

A. Boyano^a, J. de Gracia^a, A. Arrese^b, F. Mujika^b^aGRUPO MATERIALES + TECNOLOGÍAS / MECÁNICA de materiales
Departamento de Ingeniería Mecánica^a Escuela de ingeniería de Vitoria-Gasteiz c/ Nieves Cano 12, 01006 Vitoria-Gasteiz, UPV/EHU^b Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, Europa Plaza, 1, 20018 Donostia, UPV/EHU

Tasa de liberación de energía equivalente y estabilidad de grieta en la configuración ENFR de modo mixto I/II

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

Fractura interlaminar

Modo mixto

Tasa crítica de liberación de energía

Estabilidad de grieta

Se analiza el comportamiento de la propagación de la grieta mediante la configuración ENFR (End Notched Flexure test with roller). Se trata de una configuración para analizar fractura interlaminar en modo mixto I/II basada en el ensayo de Flexión con Entalla Final e incluye un rodillo metálico entre los dos brazos de la grieta para provocar un modo mixto de apertura. Se propone una tasa de liberación de energía equivalente teniendo en cuenta la interacción de los modos I y II, en base al criterio de fallo lineal. Se define la condición de estabilidad de crecimiento de grieta, en función de la derivada de la tasa de liberación de energía equivalente propuesta. Se realizan ensayos en probetas de laminado unidireccional reforzadas por fibra de carbono F593/T300 con el objeto de validar la tasa de liberación de energía equivalente y analizar la estabilidad de grieta. Por último, se resumen algunas recomendaciones para realizar ensayos mediante la configuración ENFR en condiciones óptimas.

Equivalent energy release rate and crack stability in the mixed-mode I/II ENFR test configuration.

ABSTRACT

Keywords:

Interlaminar fracture

Mixed-mode

Critical energy release rate

Crack stability

Crack propagation performance in the ENFR (End Notched Flexure test with roller) test configuration is analyzed. The test configuration is based on the ENF test with a roller introduced between the two surfaces of the crack in order to get mixed-mode. Based on the reliability of the linear criterion, an equivalent energy release rate is proposed taking into account the interaction between the two modes and II. The stability of the crack propagation is defined by means of the derivative of the proposed equivalent energy release rate. Experimental tests with specimens of F593/T300 carbon/epoxy unidirectional composite have been carried out to assess the proposed equivalent energy release rate and to evaluate the crack stability condition. Finally, some recommendations for performing tests in the ENFR configuration under optimum conditions are summarized.

1 Introducción

La tenacidad a fractura de un material se determina mediante la tasa crítica de liberación de energía, G_c . Para que ocurra el avance de grieta, la tasa de liberación de energía debe superar ese valor crítico. Así, uno de los objetivos principales de los ensayos de fractura es calcular la tasa crítica de liberación de energía. Se supone que se requiere una propagación estable de grieta para poder representar adecuadamente las curvas R [1].

En las últimas décadas, se han desarrollado diferentes configuraciones para analizar el modo mixto I/II de fractura. Sin embargo, en la norma no se define ninguna condición de estabilidad. Se menciona que para casos de relación de modo alta la propagación suele ser inestable y que eso impide conocer los valores de propagación de la tenacidad a fractura. También se comenta en la norma, que las grietas iniciales más largas, tienen mayor tendencia a una propagación estable [2]. En cuanto a los ensayos de modos puros I y II, la configuración DCB se considera estable siempre [3], y la configuración ENF se considera estable cuando se cumple que $a/L > 0,7$ [4,5].

