SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE ACEROS ESTRUCTURALES PARA CHAPAS PUNZONADAS Y TALADRADAS

Alegre J.M. [(1)], Aragón A. [(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. El presente trabajo presenta una simulación 3D del comportamiento en fatiga de chapas punzonadas y taladradas sometidas a esfuerzos de tracción. Como datos de partida del material se ha determinado experimentalmente su comportamiento mecánico y los parámetros de la ley de Paris del material mediante el ensayo de probetas compactas CT. Para simular la evolución del frente de la fisura con el número de ciclos se ha efectuado un análisis por elementos finitos de la geometría en 3D y se ha obtenido el factor de intensidad de tensiones (FIT) en varios puntos del frente de fisura. Con el FIT en varios puntos del frente de la fisura y la Ley de Paris del material se ha simulado la evolución de la forma de la fisura con el número de ciclos, en las probetas punzonadas y taladradas, y los resultados se han comparado con las observaciones fractográficas obtenidas mediante los ensayos experimentales efectuados en varios niveles de carga.

Abstract. This paper present a 3D-simulation of the fatigue behaviour of punched and drilled plates subjected to tension load. As initial data it has been determined experimentally the mechanical behaviour and the parameters of the Paris law for the material by the test of compact specimens CT. A 3D-FE analysis has taken place in order to obtain the stress intensity factor (FIT) for all the crack front points and to simulate the fatigue crack shape evolution with the number of cycles. With the FIT for all the points of the crack front and the Paris Law of the material the evolution of the crack shape with the number of cycles has been simulated, in the punched and drilled plates. The results have been compared with experimental fractographic observations for several load levels.

1. INTRODUCCIÓN

Para predecir adecuadamente el comportamiento en fatiga de chapas taladradas o punzonadas es necesario desarrollar simulaciones numéricas que sean capaces de predecir la evolución de la fisura con el número de ciclos [1,2]. Si embargo la mayoría de los trabajos reducen el problema del crecimiento de fisuras en bordes de taladros, de un problema real con infinitos grados de libertad, a un problema simplificado con dos grados de libertad al suponer una determinada forma del frente de la fisura [3,4].

Los numerosos ensayos experimentales desarrollados muestran que la forma cuarto-elíptica considerada en la mayoría de los estudios no es suficientemente adecuada para describir la evolución de la fisura desde su inicio hasta la rotura de la pieza.

El presente artículo presenta un análisis 3D por elementos finitos para describir paso a paso el crecimiento de la fisura, sin asumir ninguna forma del frente durante su desarrollo, sino que es el propio factor de intensidad de tensiones en cada punto el encargado de definir cual es la forma actual del frente de la fisura.

Los resultados de la predicción de vida y de forma del frente de la fisura son comparados con las observaciones experimentales, obteniendo buenas correlaciones y extrayendo importantes conclusiones acerca de la evolución de la fisura en este tipo de geometría.

2. GEOMETRÍA Y MATERIAL

Los ensayos de fatiga se han desarrollado sobre chapas punzonadas y taladradas, de 15 mm de espesor, 45 mm de anchura y un taladro de 15 mm. La altura de la chapa es suficientemente grande (200 mm) para garantizar que no exista influencia del tamaño en la concentración de tensiones del borde del taladro. En la Figura 1 se presenta un esquema de dicha geometría.

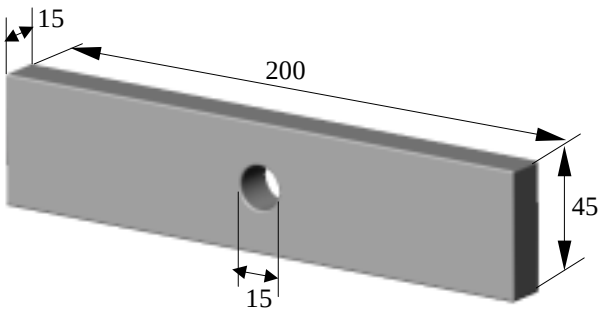


Fig. 1. Dimensiones de las chapas para los ensayos de fatiga (mm)

