

Daniel Aquino^{1,3}; Nelson Alvarez Villar^{1,2}; Eduardo Ayllón^{1,3}; Francisco Agüera^{1,2}; Víctor Fierro^{1,3}¹ CITEFA, Departamento Ciencia y Técnica de Materiales (DEIMAT); ² Universidad de la Marina Mercante (UdeMM-DICyT);³ E.S.T, Escuela Superior Técnica del Ejército Argentino.

Modelización de fisuras estacionarias en materiales dúctiles*

Resúmen

En el presente trabajo se simula el estado de cargas correspondiente a un ensayo de fractomecánica en probetas normalizadas con fisuras estacionarias, utilizándose para ello el programa de elementos finitos ABAQUS/Standard.

Las probetas se modelan con distintos tamaños de fisuras con el objeto de obtener un trazado de carga-desplazamiento para cada caso. Los tamaños de fisuras considerados se extienden entre la fisura inicial, obtenida por fatiga, y la final, correspondiente a la fractura de una probeta real ensayada previamente.

Las propiedades del material han sido obtenidas del ensayo de tracción, considerando los periodos elástico y plástico de la curva ya que la carga aplicada supera el límite de elasticidad del material.

Se modeliza en dos dimensiones y se considera no linealidad geométrica. El mallado se realiza con elementos cuadráticos de ocho nodos.

La obtención de las curvas carga-desplazamiento para distintos tamaño de fisuras resultan útiles para la aplicación de métodos directos de calculo de integral J.

Palabras clave: Modelización, Fractomecánica, Elementos Finitos.

1. Introducción

El parámetro JIC es aceptado convencionalmente en Mecánica de Fractura Elastoplástica como el punto de inicio de la propagación de fisuras estables. Este valor puede obtenerse experimentalmente a partir del método de probeta múltiple, que requiere de al menos seis probetas [1], o por el método de probeta única [2], que requiere el registro simultáneo de carga, desplazamiento en la línea de carga y longitud de fisura.

Una alternativa a estos métodos consiste en la evaluación del valor de la integral J por métodos energéticos, por ejemplo de la *energy release rate*

[3], a partir del trazado de los gráficos de carga, desplazamiento en la línea de carga por simulación del ensayo con el método de elementos finitos. El uso de esta técnica permite reducir la necesidad de muestras para su ensayo, pero requiere de un detallado análisis previo a los fines de obtener resultados comparables a los obtenidos en ensayos normalizados.

La modelización por elementos finitos, nos permite una gran flexibilidad en el armado del modelo en cuanto a tipos de elementos, cantidad, distribución, etc. y podemos tener distintos resultados en función del modelo realizado. El uso de una curva obtenida por ensayo nos permite el ajuste del modelo a condiciones más representativas del material.

El objetivo del presente trabajo es mostrar el procedimiento seguido en la obtención de las curvas carga, desplazamiento en la línea de carga, sin propagación de las fisuras, por medio de un programa de elementos finitos, los cuales son utilizados en otra ins-

* Trabajo presentado en el Congreso CONAMET/SAM 2006 - Universidad de Chile, Santiago de Chile.

rancia para el trazado de la curva JR del material [4].

2. Procedimiento Experimental

2.1 Datos experimentales

Los datos utilizados corresponden a cuatro probetas de dos geometrías, compacta C(T) y de flexión SE(B) construidas en un acero de mediana resistencia A572 según norma ASTM E1820-O5a. Estas fueron ensayadas oportunamente hasta la rotura, obteniendo el diagrama carga desplazamiento en la línea de carga de cada probeta [5]. En estas probetas se realizaron por aplicación de cargas cíclicas una fisura inicial, y luego por aplicación de cargas monotónicas, se produjo el crecimiento estable de las mismas hasta la fractura final.

Para determinar la curva de tensión-deformación del material se ensayó una probeta de tracción, fabricada en el mismo material, según norma ASTM E8M-04. El gráfico puede verse en la Figura 1. Los datos corresponden a la tensión verdadera y deformación logarítmica del material.

