

Una nueva metodología para la evaluación de la curva J-R^(*)

J.R. Donoso*, J. Zahr** y J.D. Landes***

Resumen

Se presenta una nueva metodología de construcción de la curva *J-R* para materiales dúctiles, obtenida por integración analítica de la relación *P-v*. Esta metodología está basada en los "Formatos" "Común" y "Conciso", y en el postulado de una ley de crecimiento de grieta, que relaciona el monto de avance estable con el desplazamiento plástico. El modelo desarrollado, denominado C&C, reproduce muy bien las curvas obtenidas experimentalmente de los tipos *P-v*, $\Delta a-v$ y *J-Δa*. Los resultados generados permiten sugerir que el crecimiento estable de grieta en un material dúctil obedece una relación de tipo potencial en su dependencia con el desplazamiento plástico. Esta metodología, puede utilizarse para evaluar las condiciones de inestabilidad, mediante el adecuado tratamiento analítico de las relaciones *P-v* y *J-Δa*.

Palabras clave

Curva J-R. Crecimiento de grieta. Modelización.

A new methodology for the evaluation of the J-R curve

Abstract

A new methodology for the construction of *J-R* curves for ductile materials, based upon the analytical integration of the *P-v* relation, is presented. This method is based on the "Common" and "Concise" "Formats", and on a postulated crack growth law, that relates the amount of stable crack growth with plastic displacement. The model developed, denoted as C&C, reproduces quite well the experimentally obtained *P-v*, $\Delta a-v$ and *J-Δa* curves. The results suggest that the amount of stable crack growth in a ductile material follows a power-law behavior in its dependence with plastic displacement. This methodology may be used to evaluate instability conditions, through the adequate analytical treatment of the *P-v* and *J-Δa* relations.

Keywords

Curve J-R. Crack growing. Modelling.

1. INTRODUCCIÓN

El correcto y oportuno análisis de integridad estructural de sistemas tales como recipientes de presión, cañerías o estructuras, permite el adecuado funcionamiento de éstos durante su vida útil sin que ocurran accidentes catastróficos, salvaguardando no sólo los equipos, sino, además, la seguridad de las personas. A pesar de los elevados estándares de calidad con que se fabrican equipos y plantas, utilizando códigos de conocimiento y uso universal, es un hecho irrefutable que los sistemas sufren deterioro durante su vida útil, poniendo en riesgo la operación y, más frecuentemente de lo que se quisiera, dando lugar a fallos que dejan el sistema fuera de servicio.

Uno de los defectos más temidos, que surgen durante la vida en servicio de un sistema, es la grieta, dado que se le asocia generalmente con fractura rápida y catastrófica. En materiales dúctiles, felizmente, esto no ocurre; más bien, el material se agrieta en forma lenta, estable, permitiendo la reparación o el cambio de la parte afectada, sin el trauma de una catástrofe. En ocasiones, sin embargo, el sistema debe seguir operando con el defecto, para lo cual se debe realizar un análisis que incluya inspección y evaluación del riesgo involucrado^[1]. La primera etapa de este análisis consiste en caracterizar la grieta, para de allí tomar la decisión sobre si su geometría, tamaño, y ubicación, permitirán la operación segura del sistema. Todo esto requiere seguir un procedimiento de

(*) Trabajo recibido el día 7 de enero de 2005 y aceptado en su forma final el día 7 de febrero de 2006.

(*) Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. juan.donoso@usm.cl

(**) Universidad Carlos III, Madrid, España.

(***) University of Tennessee, Knoxville, TN, USA.

evaluación de integridad estructural basado en mecánica de fractura, denominado adecuación para el servicio^[2].

Esta filosofía, conceptualmente antigua^[3] pero de reciente implementación, requiere definir si una grieta en un componente es aceptable para las condiciones de operación, a través de un análisis del tipo FAD (*Failure Assessment Diagram*)^[4]. Un análisis FAD requiere conocer la tolerancia del material al defecto presente, es decir, las propiedades del material en fractura dúctil, una vez descartada la posibilidad de fractura frágil. Para ello, utiliza la tenacidad del material para iniciación, así como la tenacidad para el proceso de desgarramiento estable más allá de iniciación. Dado que el proceso de fractura es precedido por un elevado grado de plasticidad, se utiliza, en estas evaluaciones, la Mecánica de Fractura Elasto-Plástica (MFEP), basada en el parámetro J (*Integral-J*)^[5].

Los procedimientos para la evaluación de la tenacidad a la fractura de materiales dúctiles están descritos en la Norma ASTM E 1820^[6]. La evaluación de la tenacidad de un material dúctil en el contexto de la MFEP posibilita el uso, ya sea, sólo, del parámetro de iniciación o tenacidad a la fractura de un material dúctil, J_{Ic} , o de la curva completa de resistencia, J vs. Δa , denominada también curva J - R . Para un material dúctil, el valor J_{Ic} es sólo un hito de la curva de resistencia. De otra parte, la curva J - Δa representa, en este contexto, el proceso de extensión estable por desgarramiento dúctil, y cuantifica la reserva de tenacidad del material más allá del punto de iniciación del avance estable de grieta, J_{Ic} , hasta que sobreviene la inestabilidad y, por ende, la fractura del componente.

