resultados obtenidos en este y otros trabajos [3], se puede concluir que incrementos del factor de intensidad de tensiones implica una disminución del espesor de la probeta bajo condiciones de deformación plana; disminuciones del espesor de la probeta, implican menores influencias relativas del estado de deformación plana; y disminuciones del radio de curvatura del frente de grieta, implica una menor dominancia del estado de deformación plana.

A partir de las conclusiones directas obtenidas en el presente estudio, se puede inferir que en el comportamiento a fatiga, el cierre de grieta se ve afectado por el valor de K_{max} aplicado, desplazando el cierre de grieta hacia el interior. De la misma forma, la presencia de curvatura en el frente de grieta implica un desplazamiento del cierre de grieta hacia el interior.

REFERENCES

- [1] Gonzalez-Herrera A, Zapatero J. *Tri-dimensional numerical modelling of plasticity induced crack closure*. Engineering Fracture Mechanics. 2008;75:4513
- [2] Gonzalez-Herrera A, Garcia-Manrique J, Cordero A, Zapatero J. Key Engineering Materials. 2006;334-335:555.
- [3] Camas-Peña, D., García-Manrique, J., López-Crespo, P., González-Herrera, A., *Estudio numérico de la evolución del estado tensional a lo largo del espesor en probetas CT*, Anales de Mecánica de la Fractura, 26, pp. 259-264, 2009.
- [4] McClung, R.C., Sehitoglu, H., *On the finite element analysis of fatigue crack closure, part-1: basic modelling issues*, Engineering Fracture of Mechanics, 33, pp. 237-252, 1989.
- [5] González-Herrera, A., Zapatero, J., *Influence of minimum element size to determine crack closure stress by the finite element method*, Engineering Fracture Mechanics, 2005;72:337
- [6] González Herrera, A., *Determinación numérica de las tensiones de apertura y cierre de grieta en fatiga*, Tesis doctoral, Universidad de Málaga, 2004.