



# Análisis de la resistencia a la propagación estable de fisuras en aceros estructurales

Área temática: Mecánica de Fractura, Curva J-Resistencia

La Mecánica de Fractura Elástico Lineal (LEFM) se aplica al análisis de materiales de alta resistencia, con corrección por plasticidad. Aún para materiales moderadamente dúctiles, es necesario desarrollar metodologías de diseño y análisis estructural basadas en la Mecánica de Fractura Elastoplástica (EPFM).

En EPFM se utiliza la Integral J como parámetro para caracterizar la tenacidad a la fractura, dentro de la normativa ASTM. La obtención de curvas J-Resistencia es de gran interés, puesto que la utilización del valor de iniciación de la propagación estable ( $J_{IC}$ ) como criterio de falla, conduce a resultados demasiado conservativos en la mayor parte de las situaciones de diseño.

La aplicación de métodos directos permite obtener resultados en condiciones donde no son aplicables los métodos estandarizados para la obtención de la curva J-Resistencia.

En este trabajo se analiza la aplicación de métodos directos alternativos

a la normalización, en aceros ferríticos-perlíticos utilizados en tuberías de transporte de gas. Se presentan resultados experimentales y de análisis numérico (FEA) para el ajuste de curvas J-Resistencia.

## 1. Introducción

La Mecánica de Fractura Elastoplástica (EPFM) permite evaluar la integridad de componentes y estructuras, en materiales con plasticidad significativa previa a la inestabilidad. Su aplicación se basa en la determinación de la fuerza impulsora y la resistencia del material a la propagación de fisuras.

La determinación de la fuerza impulsora usualmente requiere la aplicación de métodos numéricos, aunque se han desarrollado procedimientos aproximados (por ejemplo GE-EPRI) en el caso de componentes con geometrías sencillas.

Para la caracterización de la resistencia de los materiales, cuya fractura se produce con plasticidad y propagación estable previa a la fractura, se definen curvas de resistencia

El parámetro Integral J es el más utilizado para expresar la tenacidad.

En los procedimientos estandarizados, se obtienen registros continuos de carga, desplazamiento y longitud de fisura.

La norma ASTM E1820-05, describe un procedimiento de probeta única para evaluar curvas J-Resistencia, donde la longitud de fisura durante el ensayo se calcula mediante la aplicación del método de *compliance* elástica.

Como alternativa, se han desarrollado métodos directos, donde se analizan las curvas carga-desplazamiento experimentales sin necesidad de medir la longitud de fisura durante el ensayo.

lorio ha desarrollado un método gráfico-analítico [1-2] para la determinación de la curva J-Resistencia. El método fue probado en varios materiales, obteniendo resultados similares a los derivados mediante métodos estandarizados y otros métodos directos [3-5].

Para la evaluación de una curva J-Resistencia en ASTM E1820-05 se deben satisfacer condiciones en el tamaño de las probetas (espesor mínimo) y la propagación estable (estableciendo límites para la propagación permitida). Por otro lado, el frente de fisura debe ser aproximadamente plano.

La justificación de las condiciones citadas se relaciona con la necesidad de obtener valores conservativos y evitar la dependencia geométrica de las curvas J-Resistencia. Se aplican aproximaciones basadas en la teoría de deformación. Entre otros detalles, no se evalúa la dependencia con el *constraint* durante la propagación, sino que simplemente se asegura una geometría inicial de alto *constraint*.

El *constraint* está relacionado con la distribución de tensiones y deformaciones en el frente de fisura. Por alto *constraint* debe entenderse como plasticidad contenida en términos de fluencia en pequeña escala (SSY).

En este trabajo, se analiza la caracterización de un acero estructural tipo API 5L donde no se obtiene una curva J-Resistencia válida conforme a ASTM, debido al desarrollo de *tunneling* durante la propagación estable. El *tunneling* indica que hay una pérdida de *constraint* muy marcada durante la propagación estable. En consecuencia, se observará un cam-

bio en la pendiente de la curva J-Resistencia que dependerá, entre otros factores, del espesor. En todo caso, la aplicación de los procedimientos estandarizados conduce a resultados que no pueden ser validados.

Es necesario desarrollar procedimientos que permitan aproximar la curva J-Resistencia con objetivos prácticos.