El material de la chapa es un acero 355N, con un límite elástico E=200 GPa, y un coeficiente de Poisson de 0.28. En la Figura 2 se presenta la curva correspondiente a la Ley de Paris, necesaria para simular el crecimiento de grieta, con el siguiente ajuste,

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m = 2 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta K_I^{3.1} \qquad (1)$$

donde da/dN viene expresado en (m/ciclo) y ΔK_I en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

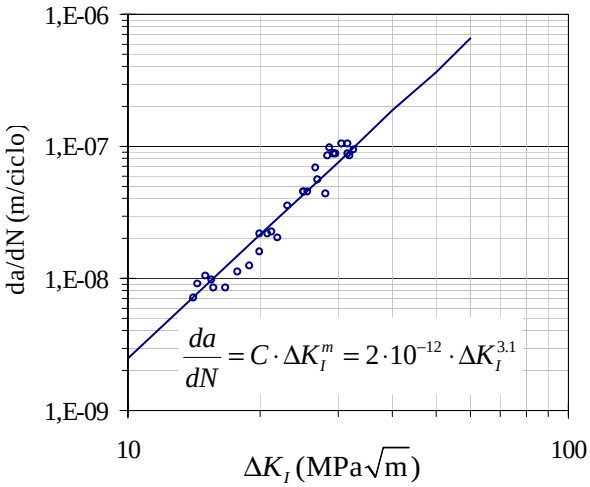


Fig. 2. Ley de Paris correspondiente al acero 355N.

3. OBSERVACIONES FRACTOGRAFICAS

Los ensayos de fatiga se realizaron con una máquina servohidráulica Instron 8500 a 15 Hz y con diferentes amplitudes de carga. Las probetas fueron instrumentadas con dos galgas extensiométricas en cada lado de la probeta y un sensor de emisión acústica.

En la Figura 3 se presenta la sección de rotura de un ensayo de la chapa punzonada, sometida a esfuerzos de fatiga en la dirección perpendicular al plano de la Figura. Un estudio detallado de la textura del plano de rotura revela que el inicio de la fisura tiene lugar en la zona situada aproximadamente donde la cortadura del punzón deja de manifestarse.

Una vez iniciada la fisura en este punto crece hasta alcanzar la cara exterior plana más cercana, que será, en el caso presentado, la cara del punzón. Una vez alcanzada esta cara la fisura progresa según se presenta en el esquema de la Figura 3, hasta alcanzar un tamaño crítico que provoca la rotura final de la pieza.

Cuando la iniciación de la fisura es centrada, lo cual ocurre en pocas ocasiones, el frente de fisura alcanza los bordes en el mismo instante, por lo que la fisura se hace pasante en todo el espesor.

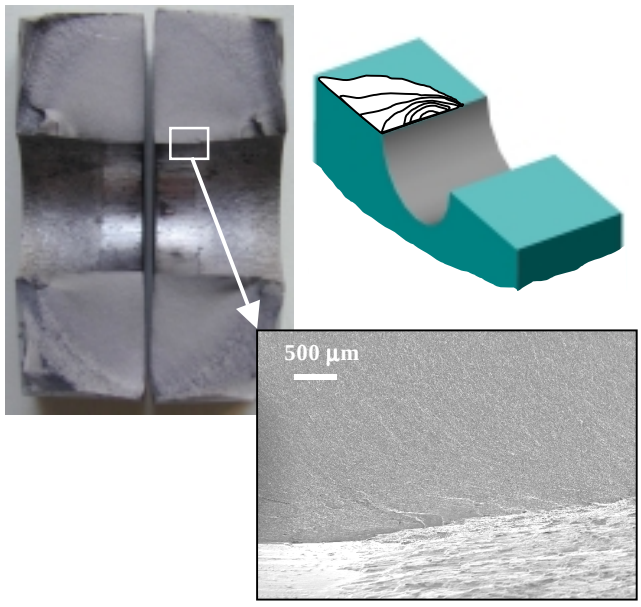


Fig 3. Evolución observada para el frente de la fisura para la probeta A4 del material 355N.