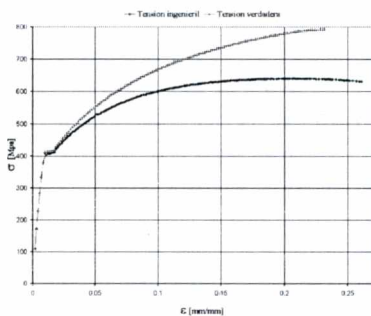


Figura 1. Diagrama tensión deformación del A572.

La tabla de valores de tensión deformación verdadera se ingresaron como características plásticas del material en el programa.

2.2 Modelización de la geometría

La modelización y cálculo de elementos finitos se realizó con el programa ABAQUS/Standard.

Se crearon dos partes, una deformable para modelizar la probeta y otra analítica rígida, para modelizar los apoyos y punto de aplicación de la carga estática. Los modelos de las probetas se crearon en dos dimensiones (2D), teniendo en cuenta un espesor de 21,5 mm para la probeta de flexión y de 19 mm para la probeta compacta. Las medidas son indicadas en la figura 2. Se realizaron las particiones necesarias para variar la densidad de elementos en el momento de discretizar la superficie, teniendo en cuenta que las mayores tensiones estarán alrededor de la fisura. [Figura 3].

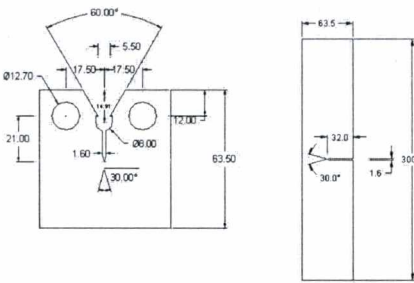


Figura 2. Geometría de las probetas

Los pernos en las probetas compactas y los apoyos en las de flexión se modelaron como superficies analíticas rígidas, para evitar la concentración de tensiones que resultaría de restringir los grados de libertad de los nodos directamente. Este tipo de superficies se comportan como cuerpos rígidos y

están asociados a un nodo de referencia, al cual se restringieron los grados de libertad coherentes con los vínculos del problema real.

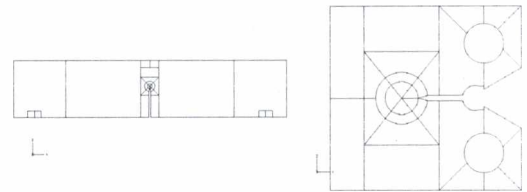


Figura 3. Modelo con particiones.

2.3 Modelización de la Fisura

La fisura aguda, creada por fatiga en la probeta real para actuar como concentrador de tensiones, se modeló en la geometría como una línea mas de partición y luego se definió como fisura en la opción SEAM [8,9] del programa, de tal modo que al realizar la discretización de la superficie, los nodos de los elementos a cada lado de la línea quedarán libres, y la línea de fisura pueda comportarse como un plano de separación del material.

Para obtener una buena representación de las tensiones en el extremo de la fisura al realizar la discretización se ha seleccionado el modo que permite densificar la cantidad de elementos y nodos, en una dirección preferencial, reduciendo su tamaño e incrementando su cantidad, en nuestro caso, hacia el centro de la fisura. Podemos mencionar, por ejemplo que para la probeta 1 con el tamaño inicial de la fisura, 2,55 mm, el elemento mas pequeño tiene un lado de 1,19 e-5 mm.

Con centro en el extremo de la misma realizamos una partición en forma circular, usando como radio la longitud de la fisura [Figura 4].

Nos quedaron determinadas dos porciones iguales entre sí a los lados de la fisura, que indicamos como numero 1, y otras tres en los cuartos restantes, que indicamos como numero 2.

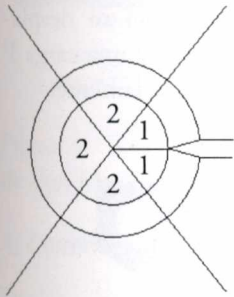


Figura 4.
Fisura.

