

---

## ANÁLISIS DE CONDICIONES DE BORDE DEL MÉTODO DEL PARÁMETRO DE SEPARABILIDAD DE VARIABLES $S_{PB}$

J.Wainstein <sup>(1)</sup>; I.Korin <sup>(1)</sup>; J.Perez Ipiña <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> GMF-LPM- Univ. Nac. del Comahue-CONICET, Bs. As. 1400, Neuquén, Argentina.

E-mail: [jwainste@uncoma.edu.ar](mailto:jwainste@uncoma.edu.ar), [jwainste@gmail.com](mailto:jwainste@gmail.com)

### RESUMEN

*El parámetro  $S_{pb}$  es ampliamente utilizado como una técnica sencilla para estimar el crecimiento estable de fisura en ensayos de mecánica de fractura y determinar la curva de resistencia J-R en materiales en los que existe la propiedad de separabilidad de variables.*

*Este trabajo analiza las limitaciones del método  $S_{pb}$  con respecto al tamaño de la probeta empleada y al material utilizado.*

*Cuando se utiliza este método para estimar el crecimiento de fisura en probetas prefisuradas chicas, por ejemplo de 10x20mm, la fisura comienza a crecer poco antes de alcanzarse la carga máxima. Cuando esto sucede, la carga disminuye generando en consecuencia un registro  $S_{pb}$  con tres zonas bien definidas. La segunda zona del registro en donde  $S_{pb}$  se mantiene constante corresponde a la longitud de fisura inicial y cuando la variación del mismo es mayor a 0.01 comienza el crecimiento de fisura. Sin embargo, en probetas grandes, por ejemplo 30x60 mm, el crecimiento comienza bastante antes de carga máxima. En este caso el parámetro  $S_{pb}$  estaría estimando un crecimiento de fisura menor al que en realidad acontece dando una curva R correspondiente a un material más tenaz*

*Algunos de los materiales utilizados en este trabajo son muy tenaces y no presentaron una disminución de carga acentuada por crecimiento de fisura, presentando sin embargo existencia de la propiedad de separabilidad de la carga. En este caso la variación del  $S_{pb}$  fue mínima, encontrándose que el método subestima la cantidad de crecimiento de fisura, dando por lo tanto curvas R con mayor pendiente representando a materiales aun mas tenaces del ensayado.*

Tópico: Tópico 2 Materiales Metálicos

**Palabras Claves:** Mecánica de Fractura, Integral J, Parámetro  $S_{pb}$ , Separabilidad de variables

### 1. INTRODUCCION

La tenacidad a la fractura de materiales dúctiles es a menudo caracterizado en términos de Integral J [1-3] propuesto por Rice [4]. El método más utilizado para su determinación es del método de multimuestra desarrollado por Begley y Landes [5]. Este método no es siempre práctico ya que requiere grandes cantidades de material, requiere bastante tiempo de preparación de probetas y es muy difícil de aplicar en condiciones de impacto. Por esta razón se han hecho muchos esfuerzos para desarrollar métodos que requieran menos tiempo y material para determinar curvas R [6-9]. Los métodos más aplicados de probeta única en metales son el de descargas parciales y el de caída de potencial eléctrico, los cuales requieren de equipamiento especial para la medición del crecimiento estable de fisura durante el ensayo de fractura, son más difíciles de aplicar y no sirven para cualquier tipo de material. Por otro lado tenemos el método de normalización [9,10], el cual desarrolla curvas de calibración individuales para cada probeta. Esta basado en el principio de separabilidad de la carga desarrollado por Ernst y colaboradores [3] y requiere de la determinación de la función  $H(vp/W)$ , la relación entre carga normalizada y desplazamiento plástico normalizado, mediante la hipótesis de su forma funcional. La función de deformación depende de la tensión de flujo, endurecimiento, etc.