En este trabajo, se presenta una nueva metodología de construcción de la curva J - R para materiales dúctiles, generada a partir del "Formato Común", desarrollado por Donoso y Landes^[7] y utilizado, recientemente, en aplicaciones de MFEP^[8 y 9]. Los resultados obtenidos con esta nueva forma de evaluar la curva J - R se comparan con resultados de la literatura obtenidos mediante el uso de la Norma E 1820. Finalmente, se coloca en perspectiva el potencial de esta nueva propuesta, desde el punto de vista de evaluación de las condiciones de inestabilidad del desgarramiento dúctil, para el material y/o geometría analizados.

2. LA CURVA J-R

La construcción de curvas de resistencia según la Norma E 1820 está basada en los trabajos pioneros

de Rice^[10 y 11] y de Ernst *et al.*^[12], entre otros autores. El método expuesto en esta Norma permite construir curvas de resistencia del material a partir de la respuesta carga-desplazamiento, P - v , de una probeta de fractura, en un ensayo fractomecánico. Para aplicar este método, se requiere conocer el tamaño de grieta instantáneo, el cual, por diferencia con el tamaño inicial, se traduce en el monto de avance estable de grieta, concurrente con la deformación plástica de la probeta en el ensayo.

De acuerdo con lo anterior, el conocimiento del tamaño instantáneo de grieta durante la deformación de la probeta es crucial. Varios investigadores han desarrollado métodos para evaluar el tamaño de grieta instantáneo en ensayos cuasi-estáticos. Joyce y colaboradores utilizaron los métodos de la descarga elástica y la razón de carga^[13 y 14], que se han usado, incluso en ensayos dinámicos^[15]. Como alternativa al trabajo de Joyce y la utilización de métodos auxiliares para evaluar el avance estable de grieta, Landes y Herrera desarrollaron un método denominado "normalización"^[16 y 17] que, más tarde, se extendió y aplicó por Landes *et al.* en la obtención de la curva J - R ^[18].

3. USO DEL FORMATO COMÚN EN LA EVALUACIÓN DE J

La construcción de la curva J - R del material, a partir de un ensayo con, sólo, una probeta de fractura, descrita en la Norma ASTM E 1820^[6], involucra la medición de la carga, P , y el desplazamiento, v , durante el ensayo, y simultáneamente, la evaluación del avance de grieta, Δa . Para medir el avance de grieta, se usa, ya sea el método de la descarga elástica^[19] o alguna técnica alternativa, como el método de caída del potencial eléctrico^[20]. Por lo tanto, en el ensayo fractomecánico se miden, en forma concurrente, las tres "variables de estado" de la deformación de una probeta agrietada: P , v , y a .

Considerando lo anterior y desde el punto de vista operacional, la evaluación de J según E 1820 se realiza por integración por partes de la curva P - v , corrigiendo por el cambio en la longitud de grieta. La forma de evaluación no es simple, siendo aplicable sólo a un ensayo "uni-probeta", debiendo tener mucha precisión en la corrección incremental de tamaño de grieta. Desde que la Norma E 1820 se puso en vigor, se ha intentado varias veces proponer enmiendas para hacerla compatible con otras expresiones, como la de ESIS^[21].

Considerando el tiempo y costo que requiere un ensayo para generar la curva J - R , Landes *et al.*^[18]

desarrollaron un método extremadamente conveniente cuando las técnicas estándares de medición de longitud de grieta se hacen difíciles de aplicar (por ejemplo, la probeta está inmersa en un medio agresivo^[22], o se debe ensayar una probeta “caliente”, o irradiada). El uso de este método (denominado “Normalización”) requiere de uno o más puntos de calibración para evaluar la forma funcional que relaciona las tres variables mencionadas arriba, P , v y a .

Trabajando sobre estos mismos principios, Donoso y Landes desarrollaron el “Formato Común”^[23] y el “Formato Conciso”^[24]. Estos formatos relacionan la carga, P , con la longitud del ligamento, b , y el desplazamiento, en los rangos de deformación plástica y elástica, respectivamente, siendo b la diferencia entre la dimensión característica de la probeta, W , y la longitud de grieta, a . Dichos formatos han probado ser de bastante utilidad para cálculos en Mecánica de Fractura^[25], simplificando funciones de calibración complejas (generalmente polinomios) a una función potencial del ligamento normalizado, b/W .

La Ecuación del Formato Común (EFC), base de esta propuesta de trabajo, relaciona la carga, P , con las otras dos variables de estado: el desplazamiento plástico normalizado, v_{pl}/W , y el ligamento normalizado, b/W ^[23]. La EFC se formula de la siguiente manera:

$$P = \Omega^* \cdot B \cdot C \cdot W \cdot (b/W)^m \cdot \sigma^* \cdot (v_{pl}/W)^{1/n} \quad (1)$$

En la ecuación (1), B es el espesor de la probeta, C y m son los parámetros de la función geometría, y σ^* y n son propiedades del material, obtenidas de una curva tensión-deformación^[26] o bien, directamente, de la curva carga normalizada-desplazamiento normalizado.

