

ANÁLISIS NUMÉRICO BIDIMENSIONAL DEL EFECTO DE CAMPOS DE TENSIONES NO UNIFORMES EN GRIETAS EN MODO MIXTO

R. García¹, D. Camas¹, F. V. Antunes², B. Moreno¹, P. Lopez-Crespo¹, J. Zapatero¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación.
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Málaga.
C/ Doctor Ortiz Ramos s/n, 29071 Málaga-España

² Departamento de Ingeniería Mecánica.
Universidad de Coimbra. 3000-370 Coimbra, Portugal

* Persona de contacto: dcp@uma.es

RESUMEN

La probeta con taladro centrado es un tipo de geometría a partir de la cual las grietas se propagan con frecuencia. En algunos casos, el análisis combinado de carga en modo mixto I y II tiene cierta relevancia industrial. Por este motivo, se ha realizado un análisis numérico bidimensional de una grieta que emana de un taladro en una placa de aleación de aluminio. Se han calculado las áreas plastificadas y los desplazamientos alrededor de la grieta para siete estados de carga biaxial diferentes. Para ello, se ha modificado el ángulo de aplicación de la carga desde 23.4° (modos I+II) hasta 90° (modo I puro) considerando incrementos de 11.1°, y se ha mantenido constante el valor nominal de carga. Con el objetivo de obtener áreas más precisas, se ha utilizado un análisis de elementos finitos basado en el submodelado. Posteriormente, para contrastar los resultados, se han comparado los campos de desplazamiento en la superficie alrededor de la grieta con los resultados obtenidos de forma experimental usando la técnica de correlación de imágenes. Después de la validación del modelo, se ha estudiado la evolución de las zonas plastificadas en condiciones de tensión y deformación plana para diferentes valores de carga nominal.

PALABRAS CLAVE: Modo mixto, Elementos finitos, Submodelado, Área plastificada

ABSTRACT

The hole-in-a-plate sample is a type of geometry from which cracks often propagate. In some cases, the analysis of combined mode I and II loadings has industrial relevance. For that reason, a bi-dimensional numerical study of a crack emanating from a hole in an aluminium alloy specimen has been accomplished. Yielded areas and displacements around the crack have been calculated for seven mixed-mode cases, modifying the loading angle from 23.4° (mode I+II) to 90° (pure mode I) considering increments of 11.1°, and keeping constant the nominal load. In order to get more precise areas, a finite element analysis based on sub-modelling was used. The displacement fields in the surface around the crack have been compared with experimental results obtained using the digital image correlation technique to validate the numerical results of the model. After the validation, the evolution of the yielded areas under plane strain and plane stress conditions has been studied for different nominal load values.

KEYWORDS: Mixed-mode, Finite element method, Sub-modeling, Yielded area

1. INTRODUCCIÓN

En la práctica, muchos componentes están sometidos a estados de carga complejos que incluyen la combinación de los modos de carga I y II. En ocasiones, el estudio de este tipo de problemas es abordado considerando un comportamiento de fractura en el que predomina el modo I, debido a que es frecuente que los estados de tensión en la superficie sean prácticamente uniaxiales. Sin embargo, no todos los casos pueden ser analizados adecuadamente

con esta aproximación y es necesario tener en cuenta las tensiones cortantes en el plano de fractura.

Con el objetivo de analizar en mayor profundidad la influencia que tiene la dirección de la carga aplicada, en el presente trabajo se ha realizado un estudio de la evolución del área plastificada en el vértice de la grieta de una probeta sometida a condiciones de carga en modo mixto (I+II). Para ello, se ha llevado a cabo un análisis bidimensional con elementos finitos con generación de submodelo de la zona crítica. La creación de un

submodelo permite afinar el mallado para reducir las desviaciones producidas y obtener resultados con mayor precisión.

Para comprobar la validez relativa del método de cálculo numérico se propone la validación experimental mediante la técnica de correlación digital de imágenes. El campo de desplazamientos en la superficie de la muestra obtenido con este método constituye una oportunidad para validar experimentalmente simulaciones numéricas mediante la comparación directa de desplazamientos.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En este trabajo se ha modelado una probeta con taladro centrado preagrietada de aleación de aluminio Al-7010 T-7651. Las dimensiones de la muestra son 160 mm de ancho, 240 mm de largo y 5 mm de espesor. El modelo presenta un agujero de 50 mm de diámetro, del que emana una grieta de 5 mm de longitud.