## 2. Revisión Teórica

Las curvas de resistencia representan el equilibrio entre la fuerza impulsora y la resistencia del material durante la propagación de la fisura hasta la inestabilidad.

Para obtenerlas se requiere evaluar Integral J para una fisura en crecimiento.

La evaluación de Integral J de una fisura propagante se puede hacer analítica y numéricamente. Cuando se utilizan los registros de curvas carga-desplazamiento se aplican expresiones derivadas de la definición de Integral J como tasa de liberación de energía elástica, aplicada al caso no lineal, corrigiendo por propagación. Los registros necesarios son  $P_{(i)}$ ,  $a_{(i)}$  y  $\delta_{(i)}$ , respectivamente carga, longitud de fisura y desplazamiento. El desarrollo de las expresiones para la corrección por propagación es presentado por Ernst [6].

Para el análisis de las curvas carga-desplazamiento, sin necesidad de medir la longitud de fisura durante el ensayo se aplican los métodos directos.

El más utilizado es la normalización donde se trabaja con una expresión

que vincula carga normalizada con desplazamiento plástico normalizado. Para la determinación de las constantes de la función LMN se utilizan los puntos donde se conoce la longitud de fisura (inicial corregida por *blunting*) y final (medida físicamente).

El ajuste de la curva carga desplazamiento en términos de carga normalizada y desplazamiento plástico normalizado asume materiales cuyas tensiones y deformaciones cumplen con la regla de Ramberg-Osgood y donde se verifican, aproximadamente, las mismas restricciones que en los ensayos estandarizados. Por lo tanto, para materiales determinados puede ser difícil obtener curvas válidas ya sea con el procedimiento ASTM E1820-05 como con la normalización.

Integral J no representa estrictamente la fuerza impulsora de la fisura, aunque Hutchinson y Paris [7] proponen que las expresiones analíticas son válidas cuando la propagación es limitada.

En condiciones de fluencia en pequeña escala (SSY) los análisis basados en Integral J y Mecánica de Fractura Elástico Lineal (LEFM) son equivalentes. Por lo tanto, trabajando con Integral J como parámetro, pueden identificarse  $K_{1C}$ ,  $G_{1C}$  y  $J_{1C}$ , definido este último como la aproximación ingenieril del valor de integral J correspondiente a la iniciación de la propagación estable.

Cuando se pasa al nivel de fluencia en gran escala (LSY), para la evaluación de la resistencia a la propagación de fisuras, con frecuencia nos encontramos con tenacidades elevadas y pérdida de *constraint*. En ese caso, Integral J no puede considerarse como

el único parámetro que caracteriza la tenacidad.

Para un análisis elastoplástico, como sostiene Sumpter [8] entre otros, el balance de energía utilizado para derivar Integral J como tasa de liberación de energía de deformación elástica no lineal es incorrecto aún en SSY, ya que hay dependencia de la historia de deformación.

Se propone derivar la curva J-Resistencia evaluando la energía disipada.

La energía disipada se puede determinar mediante el análisis de las curvas carga-desplazamiento, obtenidas en ensayos conducidos siguiendo los procedimientos estandarizados.

La energía disipada asociada a la propagación  $\Delta a$ , se define como:

$$D = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{\Delta U_i}{B \Delta a} = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{P \Delta \delta_{pl}}{B \Delta a} \quad (1)$$

Para la derivación de curvas J-Resistencia se aplicaron las expresiones que vinculan, la energía disipada con la componente plástica de Integral J [10].

$$D = \frac{(W-a)}{\eta} \frac{dJ_{pl}}{da} \quad (2)$$

donde  $\eta$  es una constante geométrica que depende del tipo de probeta,  $W$  es el ancho,  $a$  es la longitud de fisura y  $J_{pl}$  es la componente plástica de Integral J.

Esta expresión es válida para condiciones de propagación controlada

por Integral J, por lo que para nuestro caso se trata de una aproximación.

La relación entre la componente plástica de Integral J y D se esquematiza en la Figura 1.

La energía disipada (D) está asociada a los procesos de fractura, plasticidad local y remota. La separación de las componentes de energía disipada no es sencilla, por lo que este parámetro es estructural, no una propiedad del material. Con la finalidad de obtener evaluaciones similares a las de las curvas J-Resistencia, es necesario normalizar ya que las cantidades medidas son geoméricamente dependientes.

