

Nelson Alvarez Villar^{1,2}, Daniel Aquino¹, Antonio Iorio³, Víctor Fierro¹, Francisco Agüera^{1,2}, Eduardo Ayllón¹¹ CITEFA, Departamento Ciencia y Técnica de Materiales (DEIMAT); ² Universidad de la Marina Mercante (UdeMM-DICyT);³ CNEA, CAC.

Evaluación de la resistencia a la propagación estable de fisuras*

Resumen

El estudio de la resistencia a la propagación de fisuras en materiales dúctiles tiene importancia creciente en el área de la ingeniería.

La Mecánica de Fractura Elastoplástica (EPFM) se requiere en buena parte de las situaciones de diseño donde el modo de falla es dúctil, con propagación estable previa a la fractura.

Las técnicas disponibles basadas en la curva de resistencia J-R están en discusión en varios aspectos, particularmente el desarrollo de procedimientos de probeta única para la caracterización de los materiales. Dentro de estos últimos, estudiamos especialmente los métodos directos.

En este trabajo se analiza la aplicación de técnicas basadas en la extensión de la teoría de Griffith a materiales elásto-plásticos. La curva J-R se obtiene a partir de la curva carga-desplazamiento obtenida en ensayos de laboratorio y un sistema de curvas estacionarias realizadas por elementos finitos.

Los datos del material corresponden a un acero de mediana resistencia (A572) y las probetas son tipo C(T) y SE(B).

Los resultados se comparan con los obtenidos mediante métodos estandarizados.

Palabras clave: Integral J, Curva J-R, métodos directos.

1. Introducción

En los materiales dúctiles, la fractura de componentes conteniendo fisuras puede presentar propagación estable precediendo la inestabilidad.

La Integral J es el parámetro fracto-mecánico más utilizado para caracterizar la tenacidad a la fractura de los materiales metálicos. De la misma manera, las curvas J-R constituyen una herramienta básica para evaluar la integridad de estructuras y componentes mecánicos.

La respuesta del material en estructuras y componentes se infiere a partir de valores particulares de Integral J, definidos convencionalmente, como

el correspondiente al inicio de la propagación estable, J_{IC} .

El ensayo propuesto originalmente por Landes y Begley [1] para determinar J_{IC} requiere un mínimo de seis probetas. Por razones de costo y disponibilidad de material se desarrollaron ensayos de probeta única que permitiesen obtener la curva J-R.

En nuestro caso nos ajustamos a los procedimientos establecidos por la norma ASTM E1820-05[2]. Los métodos de probeta única requieren una medición simultánea de carga, desplazamiento en la línea de carga y longitud de fisura durante el ensayo. Los métodos más utilizados para estimar la longitud de fisura durante el ensayo son *compliance* elástica y caída de potencial. Las probetas con uso más frecuente son flexión en tres puntos SE(B) y compacta C(T), que son probetas tipo flexión y de alto *constraint*.

Dos áreas de investigación, aún no resueltas satisfactoriamente, se aplican a resolver la transferencia de los

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

resultados de ensayos de laboratorio a situaciones de diseño y la realización de ensayos en condiciones tales que no son aplicables los métodos estandarizados de probeta única. Por ejemplo: alta velocidad de carga, medio agresivo, etc.

Cuando los métodos estandarizados de probeta única no son aplicables, se desarrollaron varios métodos denominados directos. Su característica común es que no requieren una medición simultánea de la longitud de fisura, sino que esta es inferida aplicando el principio de separación de carga entre otros modelos [3].

Dentro de esta temática, la norma ASTM ha incorporado la normalización como procedimiento alternativo. La normalización no requiere una medida simultánea de la longitud de fisura durante el ensayo, asumiendo una relación funcional entre carga y desplazamiento plástico normalizado. El método de normalización no puede aplicarse a materiales con baja ductilidad ni que presenten importante propagación estable con bajo desplazamiento plástico en la línea de carga [4].

En este trabajo estudiamos dos alternativas. Un método gráfico-analítico y un análisis basado en la expresión de Integral J basada en la definición de *energy release rate*. En ambos casos se requiere únicamente el registro carga-desplazamiento en la línea de carga obtenido durante los ensayos.