La EFC, ecuación (1), incluye un término que representa la restricción mecánica “fuera-del-plano”, Ω^* . La génesis y uso del parámetro Ω^* fueron presentados previamente^[8 y 9]. Su significado ha sido, recientemente, analizado extensamente, en forma cualitativa y cuantitativa^[27]. De acuerdo con los resultados del trabajo de Muehlich, Donoso y Landes (MDL)^[27], el parámetro Ω^* ya no se ciñe sólo a los clásicos valores extremos para tensión plana ($\Omega^* \approx 0,27$) y deformación plana ($\Omega^* \approx 0,38$), sino que también adopta valores intermedios. De hecho, Ω^* resulta ser una función de la variable B/b (el cociente espesor a ligamento), la cual tiene el carácter de “espesor equivalente”.

Los casos de tensión plana corresponden, típicamente, a láminas delgadas (espesor B pequeño), como las de aleaciones de aluminio para aviación^[28]; los de deformación plana, a chapa gruesa (espesor B grande), y/o grieta profunda (pequeño tamaño de ligamento). Los resultados de MDL^[27] indican que un estado puro de deformación plana no existe, y que al valor 0,38 se tiende, asintóticamente, para B/b muy grande.

En otras palabras, siempre habrá una pequeña proporción de tensión plana en una probeta de fractura. En este contexto, en su rol de parámetro macroscópico de constreñimiento (a diferencia del parámetro de constreñimiento local, Q ^[29]), Ω^* está de alguna manera vinculado a la fracción de tensión plana que presenta una probeta de fractura. Por ejemplo, para la típica sección no agrietada de forma cuadrada ($B/b = 1$), Ω^* asume un valor cercano al de deformación plana: $\approx 0,34$ ^[27]. Probetas con $B/b \leq 1$, y entallas laterales, en cambio, tienen un valor de Ω^* que tiende a 0,38.

Recientemente, Donoso, Zahr y Landes propusieron una ley de crecimiento de grieta de forma potencial^[30], con dos parámetros, que relaciona el cambio en longitud de grieta, Δa , con el desplazamiento plástico normalizado, v_{pl}/W , esto es,

$$\frac{\Delta a}{W} = I_0 \left(\frac{v_{pl}}{W} \right)^{I_1} \quad (2)$$

El término Δa , crecimiento de grieta, puede ser escrito en términos del tamaño de ligamento, es decir, $\Delta a = b_o - b$, donde b_o es el tamaño inicial de ligamento (igual a $W - a_o$). Por lo tanto, la ecuación (2) da la siguiente expresión para el tamaño de ligamento actualizado, b :

$$\frac{b}{W} = \frac{b_o}{W} - I_0 \left(\frac{v_{pl}}{W} \right)^{I_1} \quad (3)$$

La EFC, ecuación (1), fue inicialmente concebida como una expresión matemática que permitiese describir el comportamiento carga, *vs.* desplazamiento, de una probeta con entalla roma o con una grieta estacionaria, es decir, una probeta con ligamento constante. Sin embargo, si se sustituye las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1), se genera la EFC para una situación con crecimiento de grieta, en términos, sólo, de la extensión de grieta, Δa :

$$P = DBCW \left(\frac{b_o - \Delta a}{W} \right)^m \left(\frac{1}{I_0} \frac{\Delta a}{W} \right)^{1/n I_1} \quad (4)$$

donde, D es el producto de los parámetros Ω^* y σ^* . Alternativamente, la EFC modificada por crecimiento de grieta se puede escribir en términos, únicamente del desplazamiento plástico normalizado, v_{pl}/W , de la siguiente forma:

$$P = DBCW \left(\frac{b_o}{W} - I_o \left(\frac{v_{pl}}{W} \right)^{l_1} \right)^m \left(\frac{v_{pl}}{W} \right)^{1/n} \quad (5)$$

La evaluación de los parámetros l_o y l_1 de la ley de crecimiento de grieta (Ecs. (2)- (5)), requiere información experimental. En un ensayo fractomecánico, el tamaño inicial y el tamaño final de grieta deben ser medidos "obligatoriamente", con el objeto de calibrar las mediciones realizadas por los métodos ya señalados^[19 y 20]. En el trabajo de Donoso, Zahr y Landes^[30] se demostró que basta con conocer uno de los dos parámetros para fijar el segundo y, esto, se puede lograr con el último punto experimental o dato final. La elección dejó como parámetro único de la ley de crecimiento de grieta al exponente l_1 ^[30]. Los primeros intentos para modelar crecimiento de grieta estable con la EFC modificada^[30] dieron valores del exponente l_1 entre 1,75 y 2,25.