4. METODOLOGIA PARA LA PREDICCIÓN DE LA VIDA A FATIGA

Para obtener la evolución de una fisura con el número de ciclos ha sido necesario, en primer lugar, conocer el factor de intensidad de tensiones (FIT) en todos los puntos del frente de fisura [5,6]. La fisura crecerá más rápidamente en la zona en la que el FIT sea más elevado. A partir de la ley de Paris podemos conocer la velocidad de crecimiento en cada punto.

Si fijamos un salto para el número de ciclos en todos los puntos del frente ($\Delta N = cte$) podemos estimar lo que ha avanzado cada punto del frente de fisura $\Delta a(\alpha)$. También podemos controlar el avance de un punto, estimar el número de ciclos para ese avance, y calcular el avance del resto de punto tras ese número de ciclos.

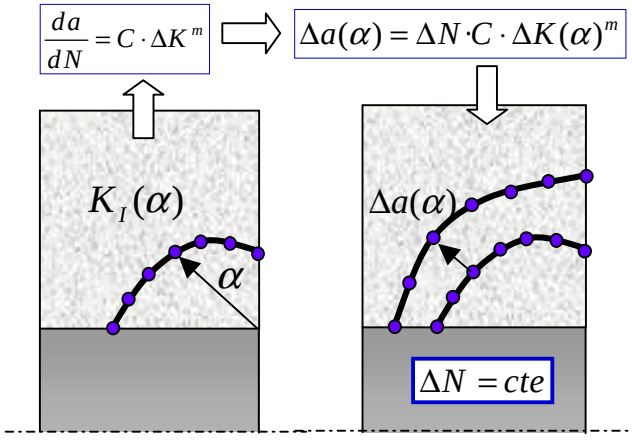


Fig. 4. Metodología para predecir el avance de la fisura a partir del FIT en cada punto y de la Ley de Paris.

De esta forma el programa sitúa los nuevos puntos del frente de fisura, vuelve a mallar la geometría y realiza un nuevo análisis para determinar el factor de intensidad de tensiones en cada punto, base para estimar la forma del siguiente paso.

Es necesario comentar, que la convergencia numérica requiere de un elevado número de pasos para poder integrar correctamente la Ley de Paris, y conseguir una simulación de la propagación estable. En nuestro caso se ha controlado el avance del punto de la fisura correspondiente al máximo de $K_I(\alpha)$, limitando su valor, y en consecuencia el resto de puntos del frente de fisura tendrán un avance menor (al tener un K_I menor). Para los tamaños de fisura pequeños se han dado incrementos máximos de fisura, entre paso y paso, del orden de la quinta parte de la fisura, y para fisuras grandes de 0.1 mm de avance máximo en cada paso.

Los parámetros con mayor influencia en la predicción del comportamiento en fatiga son: (a) el lugar de iniciación de la fisura que se ha obtenido a partir de las observaciones experimentales, (b) la forma de la fisura inicial, difícil de medir y, posiblemente, diferente para cada uno de los ensayos y, (c) el tamaño de esta fisura inicial, también es difícil de medir experimentalmente y causante del carácter estocástico de la fatiga al ser sensiblemente diferente de una probeta a otra.

El efecto de la forma inicial de la fisura se estudiará en el apartado siguiente. En cuanto al tamaño del defecto o fisura inicial, no resulta adecuado proporcionar un único valor del tamaño de defecto, sino un intervalo en el cual se sitúen todos los resultados experimentales. A partir de la simulación del número de ciclos hasta rotura se ha determinado el rango en el que se encuentra este tamaño de defecto inicial. En el apartado 7 se estudia este aspecto con profundidad.

Una vez estimada la vida en fatiga para un nivel de tensión determinado será necesario efectuar el mismo análisis para distintos niveles de carga y obtener de esa forma las curvas S-N o amplitud de tensión frente al número de ciclos para la geometría considerada.

