

# Estimación indirecta de la longitud de fisura y separabilidad de variables.

Cassanelli, A.N.<sup>1</sup>, Cocco, R.G.<sup>1</sup>, de Vedia, L.A.<sup>2</sup>

Facultad de Ingeniería, Univ. Nac. de Mar del Plata, Inst. de Tecnología, Prof. Jorge A. Sábato  
(UN-AM-CNEA), CIC, Bs.As., Argentina.  
H.Yrigoyen 4164, 7600, Mar del Plata, Bs.As., Argentina.  
[acassane@fi.mdp.edu.ar](mailto:acassane@fi.mdp.edu.ar)

## RESUMEN

La propiedad de separabilidad de variables es la base teórica para la determinación del parámetro fracto-mecánico  $J$  y del cálculo incremental para calcular curvas  $J$ - $R$  y  $J_M$ - $R$ . Se basa en la suposición que la carga que experimenta un componente bajo ensayo puede ser representada mediante dos funciones independientes, una de la geometría bajo ensayo, en especial de la longitud de fisura y la otra de las propiedades de deformación del material.

El parámetro de separabilidad  $S_{ij}$  usado para determinar el dominio de definición en desplazamiento adopta un valor constante cuando esta propiedad se manifiesta para un material, geometría, embridamiento, condiciones de ensayo, etc. con longitud de fisura constante. Es en este dominio que  $S_{ij}$  se hace independiente de las propiedades de deformación del material como fue establecido por Sharobeam y Landes usando la función deformación en términos del desplazamiento plástico.

En este trabajo se usa esta propiedad del parámetro  $S_{ij}$  para realizar un estudio comparativo de la estimación de la longitud de fisura en probetas con vértice agudo. Se utilizó como referencia las estimaciones de longitud de fisura obtenidas mediante descarga elástica y aquellas medidas sobre la superficie de fractura.

Se utilizaron geometrías tipo compacta, ASTM C(T) y de flexión en tres puntos ASTM SE(B) y una geometría no standard A(B). Los materiales fueron un acero 2.25Cr-1.0Mo ASTM 387-Gr22 y un acero API Gr.N80.

Los resultados obtenidos de las estimaciones de la longitud de fisura inicial, final y de valores intermedios ajustan con un error aceptable respecto de las mediciones realizadas sobre la superficie de fractura y las estimaciones obtenidas mediante el método de la descarga elástica.

## ABSTRACT

The variable separability property is the theoretical basis for the determination of fracture mechanics parameters as  $J$  and the incremental calculus for the obtainment of  $J$ - $R$  curves.

The separability parameter  $S_{ij}$  used for the determination of the definition domain in displacement, takes a constant value, when is valid for a material geometry and test conditions, etc., with crack length fixed. Just in this domain,  $S_{ij}$  becomes independent of the material deformation properties, like was established by Sharobeam and Landes using the deformation function in terms of plastic displacement.

This work use that  $S_{ij}$  property to obtain a com-

parative study of crack length estimation in blunt notched specimens. It was used as reference the crack length estimation obtained by elastic discharge and the crack surface measurement.

The samples geometry were compact, ASTM C(T), three point bending ASTM SE(B) and a non standard type A(B). The material were 2.25Cr-1.0Mo ASTM 387-Gr22 steel and API GrN80 steel.

The results of the initial, middle and final crack length estimations are in agreement with an acceptable error respect to the crack surface measurement and the elastic discharge method.

## INTRODUCCIÓN

La suposición de que la carga se puede expresar como el producto de dos funciones independientes está presente desde la introducción del concepto de integral  $J$ . Rice, Paris y Merkle<sup>(1)</sup> propusieron que la relación de la carga y el desplazamiento para un cuerpo con fisura profunda sometido a flexión puede se expresada por

$$M = G(b)f(q)$$

### Ecuación 1

donde  $M$  representa el momento flector,  $b$  es el ligamento remanente,  $q$  es la rotación debido a la presencia de la fisura y,  $G$  y  $f$  se pueden definir como funciones de la geometría y de las propiedades de deformación.