La propuesta para la nueva evaluación de J está basada en la integración analítica de la componente plástica de J , a partir de la fórmula típica para J total^[24]:

$$J = \frac{\eta_{el}}{bB} \int P dv_{el} + \frac{\eta_{pl}}{bB} \int P dv_{pl} \quad (6)$$

El reemplazo de la EFC original, ecuación (1) en la ecuación (6), permite evaluar la componente plástica de J , J_{pl} , segunda integral en la ecuación (6), por integración de la expresión resultante a ligamento constante, tal como fue propuesto por Ernst, Paris y Landes hace algo más de dos décadas^[12]. Gracias a la EFC, hoy es posible integrar J_{pl} analíticamente, dando lugar a la expresión^[30 y 31]:

$$J_{pl} = m\Omega^* \sigma^* CW \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{b_o}{W} \right)^{(m-1)} \left(1 - \frac{\Delta a}{b_o} \right)^{(m-1)} \left(\frac{1}{I_o} \frac{\Delta a}{W} \right)^{\frac{1}{l_1} \left(1 + \frac{1}{n} \right)} \quad (7)$$

La ecuación (7), base de la nueva metodología propuesta, permite formular la relación entre J_{pl} y la extensión estable de grieta, Δa , en términos de

las propiedades del material (n , σ^*), del tipo de geometría (m , C), de las dimensiones (W , b_o), y de los parámetros de la ley de crecimiento de grieta propuesta (l_o , l_1). Por supuesto, dada la decisión adoptada anteriormente, el parámetro l_o queda expresado en términos de l_1 , de la manera siguiente:

$$I_o = \left(\frac{\Delta a_{Final}}{W} \right) \left(\frac{v_{pl-Final}}{W} \right)^{-l_1} \quad (8)$$

En la ecuación (8), Δa_{Final} y $v_{pl-Final}$ corresponden al término del ensayo: la extensión final de grieta se mide directamente sobre la probeta, y la componente plástica del desplazamiento se calcula como el desplazamiento total, menos la componente elástica. Esta última, se evalúa con la flexibilidad de la probeta para el tamaño final de grieta, $C_{el,f}$, y para el valor final de carga, P_f , es decir:

$$v_{el,f} = C_{el,f} \cdot P_f \quad (9)$$

donde, "Formato Conciso"^[24 y 25]

$$C_{el} = \left(\frac{A}{BEC^*} \right) \left(\frac{b}{W} \right)^{-\mu} \quad (10)$$

A continuación, se presentarán dos casos con historial $P-v$ y $J-\Delta a$ conocidos, extraídos de la literatura para ilustrar el modelo. Se mostrarán curvas $P-v$ con crecimiento de grieta y curvas $J-\Delta a$, a partir del modelo (Ecs. (5) y (7), respectivamente) y, cómo las curvas obtenidas a partir de los "Formatos" C&C se asemejan a las obtenidas experimentalmente.

4. MATERIALES ANALIZADOS

La Tabla I muestra la información relevante, extraída de la literatura, de los materiales y probetas utilizados en este trabajo, para verificar el modelo propuesto, basado en los "Formatos Común"^[7] y "Conciso"^[24 y 25]. A este modelo se le denominará "Formatos C&C".

La información sobre el acero ASTM A533 ha sido obtenida del trabajo de Joyce y Link^[19], del cual se han seleccionado datos $P-v$, $a-v$, y $J-\Delta a$ de una probeta 1T-C(T), con entallas laterales. La longitud inicial de grieta, a_o , es de 30,3 mm, provocándose en la probeta una extensión estable de valor $\Delta a = 3,95$ mm, la cual fue evaluada por el método de la descarga^[19]. El comportamiento normalizado, P_N-v_N , es caracterizado por un valor de $D = 350$ MPa.

Tabla I. Dimensiones de probetas C(T) y parámetros de la EFC con crecimiento de grieta

Table I. Dimensions of the C(T) specimens and parameters of the CFE with crack growth

Parámetro	ASTM A 533 (Joyce y Link ^[19])	ASTM A 508 (Landes ^[26])
W , mm	50	50,8
B , mm	25	25,4
B_N , mm	20	20,32
a_o , mm	30,3	26,19
a_f , mm	34,25	33,12
D , MPa	350	372
n	5,65	5,25
l_1	2,0	1,75
Información disponible	$P-v$; $a-v$; $J-\Delta a$	$P-v$; $a-v$; $J-\Delta a$

La información sobre el acero ASTM A508, de otra parte, fue obtenida por Landes^[26], seleccionando de aquella datos $P-v$, $a-v$, y $J-\Delta a$ de una probeta 1T-C(T), con entallas laterales. La longitud inicial de grieta es de 26,19 mm y la extensión estable lograda es $\Delta a = 6,93$ mm. El comportamiento normalizado, P_N-v_N , de esta probeta es caracterizado por un valor de $D = 372$ MPa.

La figura 1 muestra las curvas carga-desplazamiento, $P-v$, para la situación con crecimiento estable de grieta para las probetas de ambos aceros (Exp). En esta figura también se muestran las curvas $P-v$ modeladas con los "Formatos Común y Conciso (C&C)" para efectos de comparación. Ambos tipos de curva son muy similares: la curva C&C sobreestima la carga máxima experimentalmente medida en la probeta de A533 por, simplemente, 1,2 %, en tanto la carga máxima para la probeta del acero A508 es, prácticamente, idéntica con el valor obtenido experimentalmente.