En este trabajo se estudia el comportamiento del crecimiento de grieta en modo mixto I/II mediante la configuración de ensayo ENFR. Se define la condición de estabilidad de grieta en base a la derivada de una nueva tasa de liberación de energía propuesta en este trabajo. Analizando los datos experimentales durante toda la propagación, se comprueba la validez de la tasa de liberación de energía propuesta, y se estudia la estabilidad de grieta. Por último, se resumen algunas recomendaciones para realizar ensayos ENFR en condiciones óptimas

2 Descripción del ensayo ENFR

La configuración de modo mixto ENFR está basada en el ensayo ENF. Se trata de una probeta con grieta final centrada en el espesor. Con el fin de conseguir un modo mixto, se introduce un rodillo metálico entre ambos brazos de la grieta. El modo II se consigue mediante la aplicación de carga externa, y el modo I o de apertura, por la inserción del rodillo. En este trabajo el modelo analítico incluye las tres posiciones del rodillo mostradas en la Figura 1.

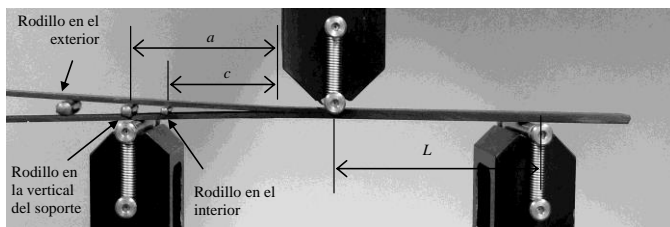


Figura 1 Descripción de la configuración de ensayo

Dónde a es la longitud de grieta, $2L$ la distancia entre los apoyos, y c es la distancia de la colocación del rodillo desde el soporte. Cuando se introduce el rodillo, el punto de aplicación de carga sufre un desplazamiento inicial hacia arriba, δ_0 . Al comenzar el ensayo el desplazamiento pasar por cero cuando

la carga tiene un valor positivo denominado P_0 , tal y como se muestra en el gráfico de la Figura 2.

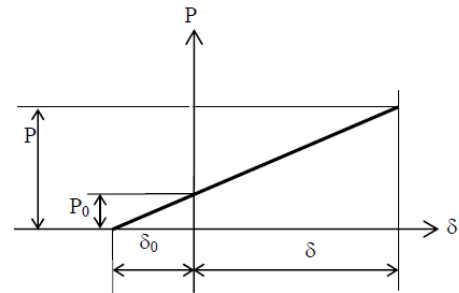


Figura 2 Gráfica teórica de carga-desplazamiento

Por tanto, la flexibilidad del ensayo se puede expresar como:

$$C = \frac{\delta}{P - P_0} = \frac{-\delta_0}{P_0} = \frac{\delta - \delta_0}{P} \quad (1)$$

Obteniendo los valores de δ_0 y P_0 para las tres posiciones del ensayo [6], la flexibilidad es:

$$\begin{aligned} C_{ext} &= \frac{1}{8E_f b h^3} \left[\frac{(a - c_o)^3 (3a^3 + 3ac_o^2 + c_o^3)}{a^3} + 2L^3 \right] \\ C_{int} &= \frac{3a^3 + 2L^3 + c_i^3 + 3ac_i^2}{8E_f b h^3} \\ C_{c=0} &= \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_f b h^3} \end{aligned} \quad (2)$$

Dónde R es el radio del rodillo, c es la distancia desde el apoyo, siendo c_0 cuando está hacia el exterior, c_i cuando está hacia el interior y c cuando está en la vertical del apoyo. P es la carga aplicada, E_f es el módulo de flexión, b es la anchura de la probeta y $2h$ es la altura total de la misma.

La tasa de liberación de energía para el ensayo ENFR, se puede expresar como [6]:

Exterior

$$G = \frac{3R^2 E_f h^3}{4a^4} - \frac{3PRc_o(a^2 - c_o^2)}{4a^4 b} + \frac{3P^2 c_o^2(a^2 - c_o^2)^2}{16a^4 E_f b^2 h^3} + \frac{9P^2(a - c_o)^2}{16E_f b^2 h^3}$$

Interior

$$G = \frac{3R^2 E_f h^3}{4(a - c_i)^4} + \frac{3PRc_i}{4b(a - c_i)^2} + \frac{3P^2 c_i^2}{16E_f b^2 h^3} + \frac{9P^2 a^2}{16E_f b^2 h^3}$$

$c = 0$

$$G = \frac{3R^2 E_f h^3}{4a^4} + \frac{9P^2 a^2}{16E_f b^2 h^3} \quad (3)$$

Los términos en negro corresponden a G_I que es la tasa de liberación de energía debida al modo I de fractura. Los términos en magenta corresponden a G_{II} , es decir al modo II de fractura. Esta aproximación analítica ha sido validada



mediante elementos finitos utilizando el método de TSEP (Two Step Extension Procedure), [6].