En términos más generales la propiedad de separabilidad de variables puede escribirse como<sup>(2)</sup>,

$$P = G\left(\frac{a}{W}\right) * H\left(\frac{n_p}{W}\right)$$

### Ecuación 2

donde  $a$  es la longitud de fisura,  $n_p$  es el desplazamiento plástico,  $W$  es una dimensión característica del cuerpo y,  $G$  y  $H$  son las funciones independientes.

El comportamiento de esta propiedad se puede estudiar con dos cuerpos que tengan fisuras de longitudes distintas y que permanezcan constantes durante el ciclo de carga, por ejemplo,  $a_i$  la longitud del cuerpo llamado "i" y  $a_j$  la del "j". Con los registros  $(P, n)$  se puede realizar el cociente a desplazamiento plástico constante de la carga, esto es,

$$S_{ij} \left( \frac{b_i}{W} \right) \Big|_{n_{pl}} = \frac{P_i}{P_j} \Big|_{n_{pl}} = \frac{G \left( \frac{b_i}{W} \right) H \left( \frac{n_{pl}}{W} \right)}{G \left( \frac{b_j}{W} \right) H \left( \frac{n_{pl}}{W} \right)} \Big|_{n_{pl}}$$

**Ecuación 3**

siendo  $S_{ij}$  el parámetro de separabilidad definido en <sup>(2,3)</sup>. Dentro del dominio de definición de la propiedad de separabilidad de variables, la función  $H(n_{pl}/W)$  que describe las propiedades de deformación del material es la misma para cada probeta, entonces se anula en la Ecuación 3. Sharobeam y Landes <sup>(3)</sup> proponen que para ciertos materiales el parámetro  $S_{ij}(b_i/W)$  puede ser representado por,

$$S_{ij} \left( \frac{b_i}{W} \right) \Big|_{n_{pl}} = \frac{G \left( \frac{b_i}{W} \right)}{G \left( \frac{b_j}{W} \right)} \Big|_{n_{pl}} = A \left( \frac{b_i}{W} \right)^m \text{ con } A = \left( \frac{b_j}{W} \right)^m \text{ y } b_j = Cte$$

**Ecuación 4**

donde  $b$  es el ligamento remanente y  $m$  una constante que debe ser determinada de los datos experimentales de  $S_{ij}(b_i/W)$  y que para el caso de probetas que tienen longitud de fisura fija es igual al factor  $h_{pl}$  <sup>(3)</sup>.

Para estudiar la separabilidad cuando uno de los cuerpos no mantiene su longitud de fisura constante, Sharobeam y Landes <sup>(4)</sup> introdujeron un nuevo parámetro de separabilidad,

$$S_{pb} \Big|_{n_{pl}} = \frac{P_p}{P_b} \Big|_{n_{pl}} = \frac{G_p \left( \frac{b_p}{W} \right) H_p \left( \frac{n_{pl}}{W} \right)}{G_b \left( \frac{b_b}{W} \right) H_b \left( \frac{n_{pl}}{W} \right)} \Big|_{n_{pl}} = A G_p \left( \frac{b_p}{W} \right) h_{pb} \left( \frac{n_{pl}}{W} \right)$$

**Ecuación 5**

donde el subíndice  $p$  identifica a la fisura que crece o precracked,  $b$  es para la fisura fija o blunt notched,  $A=1/G_b=$  constante <sup>(5,6,7,8)</sup> y  $h_{pb}$  es el cociente de las funciones de deformación a  $n_{pl}$  constante. En este trabajo establecieron que si la propagación de la fisura comienza en la región separable entonces el parámetro de separabilidad  $S_{pb}$  es independiente de las funciones de deformación  $H_p$  y  $H_b$  y en términos del ligamento remanente resulta,

$$S_{pb} = A G_p \left( \frac{b_p}{W} \right)$$

**Ecuación 6**

Para fisuras de longitud constante la función que se adopta para representar la geometría es una función po-

tencial, para fisuras tipo precracked la función  $G_p$  que se adopta en este trabajo es del mismo tipo, resultando,

$$S_{pb} = A \left( \frac{b_p}{W} \right)^m = \left( \frac{b_p}{b_b} \right)^m \quad A = \left( \frac{b_b}{W} \right)^{-m}$$