La figura 2 muestra las curvas para el crecimiento estable de grieta, Δa , en función del desplazamiento "total", v , para ambos materiales. Los valores experimentales (Exp) en la figura 2 corresponden a mediciones del avance estable, Δa , en forma concurrente con el respectivo ensayo. Los valores dados por el modelo "C&C" se obtuvieron a partir de la ecuación (2) (la "ley de crecimiento" propuesta en este trabajo), con inclusión de la componente elástica del desplazamiento, la cual se ve afectada por el cambio en longitud de grieta. De la figura 2, se puede inferir que el modelo "C&C" es capaz de representar la observación experimental de forma más que adecuada.

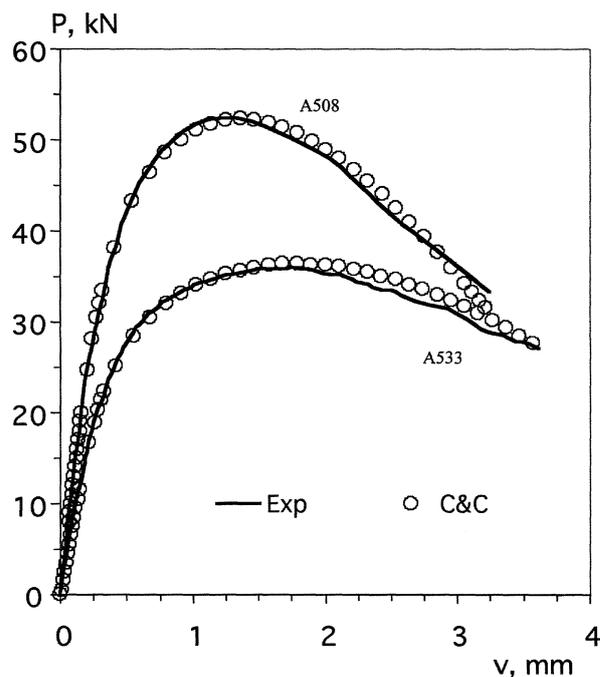


Figura 1. Curvas $P-v$ experimental (Exp) y modelada (C&C), para probetas 1T C(T) de los aceros A533 Grado B^[19] y A508^[26].

Figure 1. Experimental (Exp) and modeled (C&C) $P-v$ curves for 1T C(T) specimens of steels A533 Grade B^[19] and A508^[26].

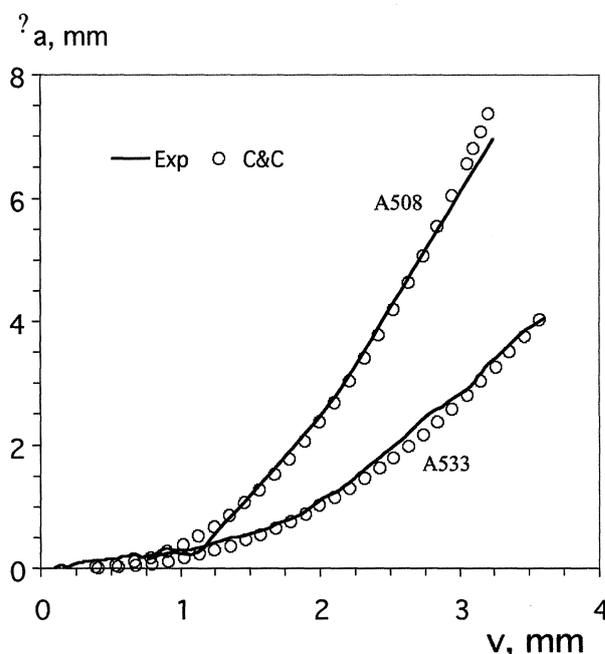


Figura 2. Curvas $\Delta a-v$ experimental (Exp) y modelada (C&C), para probetas 1T C(T) de los aceros A533 Grado B^[19] y A508^[26].

Figure 2. Experimental (Exp) and modeled (C&C) $\Delta a-v$ curves for 1T C(T) specimens of steels A533 Grade B^[19] and A508^[26].

La figura 3 muestra las curvas $J-\Delta a$ experimentales (Exp) y las obtenidas del modelo "C&C". Como ya fuera comentado previamente, la tenacidad a la fractura del material, J , se calcula siguiendo los lineamientos de la Norma E 1820 [6], integrando por tramos la curva $P-v$ y realizando las correcciones pertinentes por el cambio en la longitud de grieta.

Los valores de J denominados "C&C", se calculan a partir de la ecuación (7), a la que se le suma el término para J_{el} , que en este caso se puede evaluar de la forma tradicional,

$$J_{el} = K^2/E' \quad (11)$$

En la ecuación (11), K es el factor de intensidad de tensiones de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica, y $E' = E/(1 - \nu^2)$ para deformación plana.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El algoritmo desarrollado para la evaluación de J , representado en este trabajo por su componente plástica, ecuación (7), está explicado en detalles en la literatura [30]. Los datos de entrada para el modelo provienen del ensayo de fractura, extraí-