3 Tasa de liberación de energía equivalente

La propagación de la grieta sólo se produce si la energía disponible para una extensión de la grieta, G , es suficiente para proporcionar toda la energía que se requiere para crecimiento de la grieta [1]. La energía necesaria para el crecimiento de grieta se denomina tasa de liberación de energía crítica G_c . En el caso de modo mixto I/II, la tasa de liberación de energía es $G = G_I + G_{II}$, pero $G_c \neq G_{Ic} + G_{IIc}$. El criterio lineal es adecuado para la representación de la propagación de grieta en la configuración ENFR, donde la relación de modo varía durante el ensayo [7]. Por tanto, la condición para la propagación de las grietas se puede definir como:

$$G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic} \geq G_{Ic} G_{IIc} \quad (4)$$

El término de la izquierda es la energía disponible para una extensión de grieta y el término de la derecha es el valor crítico de esa energía. Por consiguiente, se puede definir una tasa de liberación de energía equivalente G_{eq} , y una tasa crítica de liberación de energía equivalente G_{eqc} de la siguiente forma:

$$G_{eq} = (G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic})^{1/2} \quad (5)$$

$$G_{eqc} = (G_{Ic} G_{IIc})^{1/2}$$

En consecuencia, se puede decir que la grieta crecerá cuando se cumpla la siguiente condición:

$$G_{eq} \geq G_{eqc} \quad (6)$$

4 Estabilidad de la propagación de grieta

4.1 Definición de estabilidad

Una definición general de estabilidad es que un sistema es estable si un cambio finito en los parámetros de entrada no causa un cambio infinito en los valores de salida [8]. Con respecto a ensayos de fractura realizados en máquinas de ensayo, los parámetros de entrada son la carga o el desplazamiento aplicado y el valor de salida es la longitud de la grieta. Así, un ensayo de fractura es estable durante el crecimiento de grieta cuando un cambio infinitesimal de la carga o el desplazamiento no causa un cambio infinito en la longitud de la grieta. En el presente trabajo, la condición de estabilidad se aplica a la tasa de liberación de energía equivalente G_{eq} de la siguiente forma:

$$\frac{dG_{eq}}{da} \leq 0 \quad (7)$$

Si el resultado de la derivada es positivo, el crecimiento de grieta es inestable debido a que la energía liberada es mayor que la necesaria para crear una nueva superficie. Si es

negativo, se ha de aplicar trabajo externo para mantener el crecimiento de grieta.

4.1.1 Desplazamiento controlado

Los ensayos llevados a cabo en máquinas de ensayo son considerados de desplazamiento controlado [1]. La condición de estabilidad en desplazamiento controlado se puede expresar como:

$$\left(\frac{dG_{eq}}{da} \right) = \frac{(G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic})}{2} \left(\left(\left(\frac{dG_I}{da} \right)_{cte} - \frac{9(P(a-c)^2 c + 2RE_I b h^3)^2}{8E_I b^2 h^3 (a-c)^4 (3a+c)} \right) G_{IIc} \right)^{-1/2} + \left(\left(\frac{dG_{II}}{da} \right)_{cte} - \frac{9Pa^2}{8E_I b^2 h^3} \left(\frac{9Pa^2}{3a^3 + 2l^3} \right) \right) G_{Ic} \right)^{-1/2} \leq 0 \quad (8)$$

El material empleado en el estudio analítico de la estabilidad, es un composite unidireccional T300/F593 de matriz epoxi reforzados con fibra de carbono. En la Tabla 1 se presentan algunas características de dicho material, entre las que se encuentran los valores de G_{Ic} y G_{IIc} obtenidos del ajuste lineal realizado previamente para comprobar la validez del criterio de fallo lineal [7]. El valor de G_{eqc} que se presenta en la Tabla 1, está calculado sustituyendo esos valores en la ecuación 5.