En el modelo de probeta compacta en el sector 1 se utilizaron 100 elementos con 351 nodos y en el sector 2, 200 elementos con 661 nodos. En total en la circunferencia con radio igual al de la fisura quedaron determinados 2685 nodos.

Sobre los segmentos diagonales que separan las porciones, se colocaron 20 elementos que van reduciendo su tamaño hacia el centro de la partición.

El total de elementos en el modelo de probeta compacta es de 1664, con 5162 nodos.

En las probetas de flexión, en el sector 1 se toman 64 elementos con 233 nodos y en el sector 2, 160 elementos con 533 nodos, el total para toda la probeta es de 2394 elementos cuadriláteros con 7453 nodos, de los cuales 2065 corresponden al área circular central.

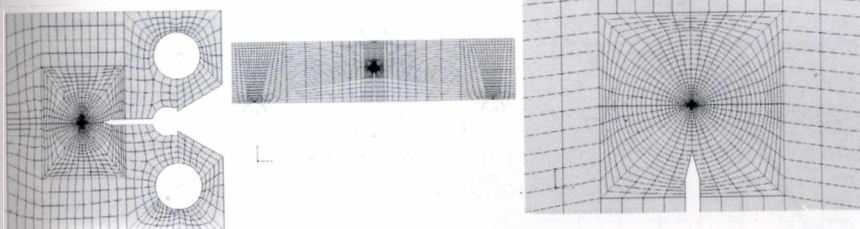


Figura 5. Red discreta de elementos finitos en los modelos.

Se utilizaron elementos cuadriláteros de ocho nodos, con funciones de interpolación de segundo orden, y de integración reducida ya que este tipo de elementos captura las concentraciones de tensión en mejor forma que los elementos de primer orden, y son mas precisos para los casos de flexión que los elementos con interpolación lineal [8,9].

En las probetas compactas la modelización del área circular que rodea la fisura se considero deformación plana, usándose elementos CP8ER, el área restante como sometida a un estado de tensión plana, CPS8R. En la probeta de flexión se considero el área cuadrada como deformación plana y la restante como tensión plana.

2.4 Procedimiento de cálculo

El modelo de elementos finitos a utilizar se prueba con la longitud de fisura inicial F_0 , ajustando por comparación con la curva carga-desplazamiento obtenida en forma experimental. Para hallar el estado de tensión que mejor represente el estado real, se analizó desde un estado completo de deformación plana, hasta una totalidad en tensión plana, seleccionándose un estado intermedio en donde la zona de concentración de la fisura se encuentra en deformación plana y el resto de la probeta se modelizó en estado de tensión plana.

Se hicieron pruebas incrementando la cantidad de elementos, pero los

resultados fueron similares con un gran incremento en el tiempo de ejecución, por lo que se decidió que la cantidad utilizada proporcionaba la mejor relación entre precisión y tiempo de cálculo.

Teniendo en cuenta que el desplazamiento aplicado supera los valores elásticos, ingresando a la zona plástica, se habilitó la opción de no linealidad geométrica para la aplicación de la carga. Esta se aplica como una carga tipo rampa en un tiempo ficticio de 3600 segundos. Si bien no es un análisis dinámico, es necesario para el cálculo establecer un tiempo de aplicación para la iteración de las ecuaciones debido a la no linealidad del problema. ABAQUS/Standard utiliza el método de Newton para resolver ecuaciones de equilibrio no lineales, en donde la solución se obtiene de una serie de incrementos con iteraciones, obteniendo el equilibrio en cada incremento. El incremento de tiempo es variable y determinado por el programa, estableciéndose un mínimo muy pequeño, 0,001 segundo para otorgarle mayor flexibilidad.