El material empleado tiene un módulo de elasticidad de 73.5 GPa y un módulo de Poisson de 0.35. El modelo de plastificación es elasto-plástico con endurecimiento por deformación, un modelo que describe el comportamiento del material con suficiente grado de representatividad.

Para modelar las mordazas que sujetan la pieza, se han usado elementos que aplican restricciones cinemáticas entre los nodos. Estos elementos actúan como una estructura rígida que es utilizada para transmitir los esfuerzos. La simulación de los diferentes estados de carga biaxial se ha llevado a cabo modificando el ángulo de aplicación de la carga, como se muestra en la figura 1. Los valores que puede adquirir dicho ángulo vienen definidos por la propia geometría de las sujeciones utilizadas en los ensayos experimentales.

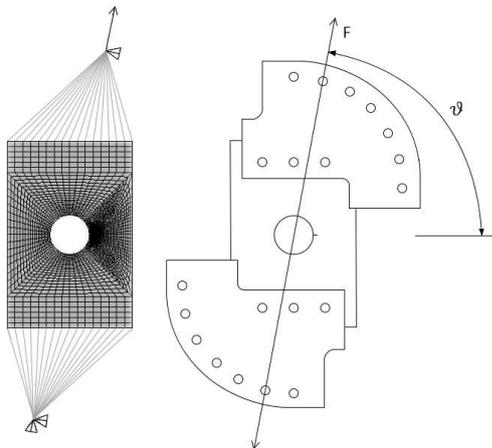


Figura 1. Modelo y esquema del problema real.

En el análisis bidimensional efectuado por el método de los elementos finitos, se ha realizado un estudio detallado

de la zona del vértice de la grieta. Ésta es la sección más crítica de la pieza, ya que es donde se alcanzan los mayores campos de tensiones y deformaciones. El tamaño de los elementos en esta área tiene que ser lo suficientemente pequeño para capturar con detalle la forma de la zona plastificada.

Para abordar las dificultades que se presentan en el mallado de la pieza durante la transición entre los elementos de la zona del vértice de la grieta y los elementos más alejados, se ha utilizado un submodelo. El análisis detallado de la zona próxima a la grieta, ejecutado de forma paralela con el submodelo, permite que la transición de la malla en el modelo global sea gradual. De esta forma, es posible conseguir una malla regular y de calidad, optimizando recursos y tiempo de ejecución.

Existen trabajos previos realizados por los presentes autores [1-4] en los que se recomienda cómo seleccionar el número de elementos en base al radio plástico de Dugdale. Con el uso de esta metodología, el tamaño de los elementos es proporcional a la carga aplicada.

En este trabajo, se ha considerado el radio plástico de Dugdale como referencia para la estimación del tamaño de la zona plástica, pero con una distribución uniforme de los elementos que garantiza que el área estudiada esté contenida en la malla refinada para todos los estados de carga. En la figura 2 se muestran las dimensiones y el mallado realizado en el entorno del vértice de la grieta.

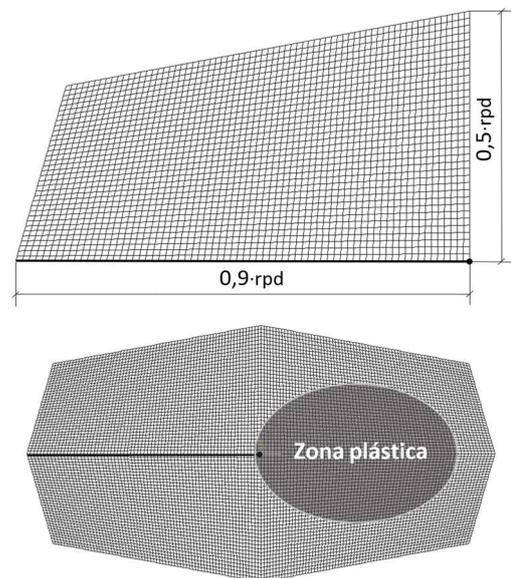


Figura 2. Dimensiones del entorno del vértice de grieta.