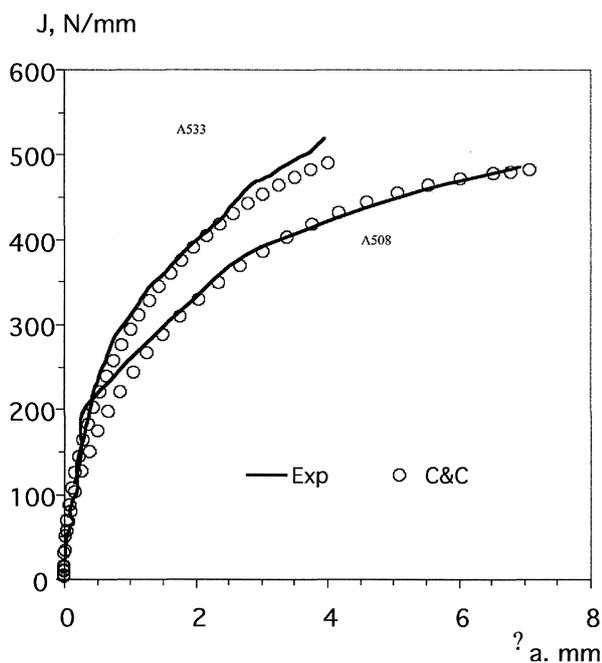


Figura 3. Curvas $J-\Delta a$ experimental (Exp) y modelada (C&C), para probetas 1T C(T) de los aceros A533 Grado B [19] y A508 [26].

Figure 3. Experimental (Exp) and modeled (C&C) $J-\Delta a$ curves for 1T C(T) specimens of steels A533 Grade B [19] and A508 [26].

dos de la curva $P-v$ con crecimiento estable de grieta.

Un resumen de las etapas necesarias para modelar las curvas $P-v$, $a-v$, y $J-\Delta a$, mediante el formato "C&C", es la siguiente [30]:

- Datos de entrada: valores finales de P , v , a , denominados P_f , v_f , a_f .
- Cálculo de $v_{el,f}$ con "Formato Conciso": se requiere P_f y a_f .
- Cálculo de $v_{pl,f}$ como la diferencia $v_f - v_{el,f}$.
- Cálculo de avance estable total: $\Delta a_f = a_f - a_0$.
- Crear lista tentativa de valores de v_{pl} . Con éstos, calcular valores de P con la EFC que incluye crecimiento de grieta (Ec. 4).
- Para completar el paso anterior, m se obtiene del "Formato Común" y el valor de n se obtiene de la curva P_N-v_N original sin crecimiento de grieta. A l_1 se le asigna un valor tentativo en el rango $1,75 < l_1 < 2,25$.
- Ley de crecimiento de grieta (Ec. 8): se puede evaluar l_0 en función de $v_{pl,f}$, Δa_f y l_1 .
- Ley de crecimiento de grieta (Ec. 3): con el valor tentativo de l_1 , y la lista tentativa de valores de v_{pl} , se puede obtener una lista de valores del tamaño instantáneo de grieta, a . De aquí, se puede conocer la dependencia de v_{pl} en función de a .
- Cálculo del desplazamiento elástico, v_{el} , en función de la longitud de grieta, usando el "Formato Conciso" (o la flexibilidad).
- Ahora se conocen los valores $P = P(v)$ (Fig. 1) y $a = a(v)$ (Fig. 2). Siendo l_1 el único parámetro de calibración del modelo, se le asigna ahora un valor definitivo que produzca el mejor ajuste entre las curvas experimentales $P-v$ y $a-v$, y las respectivas curvas $P-v$ y $a-v$ obtenidas con el modelo "C&C".
- Evaluación de J_{pl} en función de Δa , usando la ecuación (7), y evaluación de J_{el} con la ecuación (11). Se puede ahora generar la curva $J-\Delta a$, o $J-R$ propia del modelo "C&C" (Fig. 3), y comparar este resultado con la curva $J-R$ obtenida experimentalmente usando la Norma E 1820.

Los gráficos mostrados en las figuras 1, 2, y 3, permiten comparar la bondad del ajuste entre las curvas generadas con los datos experimentales de origen, y aquellas obtenidas con el "Formato C&C". Al margen de reproducir muy bien las curvas $P-v$, $a-v$, y $J-\Delta a$, esta nueva forma de evaluar la curva $J-R$ presenta amplias posibilidades de uso.

En efecto, esta metodología destinada a obtener la curva J - R directamente de la información P - v , evita tener que realizar la medición de avance de grieta de manera simultánea con el ensayo de fractura. Todo lo que esta metodología requiere es un punto de calibración evaluado al término del ensayo: el valor de la carga final, P_f , el valor del desplazamiento total final, v_f , y el tamaño final de grieta, a_f . Adicionalmente, se debe medir, como corresponde, el tamaño inicial de grieta, a_0 .

El análisis de la información requiere el uso del "Formato Común", y del "Formato Conciso", dando así lugar al modelo denominado "C&C" (Común y Conciso). Este modelo debe ser construido sobre la base de la llamada "ley de crecimiento de grieta", esto es, la relación entre el avance de grieta, Δa , y la componente plástica del desplazamiento, v_{pl} .

El primer paso del método planteado aquí, es reproducir la curva P - v con crecimiento de grieta incorporado. La expresión analítica generada, ecuación (4), tiene sólo un parámetro que permite variar la forma de la curva "C&C": l_1 . El valor seleccionado de l_1 es aquel que permite el mejor ajuste entre la curva P - v experimental y la curva P - v del modelo "C&C".