5. EFECTO DE LA FORMA INICIAL DE LA FISURA

La simulación numérica desarrollada indica que el efecto de la forma inicial de la fisura pierde importancia a medida que la fisura va creciendo. En la Figura 5 se presenta la evolución de la fisura para dos formas iniciales de tamaño de fisura, la primera un arco circular con una relación de aspecto base/altura de 4 y la segunda con forma semicircular. La fisura tiende a evolucionar hacia un frente en el cual el factor de intensidad de tensiones se hace prácticamente constante en todos los puntos del frente de fisura [6]. Esta estabilidad en el frente se consigue en muy pocas etapas, lo cual indica que la forma inicial de la fisura no tiene excesiva importancia a la hora de estimar el número de ciclos.

Para los posteriores análisis se ha considerado una forma de fisura inicial semicircular, dado que esta tiene a evolucionar hacia su forma natural de crecimiento. Este hecho es de especial importancia, dado que eliminamos el efecto de un parámetro difícil de medir y cuantificar.

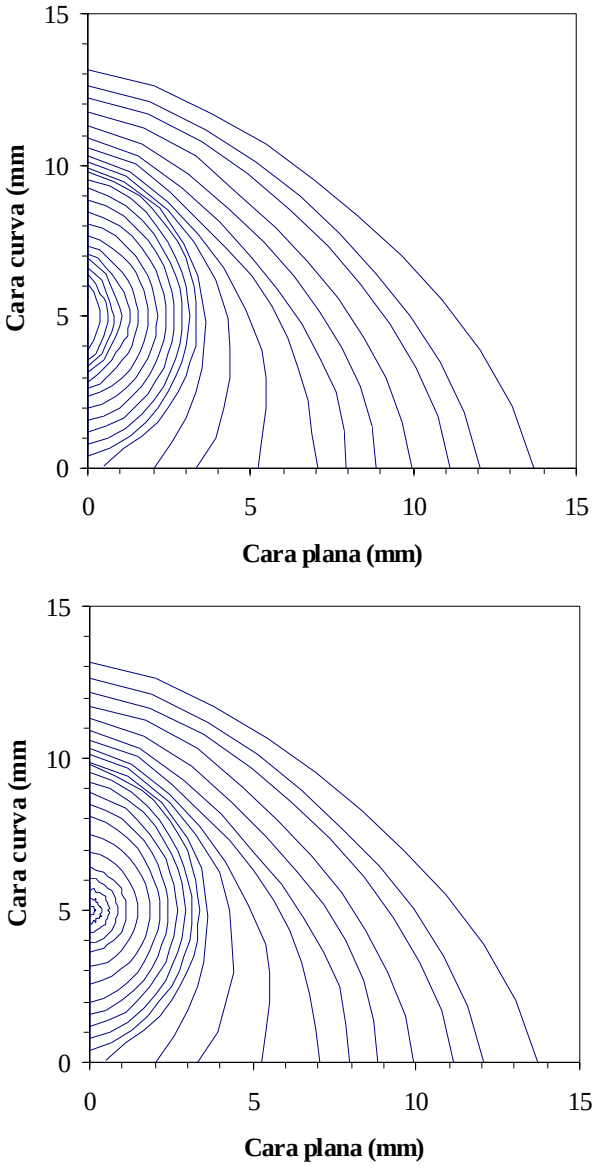


Fig 5. Evolución del frente de fisura para dos formas de fisura inicial.

6. EFECTO DEL LUGAR DE INICIACION

El lugar de iniciación si que presenta una mayor importancia en el desarrollo de la fisura y en la simulación del número de ciclos. Se ha comprobado, que cuando esta iniciación se produce centrada en el espesor esta tiene a hacerse pasante en todo el espesor.