Se han analizado siete estados de carga, modificando el ángulo de aplicación de la fuerza desde $\theta=23.4^\circ$ (modo I+II) hasta $\theta=90^\circ$ (modo I). Además, se ha realizado el estudio para diferentes valores de carga nominal: 25 kN, 37.5 kN, 50 kN, 62.5 kN y 75 kN.

3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

En el vértice de la grieta se obtiene el máximo valor de plastificación. Éste decrece rápidamente dando lugar a una zona con un nivel de plastificación bajo, que se corresponde con la zona plástica en sí. El área plastificada tiene un papel significativo en el crecimiento de la grieta, tanto en fractura como en fatiga. Por lo tanto, es importante estudiar la forma y el tamaño que tiene, y analizar su evolución con el ángulo de aplicación de la carga y el valor de carga nominal.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al realizar el estudio del modelo en condiciones de tensión plana (TP) y de deformación plana (DP), de forma que se analiza la plastificación tanto en la superficie como en el plano medio de la pieza. Además, se incluye un análisis de los desplazamientos verticales, que será utilizado posteriormente para la comparación con los resultados experimentales.

3.1. Áreas plastificadas

En un primer caso, se muestran los resultados obtenidos para una carga nominal de 25 kN, que es la carga utilizada en los ensayos. En las figuras 3 y 4 se han representado las formas de las áreas plastificadas en TP y DP. Se puede observar que en condiciones de modo I puro, la forma de las áreas se asemeja a las áreas propuestas por la Mecánica de Fractura Elástica Lineal.

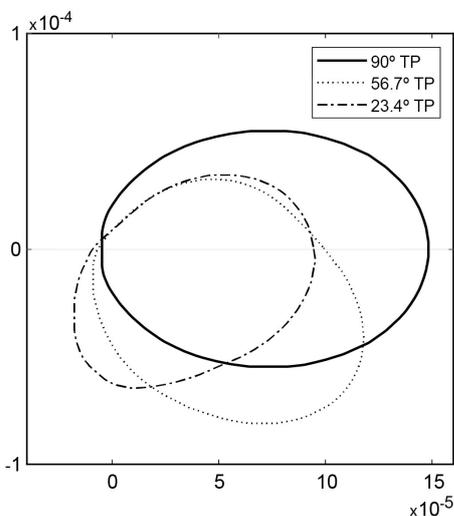


Figura 3. Evolución de la forma del área plástica en TP con el ángulo de carga. Unidades en metros.

Con la disminución del ángulo de carga, el área plastificada decrece y deja de ser simétrica con respecto al plano de la grieta. La forma lobular característica del estado tensional en DP se ve alterada, aumentando en mayor medida el área plastificada ubicada delante del frente de la grieta, ya que en esta zona las tensiones alcanzadas son mayores. Este comportamiento se puede observar en las figuras 4 y 5. En esta última figura, se ha

analizado la evolución de la posición del centro de gravedad (cdg) del área plástica en DP. El sistema de referencia en la figura 5 está localizado en el vértice de la grieta.

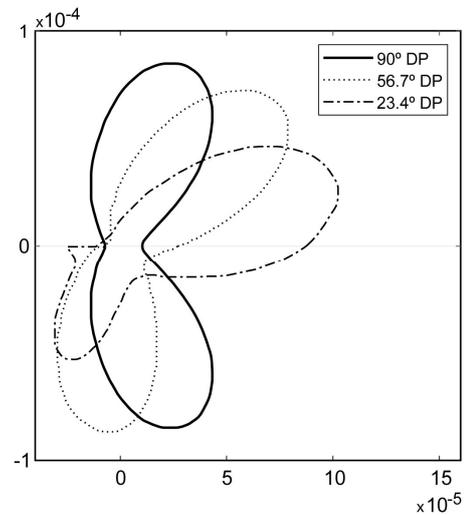


Figura 4. Evolución de la forma del área plástica en DP con el ángulo de carga. Unidades en metros.