Un nuevo método de probeta única se ha desarrollado a partir del parámetro de separabilidad  $S_{pb}$  [11,12] y ha sido aplicado con éxito en caracterización de la tenacidad a la fractura de metales y polímeros [13], como también en condiciones de alta velocidad de carga (o deformación) [14]. Este concepto fue propuesto para otras aplicaciones como: determinar el  $\eta$  plástico en probetas prefisuradas, determinar límites de validez de la propiedad de separabilidad de variables y determinar el parámetro de iniciación de crecimiento estable de fisura  $J_{IC}$ , independientemente de la construcción de la curva  $R$  [10,15,16,17,18]. El método  $S_{pb}$ , en si mismo, está basado en el principio de separabilidad desarrollado por Ernst y colaboradores [3]. Consiste en la suposición que la carga puede ser expresada como producto de dos funciones independientes: una función de la geometría y otra función de las propiedades de deformación del material. El parámetro  $S_{pb}$ , definido como la relación de cargas entre una probeta prefisurada y una de fisura roma, es independiente de la función de deformación para un dado material, geometría y restricción. Aun cuando los métodos de normalización y  $S_{pb}$  parecen ser opciones muy similares, el método de  $S_{pb}$  tiene la ventaja de requerir solamente la suposición de una hipótesis, es decir, la función de la geometría, la cual es conocida para varias configuraciones [19]. El presente trabajo estudia los límites de aplicabilidad del método  $S_{pb}$  para la estimación de crecimiento estable de fisura para la construcción de curvas  $R$ .

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizaron ensayos de fractura con dos tipos de aceros microaleados diferentes utilizados para tubos, llamados en nuestro trabajo material B y material C. Se mecanizaron probetas SE(B) con relación B/W igual a 0.55 y distancia entre apoyos de 4W y  $a/W$  aproximadamente 0.5

Para cada material estudiado se construyó una probeta denominada “Grande” y cuatro probetas denominadas “Chicas”. De estas últimas, tres se construyeron con fisura aguda, generada por fatiga, llamadas PC y una con fisura roma, llamada BN. Por no contar con material suficiente, las probetas grandes solo se construyeron con fisuras agudas, y se modeló numéricamente el comportamiento esperado con fisura roma [20].

Material		Probetas chicas		Probeta grandes	
		B [mm]	W[mm]	B[mm]	W[mm]
Probetas con prefisura por fatiga	B	10.1	20.1	23	46
		10.1	20.1		
		10.1	20.1		
	C	13.7	27.3	30	60
		13.7	27.3		
		13.7	27.4		
Probetas con vértice de fisura roma	B		20.1	-	-
	C		27.3	-	-

(-): generadas teóricamente.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestra el registro carga- desplazamiento de la probeta grande del material C, figura 1a), con las correspondientes estimaciones del crecimiento estable de fisura durante el ensayo de fractura mediante los métodos  $S_{pb}$  y de descargas parciales, figura 1 b). También se muestran las longitudes de fisura inicial y final medidas sobre la superficie de fractura.

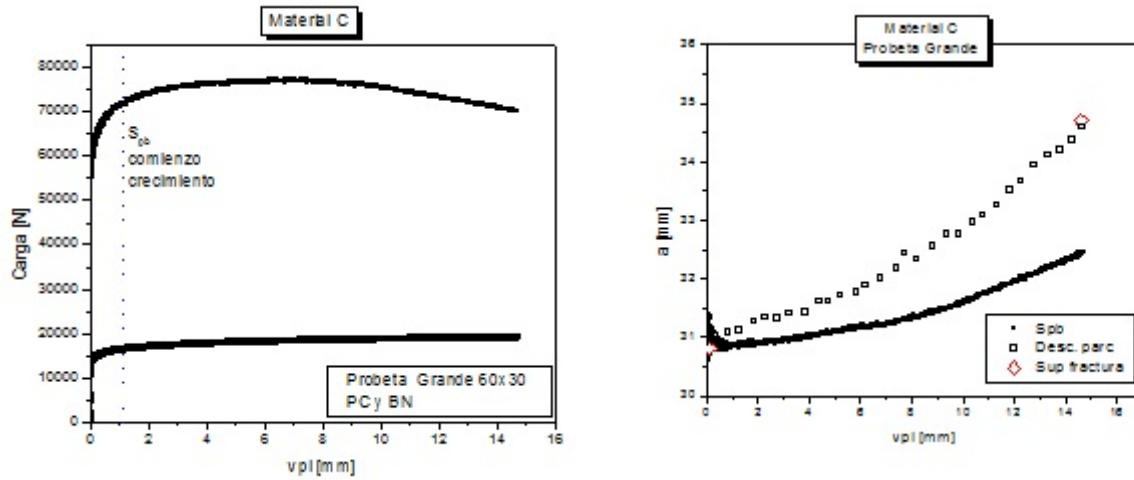


Figura 1- a) Carga desplazamiento plástico para la probeta grande del material C, b) estimación de crecimiento estable Metodo  $S_{pb}$  y descargas parciales