**Ecuación 7**

La constante  $m$  de la función  $G_p(b_p/W)$  se obtiene en forma experimental. Los puntos de calibración son todos los puntos del registro  $(P, n)$  donde se conoce la longitud de fisura, aquellos con longitud de fisura inicial y el punto con la longitud final de fisura. Se eligió un punto adicional de calibración que corresponde a  $b_p=b_b$  y el parámetro de separabilidad resulta  $S_{pb}=1$ . Al representar la Ecuación 7 en formato doble logarítmico se obtiene una recta de pendiente  $m$ .

Una vez determinado para cada punto del registro el parámetro  $S_{pb}$  a desplazamiento plástico constante y habiendo determinado la constante  $m$  se despeja de la Ecuación 7 el valor que adopta el ligamento remanente  $b_p$  para cada punto  $(P, n)$  del registro, esto es,

$$b_p = b_b \left( S_{pb} \right)^{\frac{1}{m}}$$

**Ecuación 8**

Contando con el ligamento remanente o la longitud de fisura para cada punto del registro  $(P, n)$  la determinación de la curva  $J-R$  es inmediata.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales utilizados en esta etapa fueron un acero 2.25Cr-1.0Mo ASTM 387-Gr22 con el cual se construyeron probetas ASTM C(T) y ASTM SE(B) y un acero API Gr.N80 del que se fabricaron probetas no standard A(B) propuesta en <sup>(9)</sup>. Con las probetas ASTM C(T) ( $W=2B=60$  mm) se prepararon dos series con entalla lateral de 00%  $B$  y 25%  $B$ , y con las ASTM SE(B) ( $W=2B=58$  mm) una serie de 25%  $B$ . La serie de longitudes de fisuras de las probetas blunt notched fueron  $a/W$  55%, 60%, 65%, 70% y 75%. Con las probetas A(B) ( $W=B=8.58$  mm) se preparó una serie con una entalla lateral de 25%  $B$  y las series de longitudes de fisuras para las blunt notched fueron iguales que para ASTM C(T) y SE(B). También se utilizó una aleación de aluminio 6061 T6 con geometría ASTM SE(B) ( $W=2B=50$  mm) y entalla lateral de 08% de  $B$ .

Para cada geometría y serie se prepararon probetas con vértice de fisura crecido por fatiga o precracked y durante el ensayo se realizaron descargas parciales para estimar la longitud instantánea mediante el método de la compliancia elástica de acuerdo a ASTM E 1820-96.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1, Figura 2, Figura 3 y Figura 4 se observan los registros carga desplazamiento total  $(P, n)$  para las geometrías C(T) con 0% y 25% de entalla lateral,

y para la SE(B) y A(B) con 25% de entalla lateral. Se incluyeron los correspondientes a cada una de las probetas blunt notched y las precracked.. Para cada probeta se determinó con el método de la compliancia la longitud de fisura para cada descarga elástica.