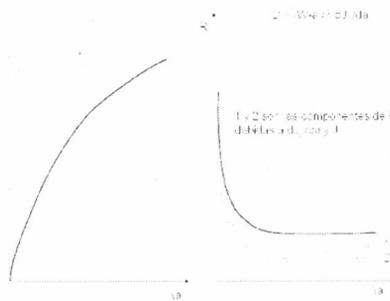


Figura 1: Relación entre las curvas

$$J_{pl}-\Delta a \text{ y } R-\Delta a$$

El procedimiento más adecuado consiste en normalizar con carga límite, utilizando soluciones de tensión plana. Una solución exacta consistiría en normalizar con soluciones en 3D si están disponibles.

Trabajando con la energía disipada, las condiciones de validez para la curva de resistencia se limitan a la discusión de la normalización adecuada.

El análisis de las curvas carga desplazamiento se esquematiza en la Figura 2.

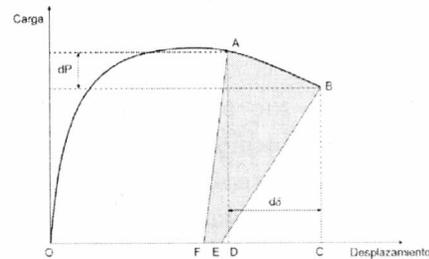


Figura 2: Esquema para el cálculo de D

Se asume que la variación de energía asociada con la propagación  $da$  tiene componentes elástica y plástica. Las ecuaciones básicas para un material elástico son las siguientes:

$$U_{eA} = 0,5 P_A \delta_{eA} \quad (3)$$

$$U_{eB} = 0,5 P_B \delta_{eB} \quad (4)$$

$$dU_{we} = 0,5 (P_A + P_B) (\delta_{eA} - \delta_{eB}) \quad (5)$$

$$dU_{te} = dU_{we} + U_{eA} - U_{eB} \quad (6)$$

donde  $P$  es la carga,  $U_e$  la energía elástica,  $dU_{we}$  variación componente elástica del trabajo externo;  $dU_{te}$  variación de energía total elástica y  $\delta_e$  desplazamiento elástico.

Para un material elastoplástico:

$$dU_{wt} = 0,5 (P_A + P_B) (\delta_{tB} - \delta_{tA}) \quad (7)$$

$$dU_{wp} = dU_{wt} - dU_{we} \quad (8)$$

$$dU_t = dU_{wt} + U_{eA} - U_{eB} \quad (9)$$

$$D = \frac{dU_t}{Bda} \quad (10)$$

$$D = G + \frac{dU_{wp}}{Bda} \quad (11)$$

donde  $D$  es la energía disipada para un incremento en la longitud de fi-

sura de magnitud  $da$ ;  $G$  es energía de Griffith (definida en términos de LFM),  $B$  espesor;  $dU_{wp}$  variación de la componente plástica del trabajo externo;  $dU_{te}$  variación de energía total elástica;  $dU_t$  input de energía durante la propagación y  $\delta_t$  desplazamiento total.

Si la propagación es estable se cumple que:

$$dU_p = dU_t \quad (12)$$

donde  $dU_p$  es la variación en energía de deformación plástica.

Si no hay plasticidad se cumple que:

$$\delta_t = \delta_e \quad (13)$$

y

$$D = G \quad (14)$$

En este análisis, la única suposición consiste en que el material cumple con una ley tipo Ramberg-Osgood para expresar la relación tensión-deformación.

Si bien es posible proponer leyes aproximadas para la evolución del área de fractura, en este trabajo se desarrollaron curvas estacionarias por métodos numéricos, similarmente a trabajos anteriores [9]. Un esquema se observa en la Figura 3.