Iorio [5] presentó un procedimiento sencillo para determinar la misma curva de resistencia. Trabaja sobre la curva carga-desplazamiento obtenida en los ensayos y determina gráficamente el inicio de la propagación

estable. En base a la longitud de fisura final, debe proponerse una ley de crecimiento de fisura que permite evaluar la Integral J en cada punto de la curva experimental.

Otra posibilidad estudiada en este trabajo se basa en la extensión del análisis de energía de Griffith a fractura dúctil mediante la aplicación de la definición de Integral J basada en la *energy release rate* [6]. Al mismo tiempo, trabajamos con expresiones consistentes con la teoría de la deformación en plasticidad [7].

Los procedimientos para inferir la longitud de fisura durante los ensayos, son válidos desde el punto de vista práctico en tanto sean conservativos. Hay que tener presente que, todos los métodos pueden verificarse a partir de la medición de la longitud final de fisura y/o a partir de ensayos de probeta múltiple.

Para aplicar el método de *compliance* elástica se requiere equipamiento para una medición precisa de la fuerza y desplazamiento en la línea de carga durante las descargas, que debe complementarse con ajustes en el procedimiento base (seleccionando parámetros tales como nivel de descarga, velocidad, etc.). Por otra parte, estrictamente, la formulación de Integral J sólo se aplica cuando la carga se incrementa monótonicamente, ya que se supone que el material cumple con elasticidad no lineal.

Por esta razón, se busca trabajar directamente con la curva carga-desplazamiento obtenida en ensayos.

En este trabajo tomamos como referencia el método de *compliance* elástica y comparamos los resultados

con los obtenidos mediante el método gráfico analítico propuesto por Iorio y el análisis basado en energía complementado con un análisis por elementos finitos. El objetivo de este análisis consiste en corroborar las suposiciones del método gráfico-analítico en cuanto al régimen de propagación estable.

En los siguientes párrafos resumimos los métodos aplicados en este trabajo. También describimos el modelo de elementos finitos para obtener las curvas estacionarias necesarias. Los ensayos corresponden a un acero tipo A572 y se utilizaron probetas con geometrías SE(B) y C(T).

1.1. ASTM-Probeta única

El método de *compliance* elástica desarrollado por la norma ASTM E1820-05 es utilizado en este trabajo como referencia para los métodos alternativos.

Consiste en registrar las variaciones de *compliance* elástica mediante su medición en sucesivas descargas realizadas durante el ensayo (ver Figura 5). Las variaciones en *compliance* sólo pueden atribuirse al crecimiento estable de la fisura.

Las expresiones de la *compliance* para las probetas fractomecánicas, dependientes de la longitud de fisura a_i , están incluidas en la norma ASTM.

Para cada descarga, se cuenta con un punto (P_i, a_i, δ_i) para evaluar J_i .

1.2. Iorio

Iorio desarrolló una técnica gráfico-analítica para la determinación de la curva J-R. El método fue utilizado en varios materiales y sus resultados han

sido comparables con los obtenidos mediante métodos estandarizados y con otros métodos directos [8].

A partir del registro de carga y desplazamiento en la línea de carga durante el ensayo fractomecánico, se obtiene el punto de la iniciación de propagación estable (P_1, δ_1) de la curva $P-\delta$ mediante la intersección de la extrapolación de la línea elástica con la tangente a la carga máxima (P_2, δ_2). La longitud de fisura final se mide al finalizar el ensayo y corresponde al punto (P_3, δ_3). Esto puede observarse en la Figura 1.

A continuación, se estiman las longitudes de fisuras correspondientes a cada punto del registro $P-\delta$ suponiendo una ley de crecimiento, por ejemplo lineal. Finalmente, se evalúa la Integral J en cada punto.

1.3. Energía más curvas estacionarias determinadas por el Método de Elementos Finitos

Mediante el método de elementos finitos se obtuvo un juego de curvas carga desplazamiento de fisuras estacionarias (no propagantes) como se ilustra en la Figura 2. Asumiendo la teoría de la deformación en plasticidad, las curvas estacionarias carga-desplazamiento con longitud a_i , deben interceptar la curva experimental en (P_i, δ_i).

En la Figura 2, se representa además la variación de energía elastoplástica correspondiente a un incremento de la longitud de fisura $\Delta a_i = a_{i+1} - a_i$.