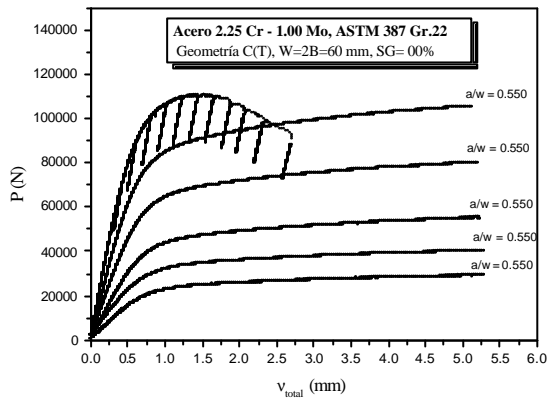


Figura 1

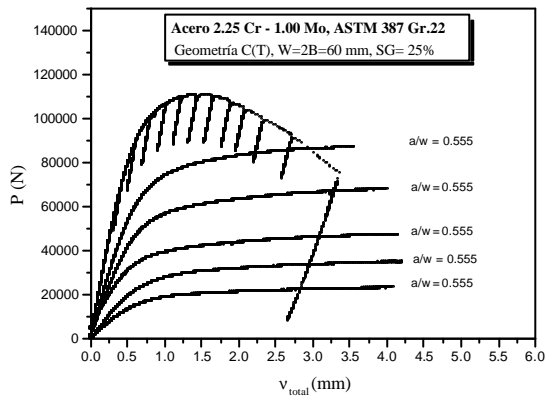


Figura 2

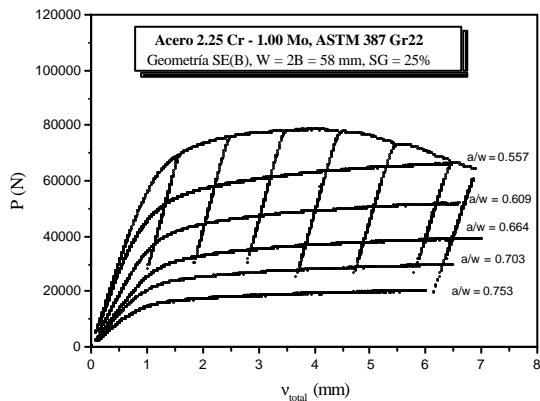


Figura 3

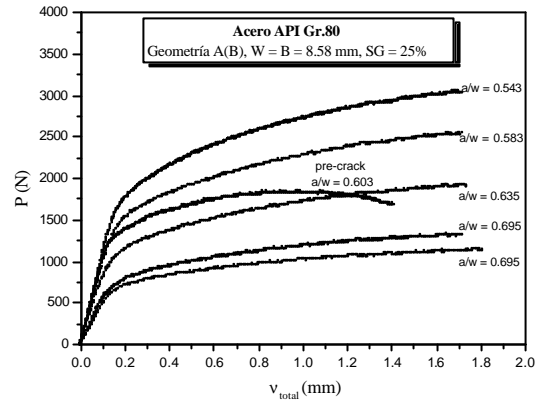


Figura 4

Mediante el parámetro de separabilidad definido (4) en la Ecuación 7, para cada geometría y con cada una de las probetas blunt notched usada como referencia se determinó el parámetro "m", utilizando como puntos de calibración la longitud de fisura inicial, final y el punto de calibración ( $S_p b_p / b_b = 1$ ) definido en este trabajo.

En la Figura 5, se observa para la probeta ASTM SE(B) con 25% B de entalla lateral la evolución del ligamento remanente  $b_p$  en función del desplazamiento  $n_{pl}$ . Se utilizó para estimarla el método de la compliancia, y el método del parámetro de separabilidad  $S_{pb}$ , para este último caso se utilizó como registro de referencia las probetas blunt notched que tienen longitudes  $a/W$  55%, 60%, 65%, 70% y 75% con igual grado de entalla lateral. Como se puede observar las cinco curvas obtenidas mediante el parámetro  $S_{pb}$  ajustan sobre los puntos que resultan del método de la compliancia. En este caso la función propuesta para ajustar el parámetro  $S_{pb}$  tiene muy buen comportamiento y no presenta sensibilidad a la longitud de fisura del registro adoptado como referencia. En todos los casos la diferencia se mantuvo por debajo de las recomendaciones sugeridas en ASTM E 1820-96 (15%  $Da$ ).

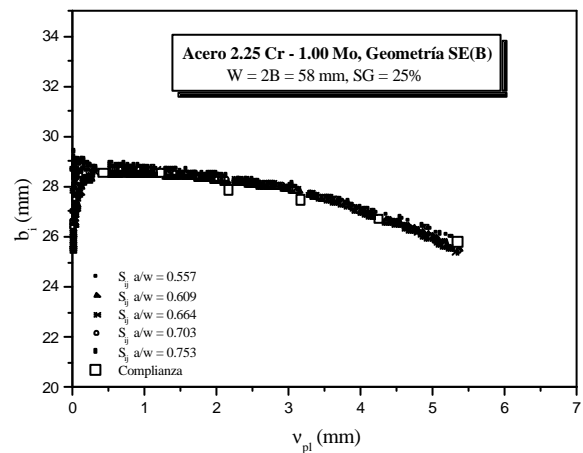


Figura 5

En la Figura 6 y la Figura 7, se pueden ver los resultados de la evolución del ligamento remanente  $b_p$  en función del desplazamiento  $n_{pl}$  obtenidos para la geometría ASTM C(T) con 0% y 25%  $B$  de entalla lateral.