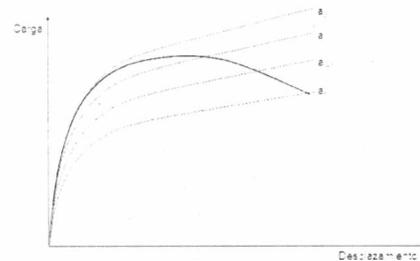


Figura 3: Sistema de curvas estacionarias utilizado para el análisis de la curva carga-desplazamiento experimental (esquema)

Al asumir la teoría de deformación, las curvas estacionarias deben interceptar la curva experimental en las longitudes efectivas  $a_{(i)}$ . En consecuencia, mediante un trabajo de calibración, se pueden obtener estimaciones para  $a_{(i)}$  en cada punto de la curva carga-desplazamiento.

En este trabajo se desarrolla:

- 1) Sistema de curvas estacionarias para evaluar longitud de fisura sobre las curvas carga-desplazamiento. El sistema de curvas estacionarias debe válido para el material, espesor, geometría de las probetas y parámetros del ensayo. Hay dependencia de la longitud de fisura inicial. Debería ser válido para probetas estandarizadas como para probetas no estándar.
- 2) Curvas D-Resistencia basadas en la determinación de la variación de la energía disipada durante el ensayo.
- 3) Se derivan curvas J-Resistencia de las curvas D-Resistencia.
- 4) Se comparan los resultados con curvas obtenidas mediante la aplicación de ASTM E1820-05 y el método gráfico-analítico.

### 3. Desarrollo Experimental

Se seleccionó el acero API 5L x42. En los aceros API, la propagación estable se desarrolla con un marcado *tunneling*. El *tunneling* se atribuye a una serie de factores microestructurales (bandeado) como geométricos (bajo espesor). Para expresar la longitud de fisura, es necesario definirla como el resultado del promedio y/o de la medida por *compliance* elástica. No se puede caracterizar el estado de

tensiones y deformaciones en el extremo de la fisura mediante Integral J, ya que las condiciones de control se pierden apenas comienza la propagación estable.

La orientación es muy importante en estos materiales. Las probetas de tracción y fractomecánicas se extrajeron con la orientación L-T.

En la Tabla I se indica la composición química.

API5L	C	Si	Mn	P	S
API5L	0,29	-	1,25	0,3	0,3
Muestra	0,17	0,10	0,62	0,015	0,023

Tabla I: % en peso. En la especificación, se indican valores máximos

En la Tabla II se informan las propiedades de tracción.

En los ensayos fractomecánicos se siguió el procedimiento ASTM E1820-05, menos en la validación de los resultados.

	$\sigma_{fluencia}$ [MPa]	$\sigma_{rotura}$ [MPa]	$\epsilon_{rotura}$ [%]
API5L	Mín 289	Mín 413	Mín 0,22
Muestra	408	443	0,42

Tabla II: Propiedades mecánicas de la muestra de API 5L

La máquina utilizada es una MTS 810, donde se prefisuraron probetas SE(B) y C(T). Las dimensiones nominales se observan en la Tabla III.

Durante el ensayo se obtuvieron registros continuos de carga y desplazamiento en la línea de carga, con un

extensómetro EJK-644. Los ensayos se realizaron aplicando descargas parciales, para evaluar la longitud de fisura hasta obtener un desplazamiento predeterminado.

	B [mm]	W [mm]	a <sub>0</sub> [mm]	a <sub>final</sub> [mm]
C(T)	9	25,4	14,87	15,67
SE(B)	9	40	21,56	24,02

Tabla III: Dimensiones nominales de las probetas ensayadas

Una vez finalizado el ensayo se procedió a teñir térmicamente, para marcar el avance estable.

Finalmente, se cargó hasta fractura, reduciendo la temperatura de la probeta con nitrógeno líquido para que la fractura final sea frágil.

Se analizaron las superficies de fractura, midiendo las longitudes de fisura presentadas en la Tabla III como promedio de los avances observados.

A los efectos de este trabajo, se asume que las condiciones de carga y el avance de la fisura no se ven afectadas por las descargas parciales características del método de la *compliance* elástica. En consecuencia, también se aplicó el método directo gráfico-analítico para obtener una estimación de la curva J-Resistencia a partir de los mismos registros, pero sin considerar las longitudes de fisura estimadas con el método de *compliance* elástica.

Las curvas J-Resistencia se obtienen evaluando Integral J a distintos niveles de propagación estable Δa<sub>(i)</sub> a partir de datos de P<sub>(i)</sub>, a<sub>(i)</sub> y δ<sub>(i)</sub>. Las expresiones utilizadas son las presentadas por ASTM E1820-05, sin corrección por propagación.