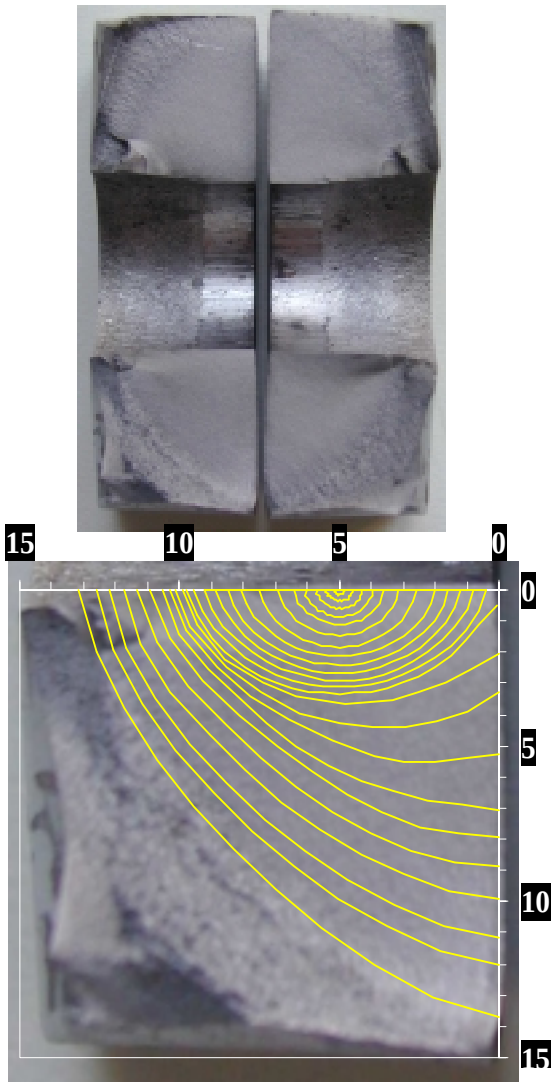


Fig. 6. Evolución de una fisura iniciada en el centro del espesor de probeta.

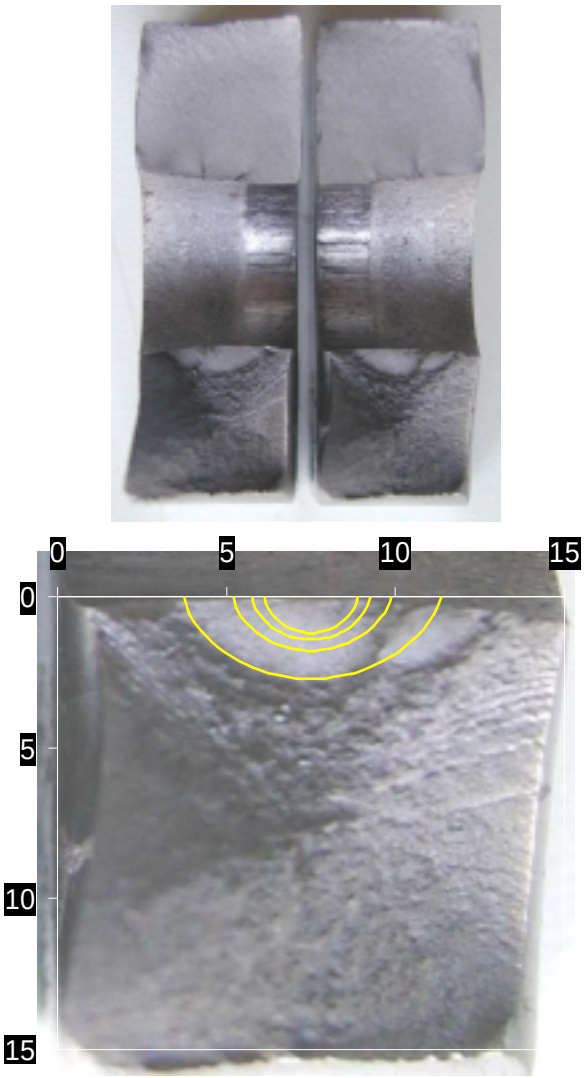


Fig. 7. Evolución de una fisura iniciada entre el centro del espesor y el borde la cara plana de probeta.