En este contexto, conviene destacar dos aspectos del trabajo original de Zahr^[31]: en primer lugar, no existe una forma analítica cerrada que, por comparación entre los valores "C&C" y los de la curva experimental (una especie de mínimos cuadrados) pueda ser resuelta para obtener el valor óptimo de l_1 . En segundo lugar, trabajos previos realizados sobre la base de valores numéricos^[32] y valores experimentales^[33], muestran que el exponente de la ley de crecimiento de grieta, l_1 , parece estar centrado en el valor 2,0. En el presente trabajo, se usaron tres alternativas, variando discretamente entre 1,75 y 2,25. Aún cuando resultan evidente las ventajas algebraicas de usar $l_1 = 2,0$, los valores finales usados en este trabajo fueron 2,0 y 1,75. La respuesta a cuál será el valor más conveniente a usar, estará dada, finalmente, por los usuarios de esta metodología.

Es importante señalar que la curva P - v del modelo "C&C" es la "descripción analítica" de la relación carga, vs. desplazamiento total, en una probeta de fractura cuando, en ésta, se produce crecimiento estable de grieta durante un ensayo. La implicación de esto es manifiesta: a partir de ahora, se tiene una forma de modelar y evaluar el comportamiento en inestabilidad de la probeta. En materiales dúctiles, ésta toma una forma similar a la de la inestabilidad plástica por estricción en un

ensayo de tracción, es decir, al haber crecimiento de grieta en el ensayo, la carga aumenta hasta un máximo, para de allí bajar debido a la disminución del tamaño del ligamento (Fig. 1).

La figura 4 muestra una manera alternativa de ilustrar el fenómeno de inestabilidad, en la forma de un gráfico carga-tamaño de grieta, para el acero A 533^[34]. La información mostrada en la figura 4 es de relevancia: se obtiene carga máxima en esta probeta para un tamaño de grieta del orden de 31,0 mm, con un avance $\Delta a \approx 0,70$ mm. El avance total, hasta la detención del ensayo, es de 3,95 mm. El significado de la cuantía del avance de grieta hasta carga máxima debe ser ahora analizado a la luz de la información entregada por la correspondiente curva J - R de la probeta. Este aspecto está bajo estudio, y será materia de un trabajo separado.

En cuanto a J , el uso de la EFC (Ecuación del Formato Común), permite obtener la expresión para J_{pl} por integración analítica de la relación P - v_{pl} (Ec. (5)) a tamaño de ligamento constante. Al insertar la ley de crecimiento de grieta (Ec. (2)) en la relación para J_{pl} , es posible obtener directamente la expresión analítica que vincula J_{pl} con el avance de grieta, Δa , y con una serie de parámetros propios del material, de la geometría, y del constreñimiento de la probeta.

Los casos presentados en este trabajo sugieren que la metodología desarrollada con el "Formato

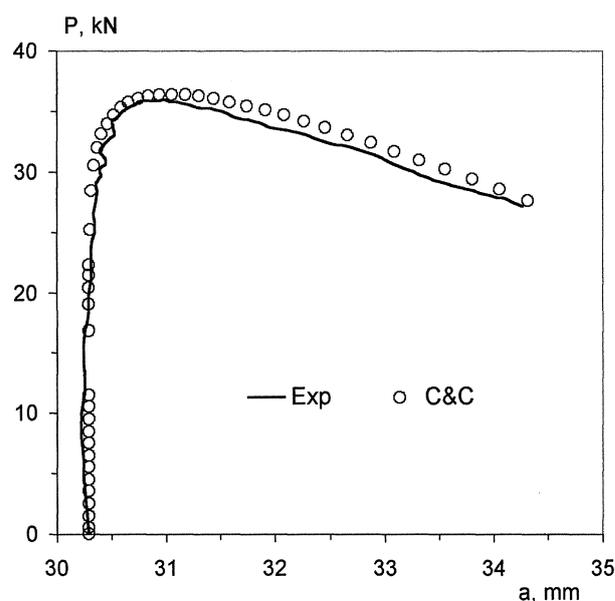


Figura 4. Curvas P - a experimental (Exp) y modelada (C&C), para una probeta 1T C(T) del acero A533 Grado B^[34].

Figure 4. Experimental (Exp) and modeled (C&C) P - a curves for an A533 Grade B 1T C(T) specimen^[34].

C&C” permite reproducir bien las curvas $P-v$, $a-v$ y $J-\Delta a$, mostrando ventajas evidentes respecto de otros métodos en cuanto a reproductividad, exactitud y rapidez de cálculo. Esta nueva metodología debiera ser de gran ayuda para evaluar la curva J-R, cuando los únicos datos disponibles son la curva $P-v$ y los tamaños inicial y final de grieta, situación esperada si la medición simultánea de longitud de grieta es técnicamente difícil por las condiciones experimentales (como es el caso de ensayos criogénicos^[35]) o tiene un costo prohibitivo.

Agradecimientos

Este trabajo está basado parcialmente en la Tesis de Ingeniero Civil Mecánico del Sr. Jorge Zahr, actualmente realizando su Doctorado en la Universidad Carlos III, Madrid. Los autores agradecen la financiación otorgada por la Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Chile, a través de los proyectos FONDECYT 1010151 y 7010151, y el proyecto DGIP 21.03.21.