Una vez obtenida una curva carga desplazamiento en la línea de carga para la fisura inicial coherente con los resultados experimentales, modificamos la longitud de fisura, y volvemos a efectuar los cálculos con la carga de desplazamiento correspondiente. Todos los demás parámetros permanecen prácticamente invariantes, tipo y cantidad de elementos, distribución y cantidad de nodos, tiempo de aplicación, etc..

Tabla N° 1. Longitudes de fisura de cada probeta.

Fisura [mm]	Flexión		Compacta	
	P1	P4	P2	P3
F ₀	33,43	35,46	25,6	24,45
F ₁	33,57	35,65	25,77	24,65
F ₂	33,71	35,85	25,93	24,86
F ₃	33,85	36,04	26,1	25,06
F ₄	33,99	36,23	26,27	25,27
F ₅	34,13	36,42	26,43	25,47
F ₆	34,27	36,62	26,6	25,67
F ₇	34,41	36,81	26,76	25,88
F _f	34,55	37	26,93	26,08

3. Resultados y discusión

Se aplicó en cada modelo una carga de desplazamiento correspondiente al máximo del ensayo. Se obtuvieron los diagramas de carga y desplazamiento en la línea de carga para las longitudes de fisuras indicadas en la

Tabla 1. Los datos fueron exportados a una planilla de cálculo, para facilitar su procesamiento. En la Figura 6 se ven los gráficos correspondientes a las probetas de flexión y en la figura 7 los correspondientes a las probetas compactas.

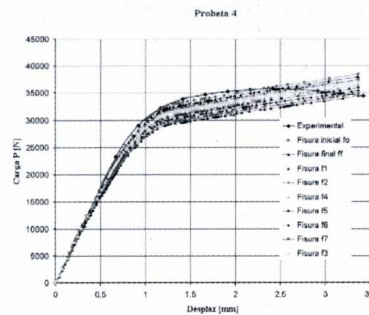
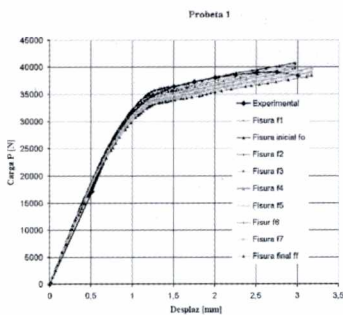


Figura 6. Diagramas de carga-desplazamiento de las probetas de flexión.

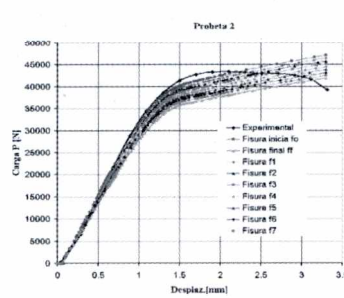
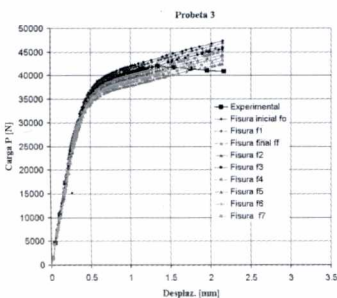


Figura 7. Diagramas de carga desplazamiento de las probetas compactas.

Podemos ver también los estados de tensión en el extremo de las fisuras para cualquier instante de aplicación de la carga, en la Figura 8 vemos las tensiones de Von Mises para la probeta compacta N° 2, con un desplazamiento de 2,3 mm, y una carga P de 43800 N, aproximadamente.

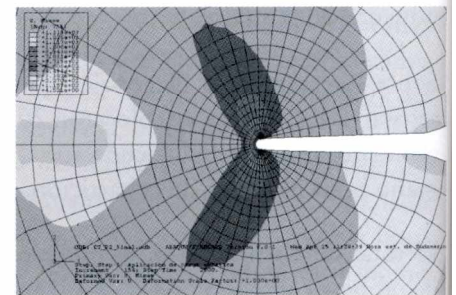
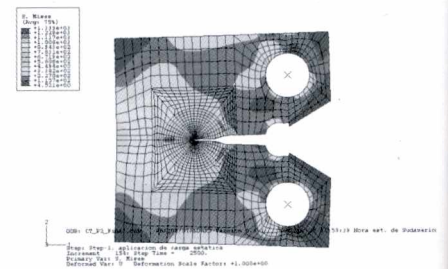


Figura 8. Distribución de tensiones de Von Mises en probeta compacta.