Tabla 1 Características mecánicas del material F593/T300

Propiedad	Valor
E_{1f1} (MPa)	107,4
E_{22} (MPa)	10,6
G_{12} (MPa)	4,3
G_{Ic} (J/m ²)	263
G_{IIc} (J/m ²)	1152
G_{eqc} (J/m ²)	550

Las dimensiones de probeta son: longitud 200 mm, espesor (2h) 3 mm y anchura (b) 15 mm. Se considera una luz (2L) de 120 mm.

Para determinar la condición de estabilidad es necesario conocer la carga aplicada para cada longitud de grieta. Se ha elegido el punto crítico o punto de iniciación para realizar el estudio de la estabilidad. La nomenclatura utilizada en este trabajo, es: ai-Rj-ck. Siendo ai la longitud de grieta inicial, Rj el radio del rodillo y ck el parámetro que define la posición del mismo. Por ejemplo, a40-R0,5-c10 hace referencia a un ensayo en el que se ha introducido un rodillo de 0,5 mm de radio a 10 mm de distancia del soporte hacia el interior de la grieta siendo la grieta inicial de 40mm.

En la Figura 3, se muestran los resultados de aplicar la condición de la ecuación de estabilidad a las diferentes condiciones de ensayo.



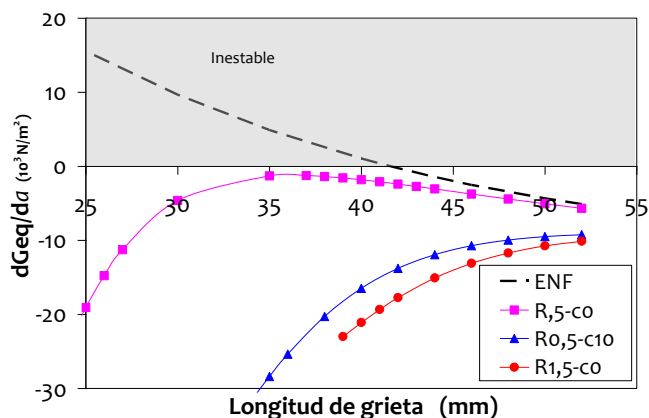


Figura 3 Estabilidad teórica de la propagación de grieta en desplazamiento controlado

Excepto el caso del ensayo ENF, todas las condiciones de ensayo estudiadas son estables. En el caso de ENF el límite de estabilidad se encuentra en $a=42$ que es el valor correspondiente a $a/L=0,7$ [5]. Es más, todas las curvas tienden hacia un valor negativo por lo que parece que son propensas a la estabilidad.

5 Evaluación experimental

5.1 Material y aparatos de ensayo

Las probetas utilizadas para el estudio experimental de la propagación de grieta, son composites unidireccionales T300/F593 de matriz epoxi reforzados con fibra de carbono. Se han fabricado laminados unidireccionales de 16 capas con un 55% de porcentaje de fibra. La grieta inicial se ha creado colocando una lámina de teflón en mitad del proceso de apilamiento. Se han determinado los módulos E_f y GLT' en cada probeta, siendo los resultados obtenidos:

$$E_f = 107.4 (\pm 1.4) \text{ GPa}$$

$$GLT' = 4.3 (\pm 0.4) \text{ GPa}$$

En cuanto a las dimensiones de las probetas, la longitud es 200 mm. Los valores nominales de la anchura (b) y espesor ($2h$) son 15 mm y 3 mm respectivamente. Todos los ensayos se realizan con una luz ($2L$) de 120 mm en una máquina de ensayos MTS Insight 100KN equipada con una célula de carga de 5KN con control de desplazamiento.