Como puede observarse, el método  $S_{pb}$  subestima la longitud de fisura final, siendo la diferencia en crecimiento estable de fisura con respecto a la medida sobre la superficie de fractura menor a 6.45%. En este caso, para la probeta grande está prediciendo un crecimiento de fisura menor al real. Para el mismo material C, del ensayo de fractura de una probeta chica, se obtuvieron los siguientes resultados, figura 2) a y b)

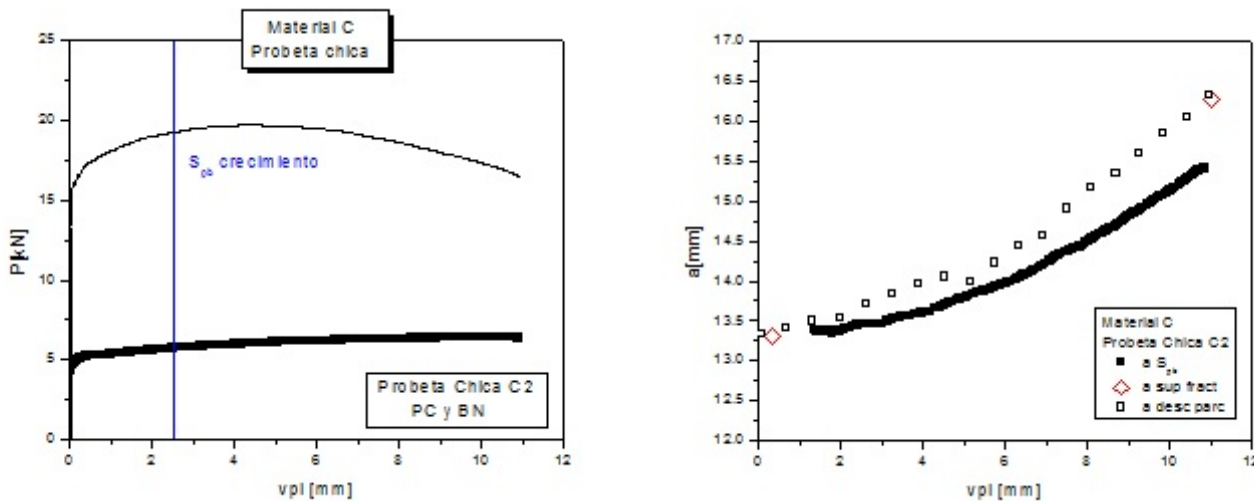


Figura 2 a) Carga desplazamiento plástico para una probeta chica del material C, b) estimación de crecimiento estable de fisura mediante el Metodo  $S_{pb}$  y el de descargas parciales.

Como puede observarse, el método  $S_{pb}$  también subestima la longitud de fisura final, pero en este caso la diferencia con este valor y el medido sobre la superficie de fractura es de solo 5 %. El crecimiento para probetas chicas se produce alrededor de carga máxima, apareciendo ésta como una condición para la utilización de  $S_{pb}$ , ya que cuando esto no se produce, como en las probetas grandes, la estimación del método es pobre. Esto se debe a que en registros carga desplazamiento normalizados el crecimiento de fisura comienza en distintos puntos.

Luego, con las estimaciones realizadas de crecimiento estable de fisura para la probeta grande y las chicas del material C se construyeron las respectivas curvas R, figura 3. En esta figura se muestran las curvas R determinadas

por el método de descargas parciales, utilizado en este caso como referencia, y las determinadas por el método  $S_{pb}$