Cuando se aplica una carga en dirección perpendicular al plano de la grieta, la posición del cdg presenta simetría respecto al eje y. Al disminuir el ángulo de la carga, el cdg se desplaza inicialmente hacia abajo debido al giro experimentado por la zona plástica. A partir de este punto (78.9°), comienza la plastificación no uniforme respecto al vértice de la grieta, viéndose reflejado este comportamiento en la evolución del cdg.

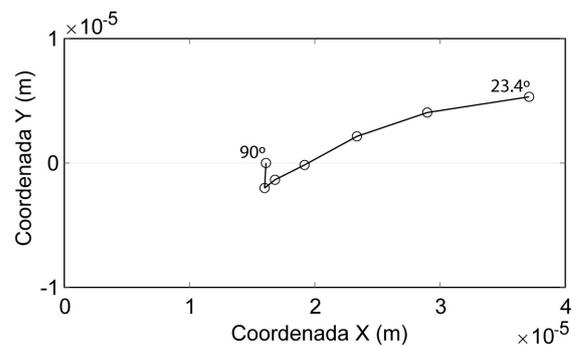


Figura 5. Variación de la posición del centro de gravedad de las áreas plastificadas en DP.

El grado de plastificación de las zonas del vértice de la grieta en TP y DP presenta una tendencia similar en ambos casos, apreciándose en la figura 6 un mayor crecimiento del área en TP a partir de 56.7°. De esta forma, para el estado de carga en modo I se obtiene un área cuyo valor es aproximadamente 1.5 veces el valor del área plastificada al aplicar la carga con un ángulo de 23.4°.

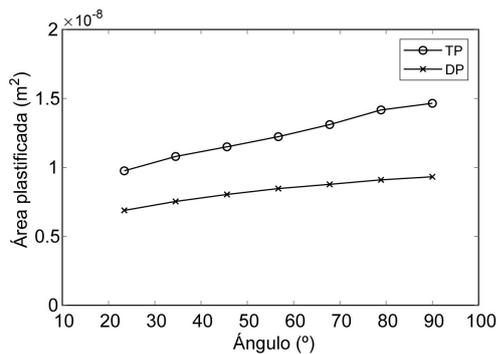


Figura 6. Áreas plastificadas en TP y DP en función del ángulo de carga.

En las figuras 7 y 8 se puede apreciar cómo el área plastificada aumenta con el incremento del valor de la carga nominal aplicada. Ambas figuras muestran los resultados obtenidos en la superficie de la pieza, con un ángulo de aplicación de la carga de 90° en la figura 7 y un ángulo de 23.4° en la figura 8.

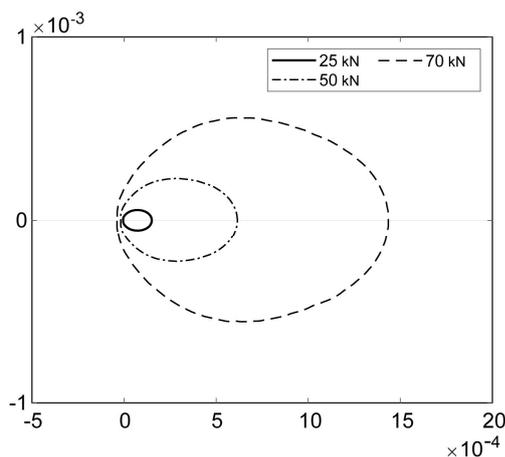


Figura 7. Evolución de la forma del área plástica en TP con distintos valores de carga nominal. Ángulo de aplicación de la carga de 90°. Unidades en metros.

Al examinar la plastificación bajo condiciones de carga en modo mixto se observa que, para valores de carga más elevados, existe cierta predisposición a adoptar la forma del área plastificada característica de la deformación plana. Para analizar en profundidad este efecto y la influencia del ángulo de aplicación de la carga en la transición entre TP y DP, es necesario abordar la realización de un análisis tridimensional del modelo.