En la figura 9 vemos la distribución de tensiones de Von Mises en la probeta de flexión N°1, con la longitud de fisura inicial F₀, en su condición final de desplazamiento. En este caso hemos quitado la red de elementos finitos para que se vea la forma de la distribución.

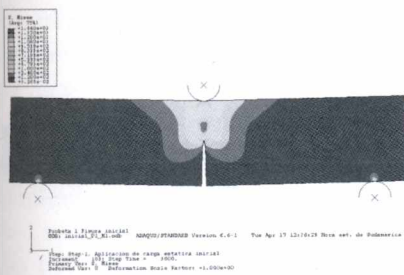
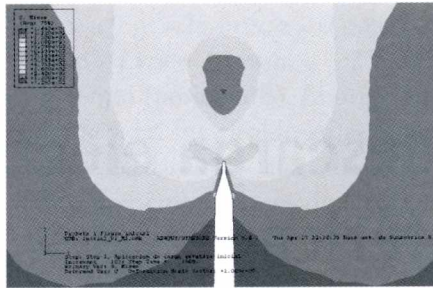


Figura 9. Distribución de tensiones de Von Mises en probeta de flexión.

4. Conclusiones

El método aplicado constituye una alternativa de uso de los programas de elementos finitos en la determinación de parámetros de resistencia de los materiales elastoplásticos, combinado con métodos analíticos. Se ha hecho una simplificación del problema al considerarlo plano, con un estado entre tensión plana y deformación plana. Se pudo determinar la ley de crecimiento de fisura estable P - a y los resultados obtenidos han sido utilizados para el trazado de la curva J - R del material por medio del método energético [4], obteniendo valores consistentes con el ensayo fractomecánico.

Podemos decir que la respuesta del modelado en este aspecto ha sido



satisfactoria, creando perspectivas de análisis futuras, entre otras, el estudio de las tensiones en el frente de fisura, comportamiento del modelo con otros materiales. Un estudio posterior en tres dimensiones podría dar una mejor definición del estado tensional de las probetas, aunque con mayor complejidad en su ejecución.

Referencias

1. J. BEGLEY y J. LANDES, "The influence of Specimen geometry on JIC", "Fracture Toughness", STP 514, ASTM, Philadelphia, (1972).
2. ASTM E1820 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
3. T. S. BYUN, B. S. LEE, Y. J. HYUN, y J. H. HONG, "An Iteration Method for Directly Determining J-Resistance Curves of Nuclear Structural Steels," Journal of Materials Science, 34, 2039-2047 (1999).
4. N. ALVAREZ VILLAR, D. AQUINO, A. IORIO, V. FIERRO, F. AGÜERA, y E. AYLLÓN, "Evaluación de la resistencia a la propagación estable en fisuras", Jornadas SAM/CONAMET (San Nicolás), 2007, remitido.
5. N. ALVAREZ VILLAR, V. FIERRO, F. AGÜERA, E. CHOMIK y A. IORIO, "Aplicación de métodos directos para la evaluación de tenacidad a la fractura", Jornadas SAM/CONAMET-MEMAT (2005), Mar del Plata, Octubre de 2005
6. N. ALVAREZ VILLAR, D. AQUINO, F. AGÜERA, V. FIERRO y A. IORIO, "Obtención de Curvas J - R por métodos directos", 6° Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales, Jornadas SAM/CONAMET (2006), Santiago de Chile, Noviembre de 2006.
7. ABAQUS/CAE version 6.6. User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 2005.
8. ABAQUS/CAE versión 6.6. Analysis User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 2005.