5.2 Condiciones experimentales

Se han llevado a cabo diferentes ensayos de modo mixto I/II con el objetivo de analizar la propagación de grieta. En la configuración ENFR la longitud de grieta se determina sin utilizar ningún medio óptico, en los puntos en los que se conocen la carga aplicada y el desplazamiento experimental, aplicando el método basado en la variación de la flexibilidad experimental [7].

Debido a que la relación de modo varía durante el ensayo, se utiliza la relación de modo en el punto de iniciación como parámetro para definir el modo mixto del ensayo. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las condiciones de ensayo estudiadas.

Tabla 2 Resumen de condiciones experimentales

ID	NOMENCLATURA	RELACIÓN DE MODO G_{II}/G INICIAL (%)
1.	a40-R0,5-c0	96
2.	a31-R0,5-c0	90
3.	a45-R1,5-c0	74
4.	a43-R0,9-c8	66
5.	a38-R0,7-c8	59

5.3 Curvas de Geq

En la Figura 4 se representan los valores experimentales punto a punto de la Geq propuesta en este trabajo y definida en la ecuación 8.

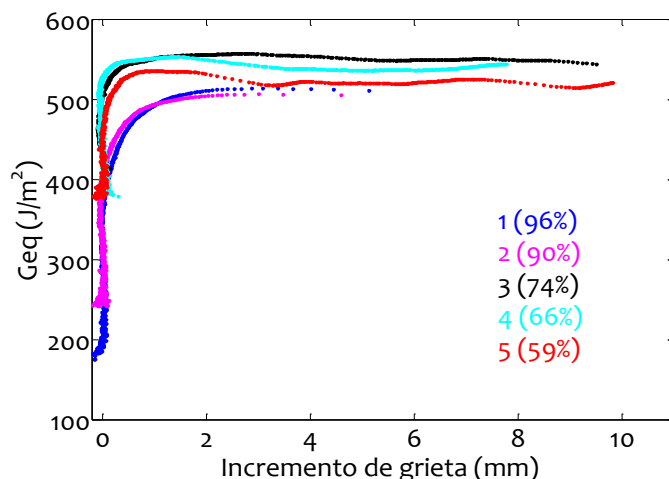


Figura 4 Valores experimentales de la tasa de liberación de energía equivalente

Todas las curvas de la tasa equivalente de liberación de energía tienden a un valor constante. El valor promedio se encuentra en el intervalo de 505 y 555 (J/m^2) durante toda la propagación. El valor constante mencionado concuerda con el valor teórico de $G_{Ceq}=550$ (J/m^2) que se muestra en la Tabla 1. En cuanto a la tasa equivalente de liberación de energía, la desviación máxima se da en el caso de los ensayos 1 y 2, y el error relativo máximo en este caso es del 8,5 %. Por lo tanto, la aproximación propuesta de la tasa equivalente de liberación de energía se considera válida para definir la condición de propagación de grieta en el ensayo ENFR para el material estudiado.

5.4 Valoración de la estabilidad

Durante el trabajo experimental se ha considerado que el crecimiento inestable de la grieta se produce cuando hay un salto en la curva de carga-desplazamiento.

En la Figura 5 se presentan las curvas de carga-desplazamiento de los cinco ensayos estudiados. El marcador circular indica el punto de iniciación de crecimiento de grieta.