En trabajos anteriores [5,6], en los que se ha realizado un estudio numérico tridimensional de probetas CT sometidas a carga en modo I, el área plastificada en la superficie adquiere una forma similar al área en DP justo antes de alcanzar la superficie. Además, la evolución de la zona plástica a lo largo del espesor depende, entre otras cosas, de la carga aplicada.

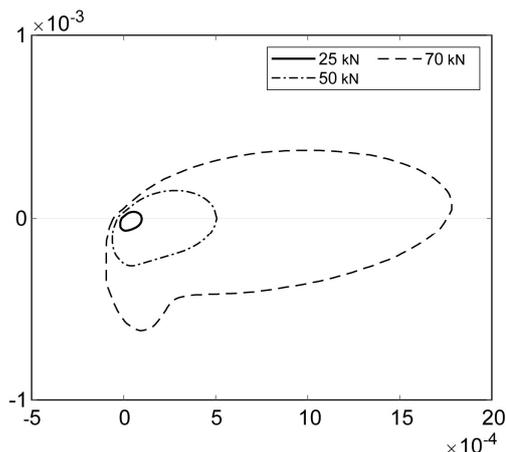


Figura 8. Evolución de la forma del área plástica en TP con distintos valores de carga nominal. Ángulo de aplicación de la carga de 23.4°. Unidades en metros.

3.2. Desplazamientos

Para la evaluación de los desplazamientos en la zona de la grieta en el modelo de elementos finitos, se han utilizado cuatro caminos situados a ± 0.5 mm y ± 1.6 mm de las caras de la grieta. El sistema de referencia está ubicado en el vértice de la grieta, tal y como se muestra en la figura 9. De esta forma, las coordenadas negativas en el eje X (horizontal) se corresponden a los puntos por los que la grieta ya ha avanzado.

Los resultados se han obtenido para los siete ángulos de aplicación de la carga simulados. Sólo se han analizado los desplazamientos en TP, ya que son los que posteriormente van a ser utilizados para la validación experimental.

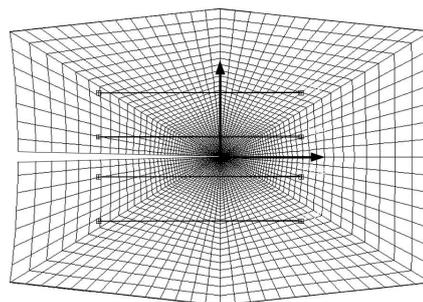


Figura 9. Caminos utilizados para el análisis de desplazamientos.

La principal dificultad para realizar la comparación de los desplazamientos es la necesidad de asegurar que ambos resultados se remiten a un mismo sistema de referencia. El orden de magnitud del desplazamiento es muy pequeño, por lo que el ajuste entre los resultados debe ser preciso.

4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Los campos de desplazamientos experimentales se han obtenido mediante la técnica de correlación de imágenes (DIC) [7]. Es una técnica óptica experimental que permite examinar sin contacto el campo de desplazamientos y deformaciones en una pieza. La técnica DIC es una herramienta muy versátil para el análisis mecánico de materiales. Además, se ha demostrado que se obtienen resultados fiables en el campo de la mecánica de la fractura [7,8].

La correlación de imágenes está basada en la comparación de imágenes tomadas en diferentes estados, uno antes de la deformación y otro después. La técnica consiste en el análisis del movimiento de un patrón aleatorio de puntos ubicados en la superficie de la muestra. Mediante el postprocesado de las imágenes obtenidas, es posible visualizar el campo de desplazamientos en la superficie con gran resolución.

En general, las probetas son tratadas para poder aplicar la técnica DIC de forma que se consiga un contraste suficiente. El patrón de la superficie, necesario para conseguir ciertas referencias para la comparación de imágenes, puede obtenerse mediante distintas técnicas. En este caso, la pieza se ha sometido a un proceso de lijado con papel de lija de carburo de silicio con un tamaño de grano de 120. Tras el tratamiento, el acabado final de la superficie de la probeta es el que se muestra en la figura 10.