Por el contrario cuando la iniciación se produce más cercana a uno de los bordes, crece hasta alcanzar dicho borde, momento a partir del cual su progreso en esquina es mucho mayor, debido a que el factor de intensidad de tensiones se hace mucho mayor en el punto de la cara plana a la cual emerge la fisura.

A partir de las observaciones experimentales se ha comprobado que la iniciación tiene lugar, mayoritariamente en la zona de transición entre el corte del punzón y la zona de desgarro, situada a 5 mm aproximadamente de la cara por la que incide el punzón. Para la posterior simulación numérica utilizaremos dicha zona de iniciación.

En las Figuras 6 y 7 se presenta el crecimiento simulado y experimental de fisuras iniciadas en un punto centrado en el espesor o en una zona intermedia entre el centro y el borde del espesor. Se han eliminado pasos intermedios para una mayor claridad en la presentación de la evolución, que ha sido realizada con 150 pasos.

Como se puede observar las diferencias entre la forma adoptada en las primeras etapas no son apreciables. El factor de intensidad de tensiones es prácticamente el mismo en ambas geometrías. Solo cuando las fisuras se acercan al borde comienzan a manifestarse algunas diferencias entre los FIT de ambas fisuras, condicionados por la presencia del borde de la geometría, que aumenta el estado tensional de la zona.

Si las distancias entre puntos de iniciación no son elevadas, la evolución de la fisura tiende a desarrollarse de forma similar, y no se detectan significativas diferencias en el número de ciclos total.

7. SIMULACION DE LAS CURVAS S-N

A partir de la simulación del crecimiento de fisura sobre base de la Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL) se pueden estimar los ciclos necesarios para poder hacer crecer la fisura desde un valor inicial, a_0, hasta el valor final observado experimentalmente. Dado

que el crecimiento observado en la fisura final es elevado, en las etapas finales se puede producir una plastificación generalizada del ligamento residual, lo que impide la posibilidad de limitar el crecimiento de la fisura al factor de intensidad de tensiones crítico, dado que la MFEL deja de ser aplicable.

Sin embargo, la mayoría de los ciclos que soporta la pieza tienen lugar en las primeras etapas de propagación cuando la fisura es suficientemente pequeña. En la Figura 8 se presenta la evolución del número de ciclos, frente al tamaño de la fisura medido como se esquematiza en la misma figura. Se puede observar como en las últimas etapas la fisura crece rápidamente, empleando muy pocos ciclos relativos a las fisuras pequeñas. De hecho el número de ciclos hasta la rotura, desde que la fisura se hace pasante a la cara plana apenas tiene influencia en el número de ciclos acumulado.

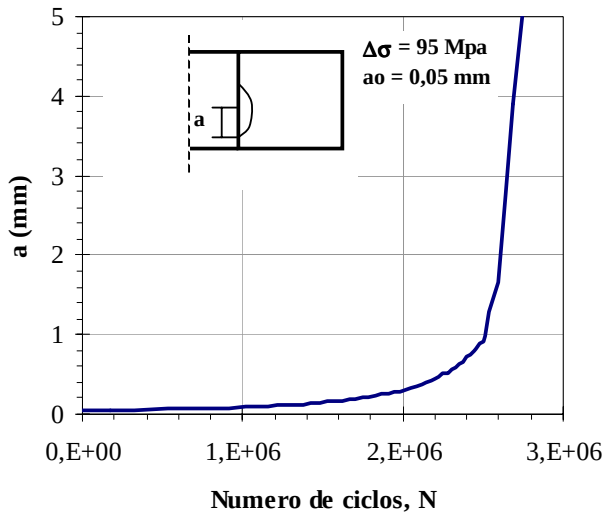


Fig. 8. Evolución del número de ciclos frente al tamaño de la fisura.

Con el objetivo de poder determinar las curvas S-N de la geometría considerada, se ha efectuado la simulación numérica de la geometría, aplicando la Ley de Paris presentada en la ecuación (1), bajo distintos niveles de carga desde 300 MPa hasta 60 MPa.