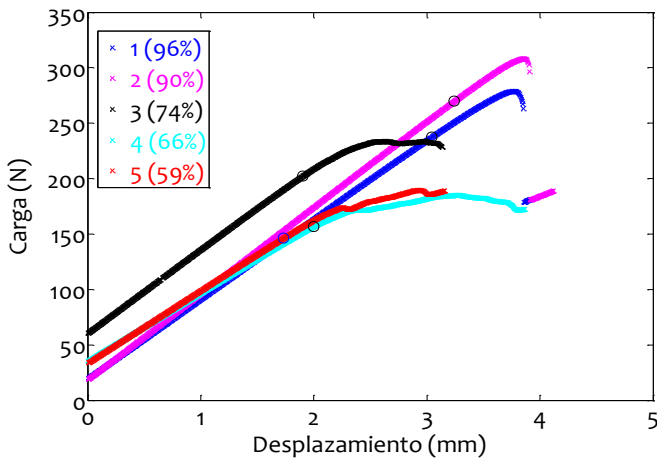


Figura 5 Curvas experimentales de carga-desplazamiento

Cuando la relación inicial de modo es cercana al modo II puro, el caso de los ensayos 1 y 2, al comenzar la propagación de grieta, la carga continúa aumentando. Eso significa que se está propagando de una manera estable. La carga una vez alcanzado su valor máximo disminuye súbitamente. Además, aparecen saltos en dos curvas. Por consiguiente, los ensayos 1 y 2 se consideran estables durante la mayor parte de la propagación, pero en la etapa final se vuelven inestables. En el resto de los casos, no hay saltos o caídas de carga repentinas durante la propagación de grietas. Se puede concluir entonces, que todos ellos son estables

La relación de la longitud de grieta a lo largo del desplazamiento se puede observar en la Figura 6.

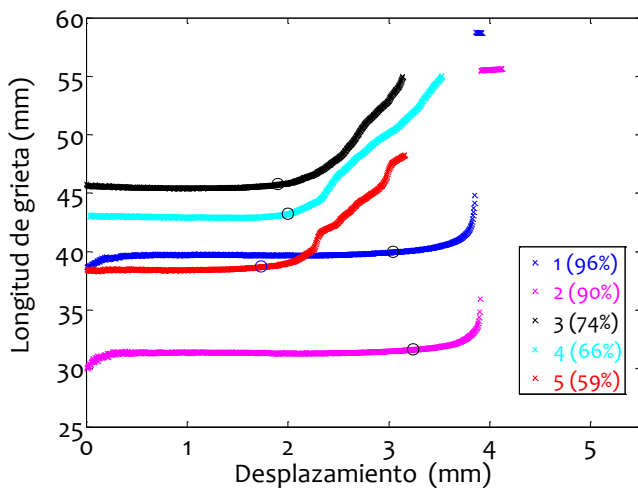


Figura 6 Longitud de grieta en función del desplazamiento

De acuerdo a la Figura 6, en las curvas correspondientes a los ensayos 1 y 2, en la primera etapa de la propagación, un cambio finito en el desplazamiento causa un cambio finito en la longitud de la grieta y por lo tanto puede considerarse estable, de acuerdo a la definición de estabilidad de la sección 3.1. Sin embargo, en la fase final de la propagación, un pequeño cambio en el desplazamiento causa un cambio mucho mayor en longitud de la grieta, y hay incluso saltos en la curva. Por lo tanto, se vuelven inestables. Para el resto de las pruebas, la propagación de la grieta comienza antes, y la pendiente de la curva es similar, lo que significa que se necesita un cambio finito en el desplazamiento para tener un

cambio finito en la longitud de la grieta. En consecuencia, todos los ensayos son estables según esta definición. Esta es la misma conclusión que se extrae mediante el análisis de curvas de carga-desplazamiento.

En la Figura 7 se puede observar el valor experimental de la ecuación 5.