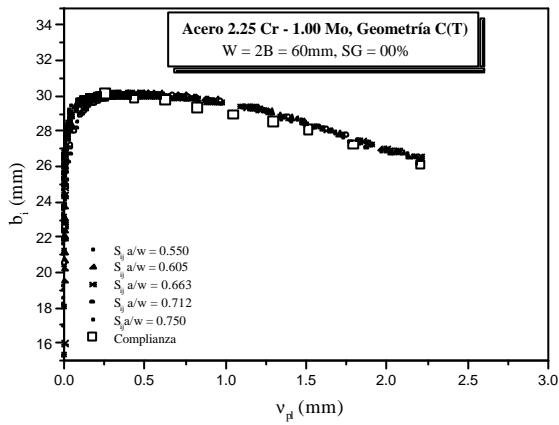


Figura 6

Para esta geometría se utilizó la misma función para ajustar el parámetro  $S_{pb}$  que en el caso de la geometría de flexión en tres puntos. Tanto para la serie con 0%  $B$  como para la de 25%  $B$  no se nota un influencia del registro adoptado como referencia.

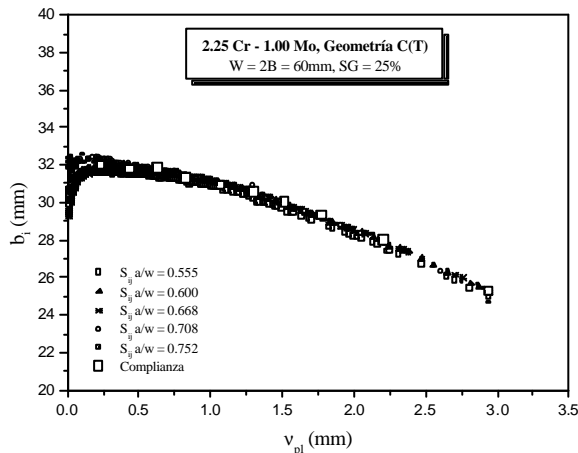


Figura 7

La estimación de la evolución del ligamento remanente para las dos series, con cada una de los distintos registros de referencia, no muestran una diferencia significativa respecto de las estimaciones obtenidas mediante compliancia elástica, y siempre las diferencias obtenidas fueron menores que las máximas recomendadas en ASTM E-1820-96 (15%  $D_a$ ).

En la Figura 8, se puede ver los resultados de la evolución del ligamento remanente  $b_p$  en función de  $n_{pl}$  para la geometría A(B). La función que se utilizó fue la misma que para las dos geometrías anteriores. En este caso en particular el exponente "m" del parámetro  $S_{pb}$  se obtuvo con la longitud de fisura inicial y el punto de calibración ( $S_{pb} = b_p/b_b = 1$ ). Esta geometría se utilizó para

estudiar el comportamiento de la función definida para ajusta el parámetro  $S_{pb}$  y la influencia del registro adoptado

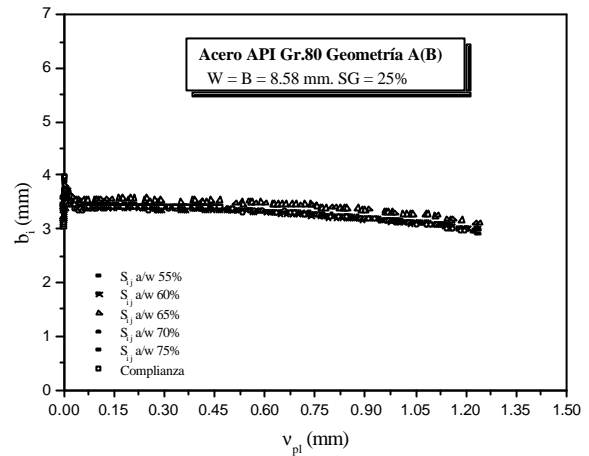


Figura 8

como referencia en secciones cuadradas que no tienen una geometría recta. Como se puede observar la estimación del ligamento remanente  $b_p$  en función del desplazamiento  $n_{pl}$  no se presenta sensible al registro adoptado como referencia, al igual que para las geometrías previamente estudiadas.