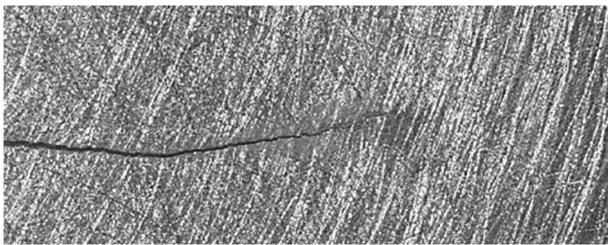


Figura 10. Patrón aleatorio aplicado en la superficie.

La comparación entre los resultados experimentales y los numéricos se ha hecho en términos de desplazamientos verticales a lo largo de cuatro líneas paralelas al plano de la grieta ubicadas a $\pm 0,5$ mm y $\pm 1,6$ mm de la grieta, como se mencionó en el apartado de desplazamientos del modelo numérico. El cotejo de los desplazamientos se ha llevado a cabo para los siete estados de carga analizados.

Para efectuar la comparación, es imprescindible realizar ciertas correcciones para representar los resultados analíticos y experimentales respecto al mismo sistema de referencia. Esto es debido a que cuando se aplica la carga, la muestra sufre rotación y traslación debido al movimiento del cuerpo como sólido rígido, afectando a la posición y orientación de la grieta. En la figura 11 se muestran los efectos producidos sobre la muestra, donde

la traslación del vértice de grieta viene dada por (t_x, t_y) y el ángulo de rotación es γ .

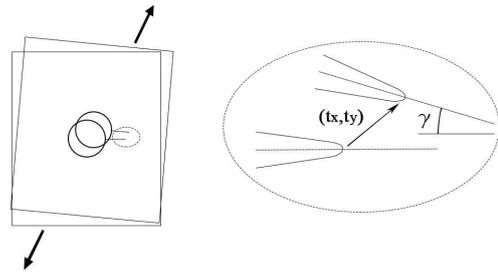


Figura 11. Traslación y rotación de la probeta durante la aplicación de la carga.

Además, en el caso experimental, a diferencia del numérico, es necesario girar la probeta para poder aplicar los diferentes estados de carga en condición biaxial, por lo que los desplazamientos obtenidos mediante DIC tienen una orientación diferente. Esto se puede observar en la figura 12.

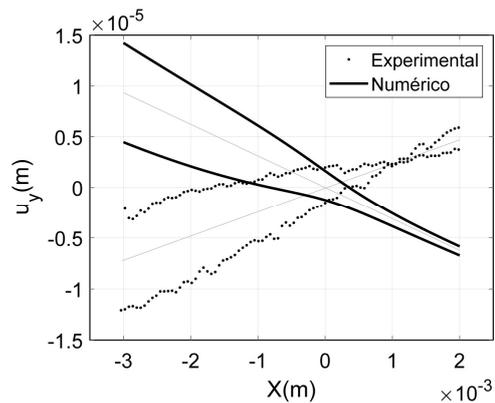


Figura 12. Desplazamientos en análisis numérico y experimental (sin corrección angular) para un ángulo de 23.4° .

En los resultados experimentales, la posición del vértice se determina mediante una rutina de búsqueda del borde de la grieta realizada en la técnica de correlación de imágenes. De esta forma, los desplazamientos horizontales y verticales del vértice se pueden obtener con una precisión adecuada. Por otro lado, para la corrección angular se ha utilizado como referencia la estimación de la línea media entre los desplazamientos medidos a ambos lados del plano de la grieta, para posteriormente determinar el ángulo de rotación.

En la figura 13 se han representado los desplazamientos de los puntos ubicados a ± 1.6 mm al aplicar la carga en modo I puro. Se puede observar que los resultados obtenidos mediante el análisis bidimensional de elementos finitos se asemejan bastante a los que proporciona el ensayo experimental, de forma que el

modelo numérico queda validado. Aunque los resultados son sólidos para todos los estados de carga, para algunos ángulos de aplicación de la carga los resultados se ajustan mejor que para otros.