Los análisis se han desarrollado partiendo de una fisura inicial semicircular de radios a_0=0.025 mm, 0.05 mm, y 0.1 mm respectivamente. La posición de la fisura se ha situado a 5 mm de la cara plana por la que entra el punzon.

En la Figura 9 se presentan los resultados correspondientes a las probetas punzonadas. Se puede observar como una tamaño de defecto de inicial entre 25 y 50 μm resulta suficiente adecuado para predecir el comportamiento de toda la curva S-N. Hay que destacar que para valores elevados de tensión la plastificación que se produce en la fisura hace que no sea utilizable la MFEL, por lo que los resultados obtenidos están limitados a un número de ciclos presentan están limitados a un número de ciclos inferior a 100.000.

Por su parte, en la Figura 10 se presentan los correspondiente resultados obtenidos para las probetas taladradas. En este caso, la operación es mucho menos severa para el material, y se puede observar que esto se traduce en un menor tamaño de defecto inicial , situado en torno a 5 μm , valor 10 veces inferior al obtenido para las probetas punzonadas.

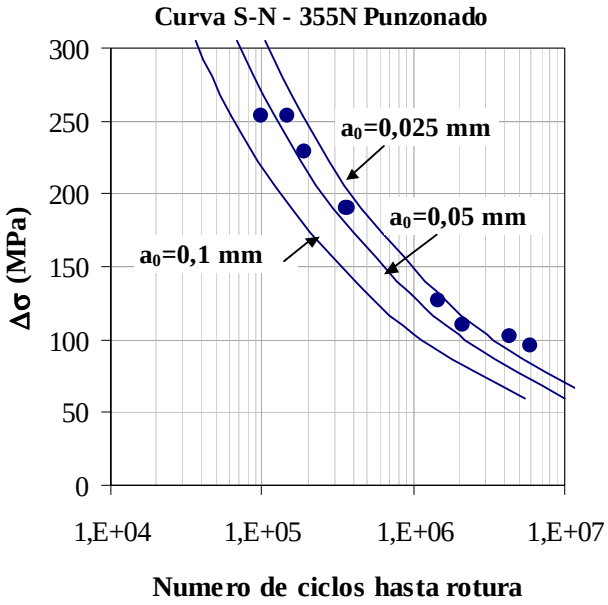


Fig. 9. Curva S-N experimental y simulación por EF, para el material punzonado.

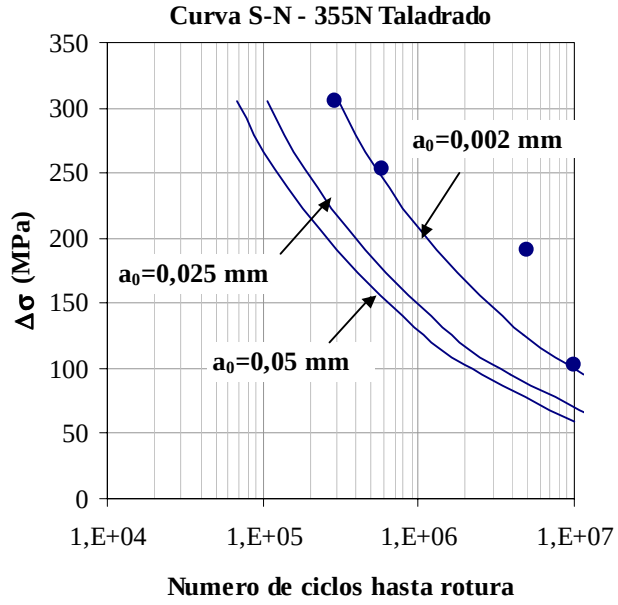


Fig. 10. Curva S-N experimental y simulación por EF, para el material taladrado.