Sobre esta base, evaluamos la Integral J en cada punto (P_i, a_i, δ_i).

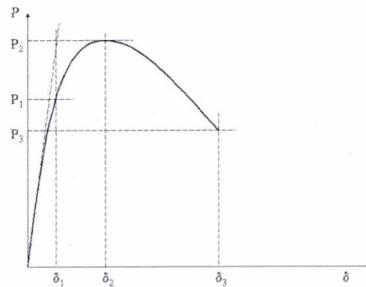


Figura 1. Aplicación del método gráfico-analítico

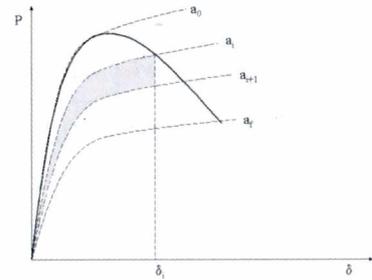


Figura 2. Aplicación del método basado en energía

2. Modelo de Elementos Finitos

Para la determinación del juego de curvas con fisuras no propagantes presentado en el párrafo anterior, se utilizó el programa ABAQUS/Standard [9].

Se modelaron en 2D las probetas ensayadas, como se indica en la Figura 3. El total de elementos en el modelo de probeta compacta es de 1664, con 5162 nodos, siendo 2685 nodos ubicados en el área de la fisura. En las de flexión es de 2394 elementos cuadriláteros con 7453 nodos, de los cuales 2065 corresponden al área adyacente a la fisura.

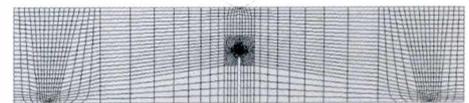
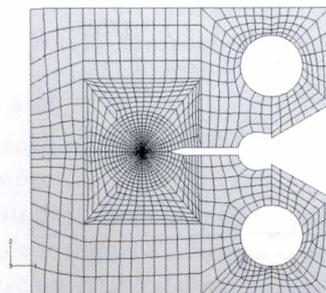


Figura 3. Red discreta de elementos finitos en los modelos.

En el análisis, se simulaban curvas carga-desplazamiento que se calibraron con los resultados medidos en la curva experimental, donde se observa

propagación estable. En este procedimiento, se debe evaluar un estado de tensiones-deformaciones en el extremo de fisura al decidir las propiedades de los elementos. De acuerdo con nuestro análisis, se requiere considerar un estado intermedio entre los casos puros de tensión plana y deformación plana. El procedimiento seguido se analiza detalladamente en otro trabajo [10].

3. Procedimiento Experimental

El material utilizado en este trabajo es un acero estructural tipo A572. La microestructura corresponde a un tratamiento de normalizado, con

un marcado bandeado ferrítico-perlítico. La composición química y las propiedades mecánicas a la tracción se informan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1. Composición Química del material ensayado

Especificación	C(%w)	Si(%w)	Mn(%w)	V(%w)	P(%w)	S(%w)
A572 Grado50	0,21	0,29	1,43	0,112	0,023	0,026

Tabla 2. Propiedades mecánicas del material ensayado

Especificación	δ fluencia [MPa]	δ máximo [MPa]	δ final [MPa]
A572 Grado50	413	542	0,23

Las probetas fueron extraídas de una chapa laminada en caliente de espesor aproximadamente 22mm. Se mecanizaron probetas fractomecánicas en las geometrías SE(B) y C(T), con orientación L-T. Las dimensiones se indican en las Figuras 4 a) y b). El espesor de las probetas es 21,5 mm para las probetas SE(B) y 19mm para las C(T).

Los ensayos fractomecánicos se realizaron en una estación de trabajo MTS 810. Se condujeron ensayos conforme a la norma ASTM E1820-5 aplicando el método de probeta única con compliance elástica. Los parámetros del ensayo se especificaron dentro de la aplicación MTS 790.50 Fracture Toughness Test del software TestStar II versión 2C.