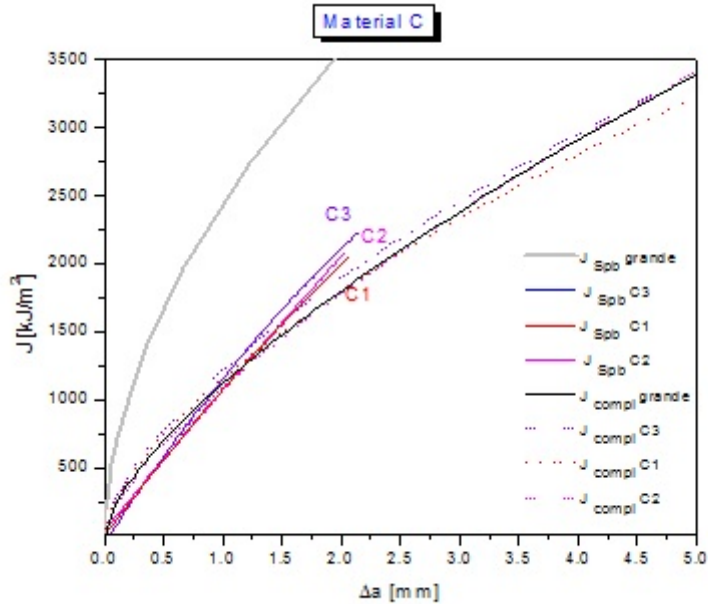


Figura 3. Curvas  $J-R$  para el material C, probetas chicas y probeta grande

Puede apreciarse que el método  $S_{pb}$  en probetas grandes, al estimar un crecimiento de fisura menor al acontecido en la probeta, da como resultado una curva  $R$  perteneciente a un material mas tenaz. No así para el caso de probetas chicas como se muestra en la misma figura 3.

Para el material B, se muestra a continuación el registro carga-desplazamiento de la probeta grande, figura 4a), con la correspondiente estimación del crecimiento estable de fisura durante el ensayo de fractura mediante el método  $S_{pb}$  y el de descargas parciales, figura 4 b). También se muestran las longitudes de fisura inicial y final medidas sobre la superficie de fractura.

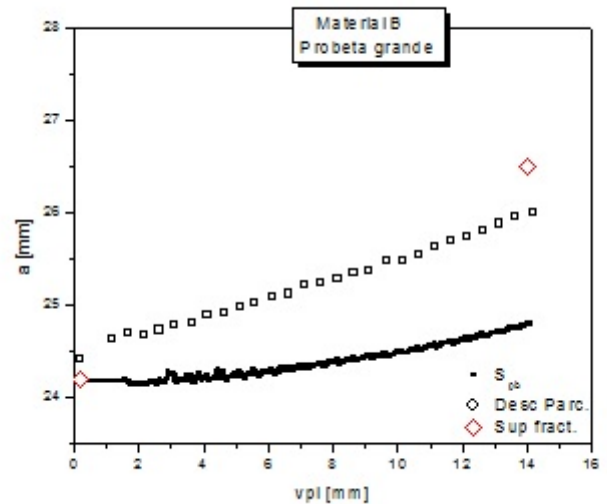
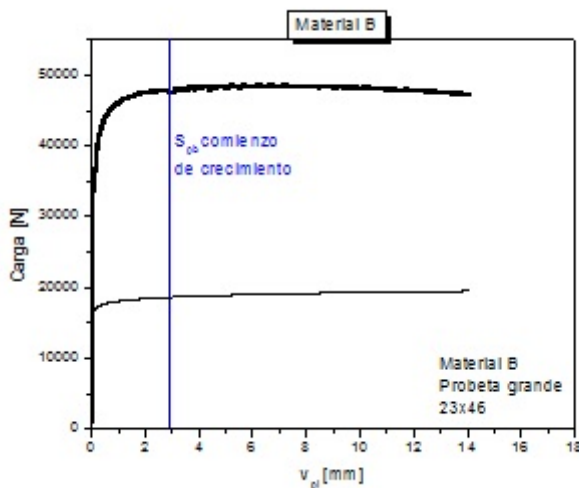


Figura 4 a) Carga desplazamiento plástico para una probeta grande del material , b) estimación de crecimiento estable de fisura mediante el Metodo  $S_{pb}$  y el de descargas parciales

En este caso puede observarse que tanto el método  $S_{pb}$  como el de descargas parciales subestiman la longitud de fisura

final, siendo mayor la diferencia para el método  $S_{pb}$ .