La expresión analítica para representar la curva J-Resistencia es:

$$J = C_1 (\Delta a)^{C_2} \tag{15}$$

donde C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> son constantes de ajuste sin significado físico.

En el caso de las curvas D-Resistencia, se trabaja con los mismos registros y se adopta la expresión analítica propuesta por Memhardt [11]:

$$D = D_\infty \left( 1 + \alpha \exp \left[ -\lambda \frac{\Delta a}{W} \right] \right) \tag{16}$$

donde D<sub>∞</sub> es el valor estacionario de D, α es un parámetro relacionado con el valor inicial de D (para Δa=0) y λ es un parámetro relacionado con la transición de D, del valor inicial al estacionario.

Los resultados se analizan en el Parágrafo 5.

#### 4. Modelado numérico

Mediante el programa ABAQUS 6.7.5 se generaron curvas carga-desplazamiento en la línea de carga, correspondientes a fisuras estacionarias de longitudes que variaron entre la longitud inicial correspondiente a la desarrollada por fatiga y la longitud final.

La relación tensión-deformación del material para el periodo plástico se obtuvo del ensayo de tracción y se ingresó como característica plástica del material en una tabla de valores.

Las probetas fueron modeladas como partes deformables en 2D y los pernos de sujeción y aplicación de los desplazamientos como superficies analíticas rígidas. La fisura creada por fatiga en la probeta real para actuar como con-

centrador de tensiones, se modeló en la geometría como una línea mas de partición y luego se definió como fisura en la opción SEAM [12] del programa que permite, al realizar la discretización de la superficie, que los nodos de los elementos a cada lado de la línea quedaran libres, y la línea de fisura pueda comportarse como un plano de separación del material. Esta longitud se irá modificando para obtener las distintas curvas estacionarias de carga-desplazamiento hasta llegar a la longitud final.

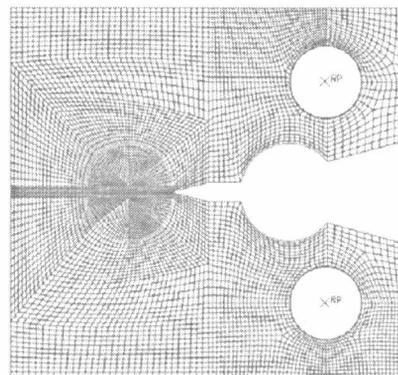


Figura 4: Mallado de probetas C(T)

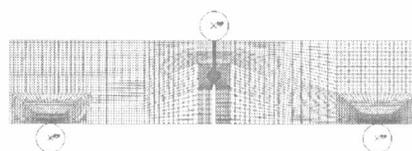


Figura 5: Mallado de probetas SE(B)

El modelado en 2D presume un frente de fisura uniforme, que no se corresponde con el comportamiento verificado en el ensayo por las características ya mencionadas del efecto *tunneling*. Para el ajuste de la respuesta del modelo se realizaron análisis con distintas distribuciones de elementos de deformación plana en la ubicación de la fisura, y tensión plana en el resto de la probeta.

Se utilizaron elementos cuadriláteros bilineales de 8 nodos CPE8R (deformación plana) y CPS8R (tensión plana). En la probeta compacta CT el modelo consta de 24.000 nodos y 7846 elementos, en la probeta de flexión SE(B) se utilizaron 20.000 nodos y 7000 elementos. En las Figuras 4 y 5 puede verse las características del mallado utilizado.

Se aplicó una carga de desplazamiento sobre los pernos como una carga tipo rampa en un tiempo ficticio de 3600 segundos.

Si bien no es un análisis tipo 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 mallado utilizado permitió una rápida convergencia a la solución final. En las Figuras 6 y 7 pueden verse ejemplos de la distribución de tensiones de Von Mises obtenidas en el punto final de la carga.