REFERENCIAS

[1] RISK-BASED INSPECTION. Base Resource Document. API Publication 581, American Petroleum Institute, First Edition, 2000.

[2] FITNESS-FOR-SERVICE, API Recommended Practice 579, American Petroleum Institute, First Edition, 2000.

[3] J.D. LANDES, Report NUREG/CR-5650, 1992.

[4] BS7910:1999, Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, 1999.

[5] J.A. BEGLEY y J.D. LANDES, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, pp. 1-26, 1972.

[6] ASTM E1820-99A, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, American Society for Testing and Materials, 2000.

[7] J.R. DONOSO y J.D. LANDES, Eng. Fract. Mech. 47 (1994) 619-628.

[8] J.R. DONOSO, A. ORTIZ y F. LABBÉ, Rev. Metal. Madrid 39 (2003) 357-366.

[9] J.R. DONOSO, Ch. CANCINO y U. MUEHLICH, Rev. Metal. Madrid 38 (2002) 326-333.

[10] J.R. RICE, Fracture Vol. 2, H. Liebowitz, Ed., Academic Press, New York, 1968, pp. 191-311.

[11] J.R. RICE, J. Appl. Mech. 35 (1968) 379-386.

[12] H.A. ERNST, P.C. PARIS y J.D. LANDES, Fracture Mechanics: Thirteenth Conference, ASTM STP 743, Richard Roberts, Ed., American Society for Testing and Materials, 1981, pp. 476-502.

[13] J.A. JOYCE, H. ERNST y P.C. PARIS, Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP 700, 1980, pp. 222-236.

[14] X. CHEN, P. ALBRECHT, W. WRIGHT y J.A. JOYCE, Special Applications and Advanced Techniques for Crack Size Determinations, ASTM STP 1251, J.J. Ruschau and J.K. Donald, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995, pp. 83-103.

[15] J.A. JOYCE, P. ALBRECHT, H.C. TJIANG y W.J. WRIGHT, Fatigue and Fracture Mechanics, 32nd Volume, ASTM STP 1406, R. Chona, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2001, pp. 139-157.

[16] J.D. LANDES y R. HERRERA, J. Test. Eval. 16 (1988) 427-449.

[17] J.D. LANDES y R. HERRERA (1988) Int. J. Fract. 36 (1988) R9-R15.

[18] J.D. LANDES, Z. ZHOU, K. LEE y R. HERRERA, J. Test. Eval. 19 (1991) 305-311.

[19] J.A. JOYCE y R.E. LINK, Report NUREG/CR-6051, 1994.

[20] A. BAKER, ASTM STP 856, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, pp. 394-410.

[21] K. WALLIN y A. LAUKKANEN, Eng. Fract. Mech. 71 (2004) 1.601-1.614.

[22] J.M. BADÍA, J.M. ANTORANZ, P. TARÍN, A.G. SIMÓN y N.M. PIRIS, Rev. Metal. Madrid 40 (2004) 436-441.

[23] J.R. DONOSO y J.D. LANDES, Eng. Fract. Mech. 54 (1996) 499-512.

[24] J.R. DONOSO y J.D. LANDES, Fatigue and Fracture Mechanics, 30th Volume, ASTM STP 1360, edited by Paris P.C., Jerina K.L., Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000, pp. 34-50.

[25] J.R. DONOSO y J.D. LANDES, Fatigue and Fracture Mechanics: 32nd Volume, ASTM 1406, R. Chona. Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2001, pp. 261-278.

[26] J.R. DONOSO y J.D. LANDES, Int. J. Fract. 63 (1993) 275-285.

[27] U. MUEHLICH, J.R. DONOSO y J.D. LANDES, Int. J. Fract. 133 (2005) 371-388.

[28] A. MONSALVE y R. MORALES, Rev. Metal. Madrid 40 (2004) 431-435.

[29] R. LEIVA, J.R. DONOSO, U. MUEHLICH y F. LABBÉ, Rev. Metal. Madrid 40 (2004) 3-12.

[30] J.R. DONOSO, J. ZAHR y J.D. LANDES, Fatigue and Fracture Mechanics, 34th Volume, ASTM STP 1461, S.R. Daniewicz, J.C. Newman y K.H. Schwalbe, Eds., ASTM International, West Conshohocken, 2005, pp. 323-339.

[31] J. ZAHR, Tesis de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad Técnica Federico Santa María, 2002.

[32] W.Y. YAN, G.X. SHAN, O. KOLEDNIK y F.D. FISCHER, Key Eng. Mater. 145-149 (1998) 179-184.

[33] P.C. GIOELLI y J.D. LANDES, 32nd ASTM National Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics, West Conshohocken, PA, 2000.

[34] J.R. DONOSO y J.D. LANDES, ECF15, 15th European Conference on Fracture, Estocolmo, 2004.

[35] M.L. SAUCEDO-MUÑOZ, S.I. KOMAZAKI, T. HASHIDA, T. SHOJI y V.M. LÓPEZ-HIRATA, Rev. Metal. Madrid 39 (2003) 378-386.