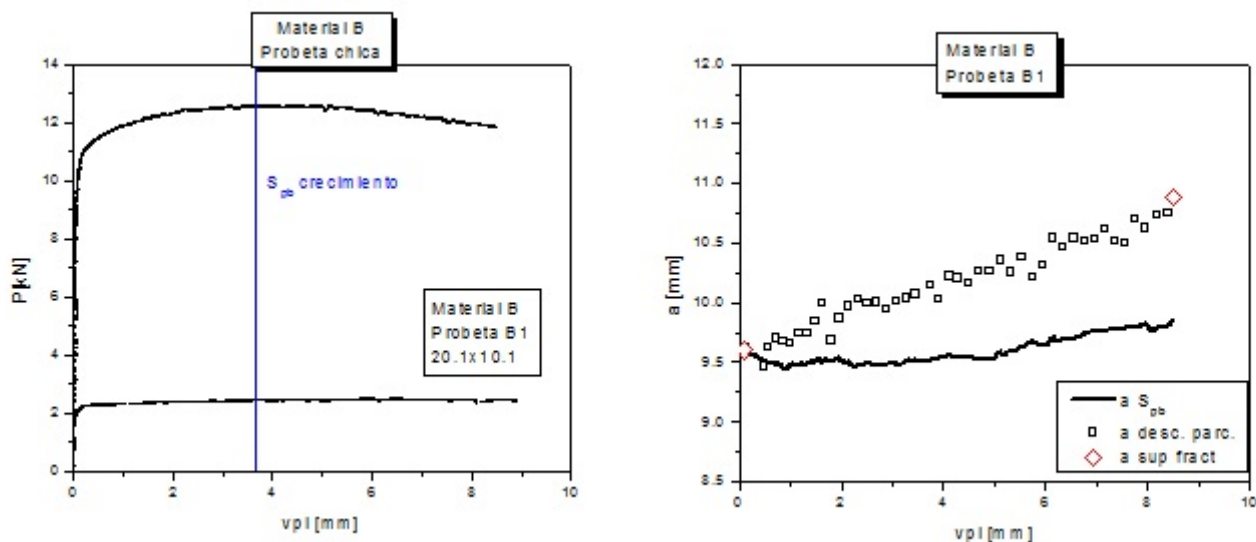


Figura 5.a) Carga desplazamiento plástico para una probeta chica del material B, b) estimación de crecimiento estable de fisura mediante el Método  $S_{pb}$  y el de descargas parciales.

Para este material como puede verse en las figuras 4 y 5 el método  $S_{pb}$  realiza una pobre estimación de la longitud fisura final tanto para la probeta grande como para las probetas chicas.

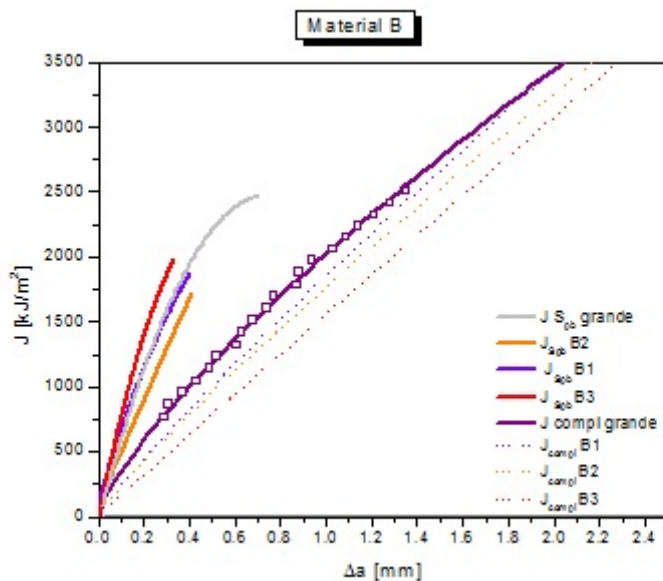


Figura 6. Curvas  $J-R$  para el material B, probetas chicas y probeta grande

Esto puede atribuirse a que en este caso el material no presenta una disminución de carga acentuada por crecimiento de fisura, dando como resultado una estimación de crecimiento de fisura muy pequeño. Por lo tanto, debido a las características del material no puede apreciarse una diferencia notoria en cuanto al tamaño de la probeta. Al estimar un crecimiento de fisura menor tanto en el caso de la probeta grande como en el de las probetas chicas las curvas  $J-R$

construidas muestran una pendiente mayor a las estimadas por el método de descargas parciales como muestra la figura 6. Obteniéndose entonces mediante el método  $S_{pb}$  para ambos tamaños de probetas curvas  $R$  correspondientes a materiales más tenaces.

Los autores consideran, que se debe seguir trabajando en el tema para poder esgrimir límites bien concisos en cuanto a los límites de aplicación de este método

## CONCLUSIONES

El método  $S_{pb}$  ha sido ampliamente utilizado en aleaciones metálicas y materiales poliméricos, tanto en condiciones estáticas como en condiciones dinámicas. En el presente trabajo, se analizan las condiciones de borde o límites de aplicación del mismo.