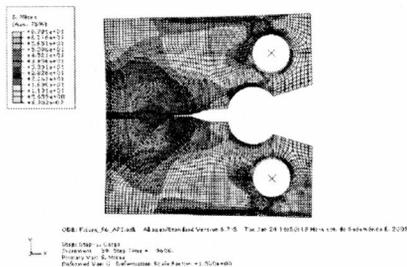


Figura 6: Distribución de tensiones característica de probetas C(T)

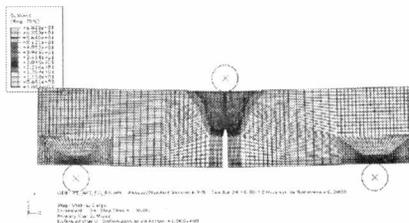


Figura 7: Distribución de tensiones característica de probetas SE(B)

### 5. Análisis de Resultados

En este trabajo se trata de discutir cualitativamente las expresiones analíticas que se utilizan para determinar valores específicos de Integral J y la resistencia a la propagación de fisuras. Este análisis es necesario para extrapolar las curvas J-Resistencia cuando se aplican distintos procedimientos de evaluación estructural basados en la evaluación de la inestabilidad, puesto que en los ensayos no se alcanza fractura por inestabilidad sino que los ensayos se detienen a desplazamientos (y/o longitudes de fisura) determinados. Con probetas de laboratorio no es posible la fractura por inestabilidad aún en materiales moderadamente dúctiles.

Se aplicó el método ASTM E1820-05, evaluando la propagación mediante:

- Método de *compliance* elástica.
- Determinando longitudes de fisura mediante el análisis de la curva carga desplazamiento con un sistema de curvas estacionarias desarrollado por el Método de Elementos Finitos.
- Método gráfico analítico, aplicando como primera aproximación una ley de propagación lineal con el desplazamiento total

Una vez realizados los ensayos se ajustaron, para a) y b) los datos según la Ecuación 15.

Para el método c) no corresponde el ajuste por la ley potencial puesto que se aproxima la curva J-Resistencia mediante una recta.

En la Tabla IV se informan así mismo los valores de  $J_{IC}$  determinados mediante la intersección de la curva de *blunting* con un *offset* de 0,2 mm.

	$C_1$	$C_2$	$J_{IC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
C(T) <i>Compliance</i>	125	0,41	75
SE(B) <i>Compliance</i>	135	0,79	47
C(T) FEA	103	0,29	72
SE(B) FEA	117	0,35	77
C(T) Gráfico-analítico	-	-	75
SE(B) Gráfico-analítico	-	-	75

Tabla IV: Constantes de ajuste estimadas y valores de  $J_{IC}$  resultantes

En la Figura 8 se comparan las curvas J-Resistencia obtenidas con los distintos métodos.

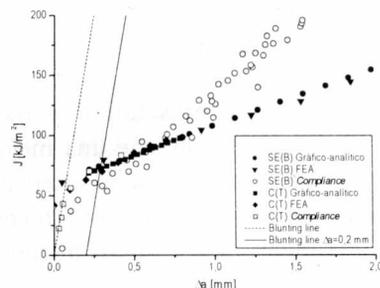


Figura 8: Curvas J-Resistencia para el API 5L x42

Se observa un ajuste razonable de las estimaciones realizadas con los distintos métodos para la determinación de  $J_{IC}$ .

Como para la definición de  $J_{IC}$  se considera la aproximación de  $J_{0,2}$  (intersección entre la curva J-Resistencia ajustada con la Ecuación 15 y la línea de *offset*), los resultados se verán afectados por la estimación de la curva de resistencia ya que no se realiza ninguna corrección por *constraint* ni por propagación, lo que se suma a la dispersión intrínseca de los datos. En nuestro caso, además debe considerarse que el *tunneling* no permite obtener resultados válidos conforme a ASTM E1820-05.

El acero API 5L x42 ensayado muestra un *tunneling* muy marcado, tal que la fisura en realidad avanza en el interior de la probeta (donde prevalecen inicialmente las condiciones de deformación plana) pero no progresa significativamente en la superficie. En consecuencia, el estado de tensiones en el extremo de la fisura no es uniforme y la longitud promedio no corresponde al valor de Integral J de deformación plana, ya que el procedimiento ASTM no tiene corrección por la pérdida de *constraint*. Se observa que las mediciones de *compliance* de longitud de fisura efectiva no corresponden con la longitud de fisura inferida por la teoría de deformación, particularmente a medida que la propagación es mayor.