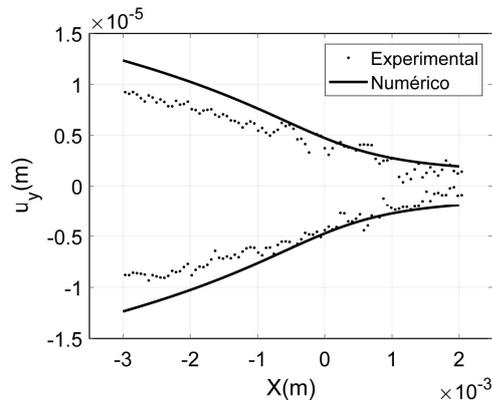


Figura 13. Comparación de desplazamientos verticales numéricos y experimentales; $y = \pm 1.6 \text{ mm}$ y $\theta = 90^\circ$.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un análisis de la zona plastificada en una grieta que emana del taladro central de una probeta de aluminio. La pieza ha sido sometida a diferentes estados de carga en condiciones de modo I puro y modo mixto (I + II), lo que permite estudiar cómo el ángulo de aplicación de la carga influye en la forma y tamaño del área plastificada en la zona del vértice de la grieta. El desarrollo de un análisis bidimensional considerando un estado tensional en tensión plana y en deformación plana permite extraer información relevante de la plastificación producida en la superficie y en el plano medio de la pieza respectivamente.

La forma de las zonas plastificadas en los dos estados tensionales estudiados en modo I, presenta ciertas similitudes con las áreas teóricas propuestas por la Mecánica de Fractura Elástica Lineal. La disminución del ángulo de aplicación de la carga provoca el decrecimiento del área plastificada y conlleva a la obtención de un área asimétrica respecto al plano de la grieta. El área plastificada experimenta un cambio de orientación y de forma proporcionales a la dirección en la que se aplica la carga.

El aumento del valor de la carga nominal produce un incremento del tamaño de la zona plástica. Con ángulos de aplicación de la fuerza pequeños (predominio del modo II) y valores de carga nominal más elevados, se observa en la superficie del modelo una tendencia a adoptar la forma del área plastificada característica de la deformación plana. En este punto, se resalta la necesidad de realizar un análisis numérico tridimensional para estudiar mejor este efecto y para analizar la influencia de la transición entre los estados de deformación plana y de tensión plana.

Finalmente, se ha realizado la validación del modelo mediante la comparación con resultados experimentales obtenidos por la técnica de correlación de imágenes. El grado de correlación entre los desplazamientos numéricos y experimentales obtenidos, permite confirmar la validez del modelo numérico.

REFERENCIAS

- [1] A. Gonzalez-Herrera, J. Zapatero, Tri-dimensional numerical modelling of plasticity induced fatigue crack closure. *Engineering Fracture Mechanics* (2008) 75:4513-4528.
- [2] F.V. Antunes, D. Camas, L. Correia, R. Branco, Finite element meshes for optimal modelling of plasticity induced crack closure. *Engineering Fracture Mechanics* (2015) 142:184-200.
- [3] D. Camas, J. Garcia-Manrique, B. Moreno, A. Gonzalez-Herrera, Numerical modelling of three-dimensional fatigue crack closure: Mesh refinement. *International Journal of Fatigue* (2018) 113:193-203.
- [4] P. Lopez-Crespo, D. Camas, A. Gonzalez-Herrera, J.R. Yates, E.A. Patterson, J. Zapatero, Numerical and experimental analysis of crack closure. *Key Engineering Materials* (2008) 385-387:369-372.
- [5] D. Camas, J. Garcia-Manrique, A. Gonzalez-Herrera, Numerical study of the thickness transition in bi-dimensional specimen cracks. *International Journal of Fatigue* (2011) 33(7):921-928.
- [6] D. Camas, P. Lopez-Crespo, A. Gonzalez-Herrera, B. Moreno, Numerical and experimental study of the plastic zone in cracked specimens. *Engineering Fracture Mechanics* (2017) 185:20-32.
- [7] P. Lopez-Crespo, R.L. Burguete, E.A. Patterson, A. Shterenlikht, P.J. Withers, J.R. Yates, Study of a crack at a fastener hole by digital image correlation. *Experimental Mechanics* (2009) 49:551-559.
- [8] M. A. Sutton, S. R. McNeill, J. D. Helm, Y. J. Chao, Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision. *Photomechanics, Topics in Applied Physics* (2000) 77:323-372.