En la Figura 9, se observa en formato doble logarítmico el parámetro  $S_{pb}$  como función de  $b_p/b_b$  para cinco

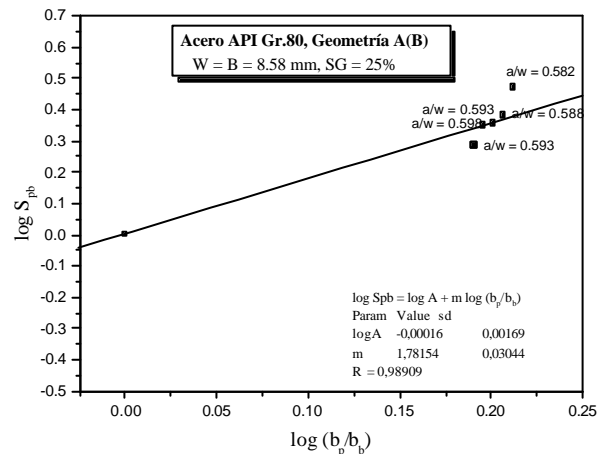


Figura 9

probetas prefisuradas y los valores asociados obtenido con la longitud de fisura inicial.

Se observa la recta interpolada por los puntos que corresponden a la longitud inicial de fisura estimada mediante compliancia elástica y por el punto de calibración  $S_{pb} = b_p/b_b = 1$ . Con la curva que resulta se puede describir para esta geometría la evolución de fisura.

Finalmente en la figura 10, se ve la evolución del ligamento remanente en función del desplazamiento plástico para la aleación de aluminio 6061 T6. Coincidentemente con los casos anteriores, se observa un acuerdo significativo con las longitudes predichas utilizando el método de compliancia elástica.

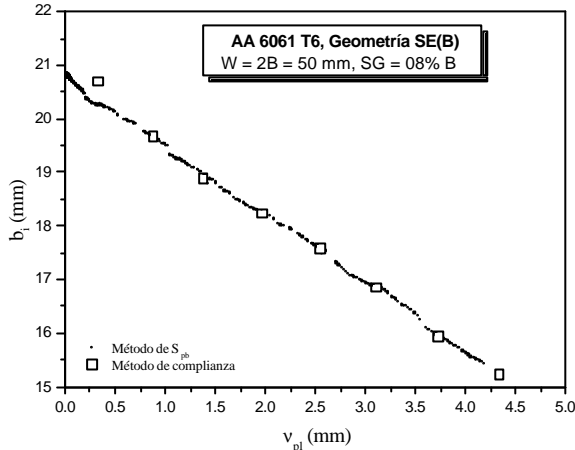


Figura 10

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados preliminares sobre un estudio de una nueva metodología para la estimación del crecimiento instantáneo de fisura en geometrías compactas de tracción y en vigas rectas y curvas de flexión en tres puntos. El parámetro  $S_{pb}$  utilizado fue presentado por Sharobeam y Landes (7) para la verificación de la propiedad de separabilidad en probetas con vértice de fisura crecido por fatiga para luego obtener el factor  $h_{pl}$ . En este trabajo Sharobeam y Landes demostraron que la propiedad de separabilidad se verifica no solo para probetas con longitud de fisura fija sino cuando existe propagación, esta circunstancia hace a la función  $S_{pb}$  independiente de la función deformación  $H(n_{pl}/W)$  siendo  $S_{pb}$  solo función de la geometría o de la función  $G(b_p/W)$ .