Aplicando elementos finitos y métodos directos se obtiene una mejor estimación de la curva de resistencia, ya que los resultados se calibran con las longitudes final e inicial medidas físicamente. Esta aproximación es aplicable cuando no es posible satisfacer las condiciones de validez especificadas en ASTM E1820-05.

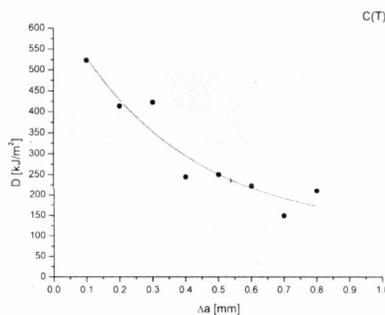


Figura 9: Curva D-Resistencia para probeta C(T)

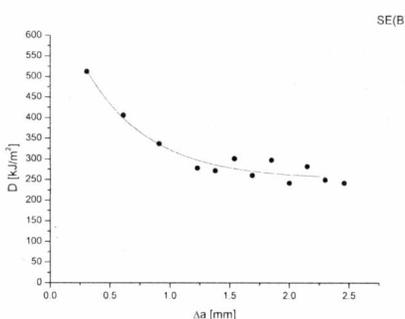


Figura 10: Curva D-Resistencia para probeta SE(B)

Con la finalidad de analizar las curvas J-Resistencia mediante un análisis alternativo se obtuvieron curvas D-Resistencia evaluando la energía disipada durante la propagación estable. Los gráficos obtenidos se observan en las Figuras 9 y 10.

En la Tabla V se informan los parámetros correspondientes a los ajustes según la Ecuación 16.

	$D_{\infty}$	$\alpha$	$\lambda$
C(T)	110	4,99	69
SE(B)	250	1,87	75

Tabla V: Constantes de ajuste para la curva D-Resistencia

Se observa que en la probeta SE(B) la resistencia estable aparente es mayor a la observada en la probeta C(T).

Esto se relaciona con que el ajuste mejora cuanto mayor es la propagación observada, puesto que el análisis es más efectivo si se dispone de más datos cuando D es estacionaria. Este análisis requeriría, además de analizar la dispersión experimental con más probetas y un análisis fractográfico que explique las diferencias observadas.

Aprovechando la relación con la componente plástica de Integral J, Ecuación 14, se pueden derivar curvas J-Resistencia a partir de las curvas D-Resistencia. En este trabajo se hace una simplificación aproximando Integral J con su componente plástica. Esta aproximación es aceptable en el rango de la propagación estable. No es preciso cuando la propagación estable es  $\leq 0,3$  mm aproximadamente.

Con la finalidad de que el tratamiento matemático de los datos sea sencillo se asumieron las expresiones analíticas de las Ecuaciones 15 y 16

Al simplificar el tratamiento matemático, para aplicar las curvas J-Resistencia obtenidas y derivadas, se requerirá un análisis de sensibilidad para considerar la incertidumbre en las constantes de ajuste. A los efectos de este trabajo se observa un ajuste razonable como puede verse en las Figuras 11 y 12.

En el caso de la probeta SE(B) el ajuste no es consistente ya que se advierte que para  $\Delta a$  del orden de 0,6 mm, las curvas por *compliance* elástica muestran un aumento en la tenacidad aparente que no se verifica por los otros métodos.

En ASTM E1820-05, los límites de  $J_{max}$  y  $\Delta a_{max}$ , así como los requerimientos de tamaño mínimo se relacionan con la necesidad de obtener curvas J-Resistencia independientes de la geometría.

En la derivación de las curvas J-Resistencia, la dependencia geométrica es similar puesto que se está trabajando con los mismos datos.