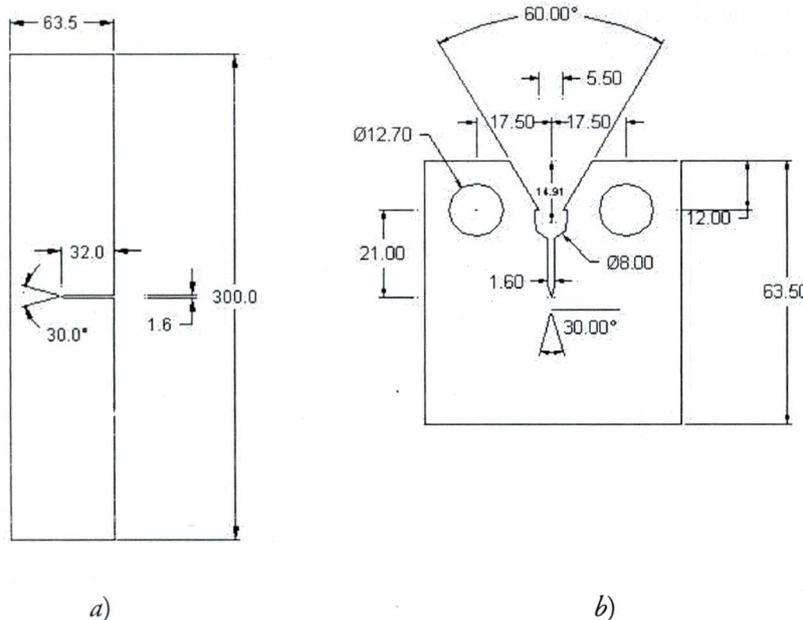


Figura 4. Esquema de las probetas ensayadas a) SE(B); b) C(T).

En la Figura 5 se presenta el registro típico de los ensayos, similares en ambas geometrías utilizadas.

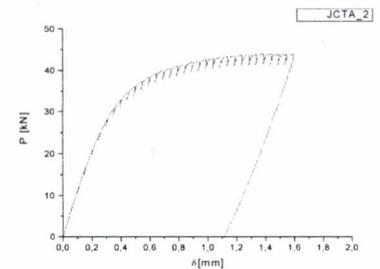


Figura 5. Registro de carga-desplazamiento en una probeta compacta aplicando el método de compliance elástica.

El software calcula los valores de Integral J para cada descarga, obteniendo los puntos constitutivos de la curva J-R ($J_i, \Delta a_i$). Estos resultados se presentarán más adelante, comparados con los otros dos métodos considerados en este trabajo.

Asumiendo que las descargas elásticas no afectan los valores de carga y desplazamiento, así como las áreas bajo la curva involucradas, nuestro análisis permite evaluar la Integral J en los puntos (P_i, a_i, δ_i) aplicando los procedimientos descritos en los párrafos 1.2 y 1.3. Se utilizó la expresión simplificada de Integral J, siguiendo el procedimiento presentado por ejemplo en [11] y se evaluó en cada punto:

$$J_i = \frac{\eta U_i}{B b_i} \quad (1)$$

donde U_i es la energía total bajo la curva estacionaria correspondiente a una longitud de fisura a_i , b_i es el ligamento remanente y

$\eta = 2$ para la probeta SE(B)

$\eta = 2 + 0,522b_i/W$ para la probeta C(T)

Al utilizar esta expresión de Integral J, no se consideró su corrección por crecimiento de fisura.

4. Resultados y discusión

La tendencia es perfeccionar métodos de probeta única para la obtención de curvas J-R. Los métodos directos presentan utilidad para aplicarse a la caracterización fractomecánica de los materiales, especialmente cuando los procedimientos estandarizados no son aplicables.

Los métodos directos tienen gran interés por su simplicidad y se basan en el análisis de las curvas experimentales carga-desplazamiento en la línea de carga.

Los aspectos clave a considerar se refieren a la determinación del inicio de la propagación y la relación entre la propagación estable con la carga y/o el desplazamiento en la línea de carga. En los métodos directos no se determinan experimentalmente.

En el método gráfico analítico se debe proponer una ley de propagación, que puede analizarse sobre la base de la determinación de un sistema de curvas estacionarias.

En la Tabla 3 se presentan los parámetros medidos sobre la curva carga-desplazamiento para aplicar el método directo gráfico-analítico, donde se supuso una ley lineal para la propagación estable.