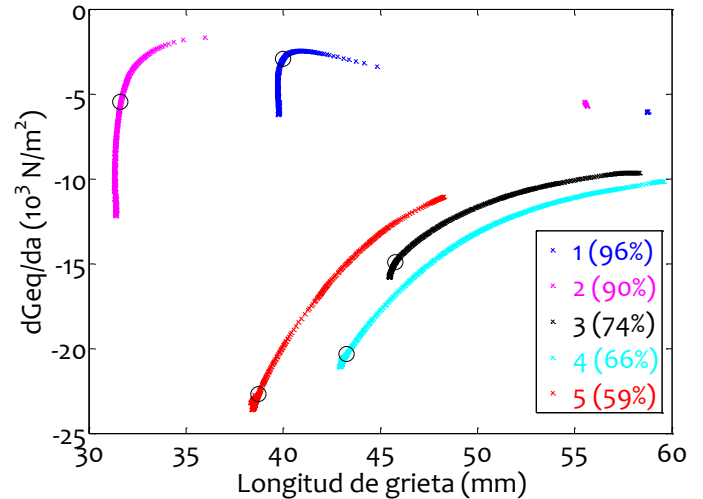


Figura 7 Estudio experimental de la condición de estabilidad

De acuerdo a la Figura 7, en el caso de los ensayos 1 y 2, la derivada de Geq durante la propagación tiene un valor cercano a cero. Aún así, todos los ensayos cumplen la condición de estabilidad ya que la derivada es siempre negativa. En los casos de ensayos con relación inicial de modo baja, el valor negativo de la derivada es mayor lo que significa que el ensayo es más estable.

6 Recomendaciones para realizar ensayos

Al realizar ensayos, para una geometría de probeta dada, son tres los parámetros que se han de definir: longitud inicial de grieta, radio del rodillo y posición del rodillo. Diferentes combinaciones de estos tres parámetros, provocarán diferentes ratios de modo. Por otra lado, se ha de tener en cuenta la estabilidad de la propagación de la grieta.

En consecuencia, los rangos propuestos de los parámetros para realizar ensayos ENFR son:

- Longitud inicial de grieta: $35 < a < 52$ mm
- Radio del rodillo: $0,5 < R < 1,5$ mm
- Posición del rodillo: $0 < c < 10$ mm

Entre las combinaciones de los valores propuestos se elegirán las que mejor cumplan el criterio de fallo lineal [7] siendo éstas las que tienen una relación de modo inicial entre 65 % y 75 %. Este hecho se puede constatar, observando la Figura 4 que muestra valores experimentales de Geq.



7 Conclusiones

Se ha propuesto una tasa de liberación de energía equivalente basada en el cumplimiento del criterio de fallo lineal. Esta tasa equivalente tiene en cuenta la interacción entre ambos modos de fractura. Los resultados experimentales obtenidos de probetas unidireccionales de carbono/epoxy F593/T300 muestran un buen acuerdo con la propuesta. Además, durante la propagación de la grieta el valor crítico de G_{eq} , es decir G_{eqc} , alcanza un valor constante y similar para todas las condiciones de ensayo estudiadas, por lo que puede considerarse una propiedad del material.

Se ha analizado la estabilidad de la propagación de grieta en la configuración ENFR mediante la derivada de G_{eq} . Los resultados experimentales han confirmado que en ensayos a desplazamiento constante todos los casos estudiados han resultado estables.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) la financiación del Grupo de Investigación Mecánica de Materiales GIU 16/51 en la convocatoria de 2016.

Referencias

- [1] Anderson TL. Fracture mechanics :fundamentals and applications. 3rd ed. : CRC Press, 2005.
- [2] ASTM D6671-01. Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites 2006.
- [3] ASTM D5528 – 01 Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. 2001.
- [4] ASTM D7905/D7905M-14 Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. 2014.
- [5] Carlsson LA, Gillespie JW, JR, Pipes RB. On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing. *Journal of Composite Materials* 1986;20:594-604.
- [6] Boyano A, Mollón V, Bonhomme J, De Gracia J, Arrese A, Mujika F. Analytical and numerical approach of an End Notched Flexure test configuration with an inserted roller for promoting mixed mode I/II. *Eng Fract Mech* 2015;143:63-79.
- [7] Boyano A, De Gracia J, Arrese A, Mujika F. Experimental assessment of an End Notched Flexure test configuration with an inserted roller for analyzing mixed-mode I/II fracture toughness. *Eng Fract Mech* 2016;163:462-75.
- [8] Bazant Z, Cedolin L. Stability of structures: elastic, inelastic, fracture, and damage theories. Oxford University Press. Inc, New York 1991.