Se realizó el análisis con dos aceros microaleados utilizados para tubos, llamados en el trabajo materiales B y C. Se utilizó como método de referencia el método de descargas parciales. Para cada material estudiado se ensayaron probetas grandes y chicas.

En cuanto al tamaño, se encontró que la iniciación del crecimiento para probetas chicas se produce alrededor de carga máxima, apareciendo ésta como una condición para la utilización de  $S_{pb}$ , ya que cuando esto no se produce, como en el caso de las probetas grandes, la estimación del método es pobre, tal como se observó en el material C.

Por otro lado, en cuanto al comportamiento del material, cuando éste no presenta una disminución de carga acentuada por el crecimiento de fisura, es decir un material muy tenaz, se obtiene como resultado una estimación de crecimiento de fisura muy pequeña en comparación con la realmente acaecida.

## REFERENCIAS

- [1] H.A. Ernst, P.C. Paris, Technique of analysis of load displacement records by J integral methods, Nuclear regulatory Commission, NUREG/GR, 1222, January 1980.
- [2] P.C. Paris, H. Ernst, C.E. Turner, A J integral approach to development of h factors, Fracture Mechanics, Twelfth Conference, ASTM STP 700 (1980) 338–351.
- [3] H.A. Ernst, P.C. Paris, J.D. Landes, Estimation on J integral and tearing modulus T from single specimen record, ASTM STP 743 (1981) 476–502.
- [4] J.A. Rice, A path independent integral and the approximative analysis of strain concentration by notches and cracks, Journal of Applied Mechanics 35 (1968) 379–386.
- [5] J.R. Begley, J.D. Landes, in Fracture toughness STP 514, ASTM Philadelphia (1972) 1.
- [6] Standard Test Method For Measurement of Fracture Toughness, ASTM E1820, A.15 Normalization data reduction technique.
- [7] A. Barker, A DC Potential drop Procedure for crack initiation and R curve measurement during fracture ductile fracture test. ASTM STP 856, Philadelphia (1985) 394–410.
- [8] K.H. Schwalbe, D. Hellman, J. Heerens, J. Knaack, J. Muller-Ross, Measurement of stable crack growth using the DC potential drop and the partial unloading methods
- [9] R. Herrera, J.D. Landes, Direct J-R curve Analysis: A guide to the methodology. Fracture Mechanics: Twenty First Symposium, ASTM STP 1074 Philadelphia (1990) 24–43.
- [10] M.H. Sharobeam, J.D. Landes, The load separation and  $\eta_{pl}$  development in pre-cracked specimen test record, International Journal of Fracture 59 (1993) 213–226.
- [11] A.N. Cassanelli, J. Wainstein, L.A. de Vedia, A study to estimate instantaneous crack length using the separability parameter  $S_{pb}$ . ASME, Applied Mechanics and Materials Conference, University of California, San Diego, California, USA, 2001, pp. 27–29/6.
- [12] J. Wainstein, L.A. de Vedia, A.N. Cassanelli, A study to estimate crack length using the separability parameter  $S_{pb}$  in steels, Engineering Fracture Mechanics 70 (I17) (2003) 2489–2496.
- [13] J. Wainstein, P.M. Frontini, A.N. Cassanelli, J-R curve determination using the load separation parameter  $S_{pb}$  method for ductile polymers, Polymer Testing 23 (2004) 591–598.
- [14] J. Wainstein, L.A. Fasce, A. Cassanelli, P.M. Frontini, High rate toughness of ductile polymers,

Engineering Fracture Mechanics, V74n13 (2007) 2070-2083

[15] C.R. Bernal, A.N. Cassanelli, P.M. Frontini, A simple method for  $J$ - $R$  curve determination in ABS polymers, *Polymer Testing* 14 (1995) 85.

[16] C. Bernal, M. Rink, P.M. Frontini, Load separation principle in JR Curve determination of ductile polymers: A comparative analysis of the suitability of different materials deformation functions used in the normalization method. *Macromol. Symp.* (1999) 147–235.

[17] C. Morhain, J.I. Velasco, JR curve determination of magnesium hydroxide filled polypropylene using the normalization method, *Journal of Material Science* 37 (2002) 1635–1644.

[18] C. Morhain, J.I. Velasco, Determination of JR curve of polypropylene copolymers using the normalization method, *Journal of Material Science* 36 (2001) 1487–1499.

[19] M.H. Sharobeam, J.D. Landes, The load separation criterion and methodology in ductile fracture mechanics, *International Journal of Fracture* 47 (1991) 81–104.