Tabla 3. Parámetros de las curvas P- δ obtenidos para cada probeta y longitudes de fisura (curvas directas).

a) JCTA-2 corresponde a una probeta C(T) y
b) JTBA-4 corresponde a una probeta SE(B)

Probeta	P _{máxima} [kN]	P _{final} [kN]	δ _{final} [mm]	a ₀ [mm]	a _i [mm]	a _f [mm]
JCTA-2	44,21	43,35	1,58	24,50	25,62	28,25
JTBA-4	36,78	35,12	3,5	31,59	35,46	38,02

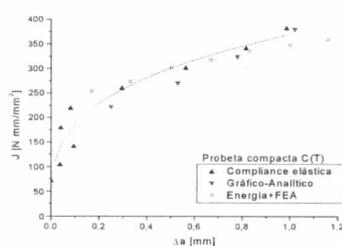


Figura 6. Curva J-R obtenida para el acero A572 con probeta C(T).

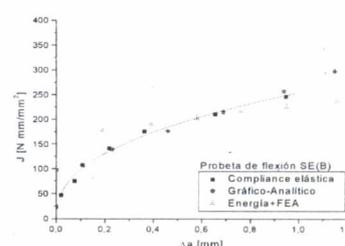


Figura 7. Curva J-R obtenida para el acero A572 con probeta SE(B).

En las Figuras 6 y 7 se ejemplifican los resultados obtenidos en las geometrías ensayadas C(T) y SE(B). Se tomó la primera parte de la curva, dentro de la zona con puntos válidos del método de *compliance* elástica. Los datos obtenidos muestran cualitativamente un buen ajuste comparados con los tomados como referencia.

El análisis que puede permitir una comparación cuantitativa tendría que partir de la definición de un parámetro de Integral J de iniciación de propagación estable (como se establece J_{IC} en la norma ASTM E1820-5).

Observamos que hay diferencia entre las curvas obtenidas para las probetas SE(B) y C(T). El análisis de los resultados y la fractografía indican que, además, es necesaria una corrección por el estado de tensiones en el extre-

mo de la fisura, ya que las probetas C(T) muestran cierto *tunneling*.

5. Conclusiones

- El procedimiento propuesto por Iorio (método gráfico-analítico) permite una buena aproximación de la curva J-R a partir de un análisis sencillo.
- La forma de las curvas carga-desplazamiento depende de cada material, por lo que el inicio de la propagación y la ley correspondiente a la propagación estable tienen que ser evaluados en cada caso. En el caso del método gráfico-analítico la ley de propagación no está definida a priori.
- El análisis por elementos finitos permite inferir una ley de crecimiento de fisura basándonos en la teoría de la deformación.

- Suponer una ley lineal de la longitud de fisura con el desplazamiento total durante la propagación estable es una aproximación aceptable de acuerdo con nuestros resultados.

Referencias

1. J. BEGLEY and J. LANDES, "The influence of Specimen geometry on JIC"; Fracture Toughness STP 514, 1972,ASTM.
2. ASTM E1820-5 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness
3. 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 (Santiago de Chile), 2006
4. J. A. JOYCE, "Analysis of a high rate round robin based on proposed annexes to ASTM E 1820"; Journal of Testing and Evaluation 29 (2001), p. 329-351.
5. A. IORIO, "Evaluación de integridad con una sola probeta fractomecánica"; COTEQ 96, 1996, p. 21-24
6. J. RICE, "Mathematical analysis in the Mechanics of Fracture" (Fracture Vol 2 - Editor H.Liebowicz); 1968, Academic Press.
7. L. M. KACHANOV, "Fundamentals of the theory of plasticity"; 1974, Mir Publishers.
8. 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 (Mar del Plata), 2005.
9. ABAQUS/CAE version 6.6. User's manual, 2005, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.
10. D. AQUINO, N. ALVAREZ VILLAR, E. AYLLÓN, F. AGÜERA y V. FIERRO, "Modelización de fisuras estacionarias en materiales dúctiles"; Jornadas SAM/CONAMET (San Nicolás), 2007 (remitido).
11. T. BYUN, B. LEE, Y. HYUN, y J. HONG, "An Iteration Method for Directly Determining J-Resistance Curves of Nuclear Structural Steels"; Journal of Materials Science 34 (1999), p. 2039-2047.