A partir de una fisura inicial de 0.05 mm se ha simulado todo el proceso por elementos finitos. Para las fisuras inferiores los problemas numéricos comienzan a manifestarse. Sin embargo, el problema queda resuelto dado que para fisuras pequeñas, y una fisura menor de 0.05 mm lo es, el FIT es el correspondiente a una fisura semicircular (o semielípta) en un solido semiinfinito [7], con lo cual se puede iniciar el cálculo por EF con una serie de ciclos correspondientes a la integración analítica entre la fisura inicial (por ejemplo 0.02 mm) y la de 0.05 mm.

Es necesario tener presente que la operación de punzonado genera un gran deterioro en el material situado en las inmediaciones del punzonado. Para las probetas analizadas, la zona que se ve afectada es de 1-2 mm, en la cual se produce una elevada plastificación del material y pueden aparecer tensiones resduales. En principio todos estos efectos quedarías incluidos en el tamaño de defecto inicial, el cual es un indicativo del daño o deterioro local en la zona de iniciación.

Se puede observar en general una buena correlación entre los resultados numéricos y los experimentales. En las probetas taladradas únicamente se dispone de cuatro ensayos, lo cual puede no reflejar suficientemente la dispersión propia de los ensayos de fatiga.

8. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio por elementos finitos del proceso de crecimiento de fisuras por fatiga de chapas punzonadas y taladradas. Para ello, se ha aplicado la MFEL, obteniendo el factor de intensidad de tensiones en todos los puntos del frente de fisura, y a partir de la Ley de Paris se ha estimado la nueva posición de los puntos del nuevo frente de fisura. Se ha implementado un procedimiento para simular mediante EF este crecimiento paso a paso desde una fisura inicial hasta la rotura de la pieza.

Se ha analizado el efecto de la forma y posición de la fisura inicial. Se ha comprobado como la forma de la fisura tiene relativamente poca importancia en la simulación del crecimiento, dado que el factor de intensidad de tensiones tiende a equilibrar la forma, adoptando lo que podemos denominar como forma estable del frente de fisura. En consecuencia, para el resto de la simulaciones se ha partido de una forma semicircular para la fisura inicial.

Realizando la simulación para distintos niveles de carga se ha obtenido la curva S-N, correspondiente al número de ciclos para rotura. Dado el carácter aleatorio del proceso de fatiga, fundamentalmente debido al tamaño de defecto inicial, se ha efectuado dicha simulación para diferentes tamaños de fisura inicial. De estas forma se puede establecer el tamaño de defecto que origina el proceso de fatiga, para chapas punzonadas y taladradas.

Este análisis permite su aplicación al estudio del comportamiento en fatiga de nuevas geometrías, como chapas con varios taladros o en otras condiciones de punzonado, de tal forma que permitan generar finalmente modelos de comportamiento de este tipo de geometrías punzonadas o taladradas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación obtenida a partir de la colaboración con el Laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de Cantabria, en el proyecto “Criteria Performance for Cold Formed Structural Steels” (ColdFoss).

REFERENCIAS

[1] Lin X.B., Smith R.A.: “Stress intensity factors for corner cracks emanating from fastener holes under tension”. Engineering Fracture Mechanics 62. 1999, pp. 535-553.

[2] Shin CS. “Some aspects of corner fatigue crack growth from holes”. International Journal of Fatigue 1991;13:233±40.

[3] Newman Jr J.C., Raju I.S.: “Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads”. Atluri SN, editor Computational methods in the mechanics of fracture, vol 2, 1986 chap 9.

[4] Shin CS.: “The stress intensity of corner cracks emanating from holes”. Engineering Fracture Mechanics 1990;37:423±36.

[5] Ansys 6.1. Manual de referencia.

[6] Aragón A, Alegre J.M., Gutiérrez-Solana F.: “Cálculo de los Factores de Intensidad de tensiones en fisuras iniciadas en los bordes de taladros de chapas sometidas a tracción”. Anales de la Mecánica de Fractura. Vol XX.

[7] Murakami Y.: “Stress Intensity Factors Handbook. Vol 4”. The Society of materials Science, Japan. 2000.