Aplicando esta propiedad en este trabajo se estimó la longitud de fisura en probetas compactas con 0% y 25% de entalla lateral. La diferencia entre los valores  $b_p$  obtenidos utilizando distintos registros de referencia respecto de los valores obtenidos por el método de la complianza es menor que el límite establecido en ASTM E1820-96 (15%  $Da$ ) y la función  $G(b_p/W)$  utilizada no mostró sensibilidad al registro de referencia.

Para las geometrías de tipo viga de flexión en tres puntos se utilizó la misma función  $G(b_p/W)$  que para la geometría compacta. Para la probeta ASTM SE(B) con 25% de entalla lateral fue posible obtener el valor instantáneo del ligamento remanente  $b_p$  y en ningún caso la diferencia con los valores obtenidos mediante el método de la complianza superó el límite establecido en ASTM E1820-96 (15%  $Da$ ). La función  $G(b_p/W)$  utilizada se mostró poco sensible al registro de referencia utilizado para determinar el parámetro  $S_{pb}$ .

Para las probetas tipo A(B) la función  $G(b_p/W)$  utilizada ajusto sobre la longitud inicial de las cinco probetas analizadas y siendo el parámetro  $S_{pb}$  independiente de la función deformación para este caso. Como en los casos anteriores la función  $G(b_p/W)$  utilizada no muestra una marcada sensibilidad al registro de referencia adoptado. Este último caso abre la posibilidad de estimar la longitud de fisura cuando no se conoce el momento en

que se fractura completamente el ligamento remanente, como en el caso de impacto. Para este caso los puntos de calibración serían la longitud inicial y el punto desarrollado en este trabajo.

Los autores consideran que se debe seguir trabajando en la estimación de longitudes instantáneas de fisuras utilizando esta metodología y comparando los resultados con aquellos obtenidos por medición directa sobre la superficie de fractura, complianza, normalización, etc. para conocer el real alcance de este procedimiento, tanto en ensayos estáticos como dinámicos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Dr. John Landes del department of Engineering Science and Mechanics, University of Tennessee, U.S.A., por su inestimable ayuda en la discusión de este trabajo. Además resaltar la colaboración del CONICET, CIC, y la Univ.Nac. de Mar del Plata.

## REFERENCIAS

1. Rice, J.R., Paris, P.C., Merkle, J.G., in Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536 (1973) 231-245.
2. Paris, P.C., Ernst, H., Turner, C.E. "A J integral approach to development of  $h$  factors", Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP 700, 1980, 338-351.
3. Sharobeam, M.H., Landes, J.D, "The load separation criterion and methodology in fracture mechanics", International Journal of Fracture, 47: 81-104, 1991.
4. Sharobeam, M.H., Landes, J.D., "The load separation and  $h_{pl}$  development in precracked specimen test record", International Journal of Fracture, 59, 213-226, 1993
5. Cassanelli, A.N. Herrera R., de Vedia, L.A. "Determination of  $h_{pl}$  factor, influence of side grooving", Journal of Testing and Evaluation, JETVA, : ISSM 0090-3973, 543-555, V.25, No6, 1997.
6. Cassanelli, A.N., de Vedia, L.A., "Separability Property: determination of the domain of definition in  $C(T)$  specimens", Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, : ISSM 0090-3973, enviado para publicar, noviembre 1999.
7. Cassanelli, A.N., de Vedia, L.A., "Method for the lower bound domain determination of load separation condition in precracked specimens", 1999 ASME, Applied Mechanics and Materials Conference, Virginia Tech Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 27-30/6, 1999.
8. Cassanelli, A.N., Ortiz, H., Cocco, R.G., de Vedia, L.A., "A study for  $h_{pl}$  factor determination in AA 6061 T6", Engineering Fracture Mechanics, enviado para publicar marzo 2000.
9. A.N. Cassanelli, R. Herrera, L.A. de Vedia, "Determination of fracture mechanics parameters for arc-shaped bend specimen". Book on New Development in Constructional Engineering, Commemorative Publication Prof. O. Steinhardt, Prof. F. Mang, Research Center for Steel, Timber and Stones, University of Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Alemania, 1994