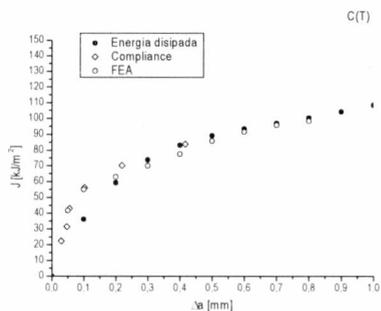


Figura 11: Comparación de las curvas J-Resistencia obtenidas y la aproximada mediante el análisis de la energía disipada en probeta C(T)

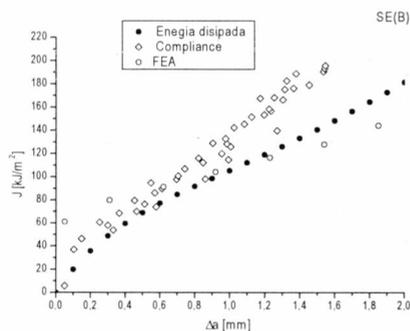


Figura 12: Comparación de las curvas J-Resistencia obtenidas y la aproximada mediante el análisis de la energía disipada en probeta SE(B)

Para la evaluación de posibles extrapolaciones y/o la evaluación de datos fuera de la ventana de validez de ASTM E1820-05, las curvas D-Resistencia permiten evaluaciones razonables, así como la aproximación de curvas J-Resistencia equivalentes.

Para eliminar la dependencia con la geometría, utilizando curvas D-Resistencia se debe normalizar en lugar de establecer una ventana de validez. Para normalizar el parámetro D, lo más apropiado es la carga límite. Para probetas, expresiones de carga límite se encuentran disponibles en la literatura [13].

## 6. Conclusiones

El análisis de las curvas J-Resistencia es de gran interés para la evaluación de integridad estructural.

En este trabajo se evalúa un método directo gráfico-analítico donde se puede obtener una aproximación especialmente aplicable cuando el método ASTM y/o el método de la *compliance* elástica no dan resultados válidos.

Por elementos finitos se puede desarrollar un sistema de curvas estacionarias, auxiliar en el análisis. En este trabajo se utiliza para evaluar sobre la curva carga-desplazamiento la longitud de fisura durante el desarrollo de los ensayos. Esas evaluaciones están calibradas con longitudes medidas físicamente y son consistentes con la teoría de deformación. Los resultados son similares a los dados por el método gráfico-analítico.

Se introduce la evaluación de curvas D-Resistencia para aproximar curvas J-Resistencia.

Las curvas D-Resistencia se obtienen a partir de los mismos registros de carga, desplazamiento y longitud de fisura obtenidos en el procedimiento ASTM E1820-05. Por las características de estas curvas, se advierte que pueden repensarse los límites de validez para las curvas de resistencia.

La posibilidad de derivar analíticamente curvas J-Resistencia a partir de curvas D-Resistencia permite expresar las curvas de resistencia en los términos del parámetro que se necesite. Así mismo, puede ser una opción para extrapolar curvas de resistencia a extensiones de fisura no obtenibles experimentalmente.

## 7. Referencias

IORIO A., COTEQ 96, 1996, 21-24

ALVAREZ VILLAR N., AQUINO D., AGÜERA F., FIERRO V., CHOMIK E. y IORIO A., A T M (2008), (Aceptado para publicación)

ALVAREZ VILLAR N., FIERRO V., AGÜERA F., CHOMIK E. y IORIO A., Jornadas SAM/CONAMET-MEMAT, Mar del Plata, 2005, sin paginar

ALVAREZ VILLAR N., AQUINO D., AGÜERA F., FIERRO V. y IORIO A., 6º Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales, Jornadas SAM/CONAMET, Santiago de Chile, 2006, sin paginar

ALVAREZ VILLAR N., AQUINO D., IORIO A., FIERRO V. y AGÜERA F., Jornadas SAM/CONAMET, San Nicolás, 2007 (remitido).

ERNST H., PARIS P. y LANDES J., ASTM STP 743 (1981) 476-502

HUTCHINSON J. y PARIS P., ASTM STP 668 (1979) 37-64

SUMPTER J., Engineering Fracture Mechanics 64 (1999) 161-176

AQUINO D., ALVAREZ VILLAR N., AGÜERA F. y FIERRO V., Jornadas SAM/CONAMET, San Nicolás, 2007 (remitido).

TURNER C. y KOLEDNIK O., Fracture of Engineering Materials & Structures 17 (1994) 1109-1127

MEMHARDT D., BROCKS W. y FRICKE S., Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures 16 (1993) 1109-1124

ABAQUS (Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.), "User's and Theory Manual", Pawtucket, 2005

ANDERSON, T.L., "Fracture Mechanics", 2da Edición, CRC, Boca Raton, 1995