

A. Arrese<sup>a</sup>, J. de Gracia<sup>b</sup>, A. Boyano<sup>b</sup>, M. Lesaka<sup>a</sup>, F. Mujika<sup>a</sup><sup>a</sup> GRUPO MATERIALES + TECNOLOGÍAS / MECÁNICA DE MATERIALES Departamento de Ingeniería Mecánica Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa.<sup>b</sup> GRUPO MATERIALES + TECNOLOGÍAS / MECÁNICA DE MATERIALES Departamento de Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz

Universidad del País Vasco (UPV/EHU).

Plaza Europa 1, 20018 Donostia-San Sebastián.

[ainhoa.arrese@ehu.eus](mailto:ainhoa.arrese@ehu.eus)

## Ley cohesiva en modo II de uniones adhesivas

### 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:

Unión adhesiva

Ley cohesiva

Modo II

Ensayo ENF

Este trabajo presenta un método experimental para determinar la ley cohesiva de una unión adhesiva de pequeño espesor en modo II.

El método propuesto se basa en el ensayo de flexión en tres puntos con entalla final. La reducción de datos se realiza mediante el método basado en teoría de vigas incluyendo las rotaciones por flexión (BTBR), que incluye el efecto de las deformaciones locales, el cortante y las rotaciones de flexión. Mediante este método se determina la longitud de grieta inicial, la longitud de grieta aparente durante el avance y la curva de resistencia en modo II.

El desplazamiento relativo de cortadura en la punta de grieta se determina en función del avance de grieta aparente que se produce al progresar la generación de la zona de fractura. Para ello se emplea un modelo analítico basado en la teoría clásica de vigas.

Finalmente, representando la tenacidad a la fractura frente al desplazamiento relativo de cortadura y mediante la derivación numérica se determina la ley cohesiva.

## Mode II cohesive law of adhesive joints

### ABSTRACT

#### Keywords:

Adhesive joint

Cohesive law

Mode II

ENF test

A novel method is presented for the determination of mode II cohesive law for the characterization of delamination in thin adhesive joints

The proposed method is based on the three point end notched flexure test. The data reduction method used is the Beam Theory including Bending Rotation effects method (BTBR), which includes the effect of local deformations, shear and bending rotations. By this method, the initial crack length, the apparent crack length during the crack advance, and the mode II resistance curve are determined.

The relative shear displacement at the crack tip is determined as a function of the apparent crack advance that occurs when the generation of the fracture zone progresses. In order to determine the shear displacement an analytical analytical model based on the classical theory of beams is used.

Finally, the fracture toughness versus the shear relative displacement is represented and the cohesive law is determined by numerical derivation.

# 1 Introducción

Se presenta un nuevo modelo para la determinación de la ley cohesiva en modo II de uniones adhesivas de pequeño espesor. La tasa de liberación de energía  $G$  en función del avance de grieta  $\Delta a$  se determina mediante el método de reducción de datos denominado *Beam Theory including Bending Rotation effects* (BTBR) [1]. Mediante este método, la longitud de grieta para cada punto del ensayo se determina mediante la variación de flexibilidad. El desplazamiento relativo de cortadura en la punta de grieta  $\Delta$  se determina en función del avance de grieta equivalente, asumiendo que el desarrollo de la Zona de Proceso de Fractura (FPZ) es análogo al avance de grieta. Finalmente, se representa  $G$  en función de  $\Delta$  y se determina la ley cohesiva  $\tau = \tau(\Delta)$  mediante derivación numérica..

# 2 Metodología

La Fig. 1 muestra la configuración del ensayo de flexión en tres puntos con entalla final (ENF) de acuerdo a BTBR

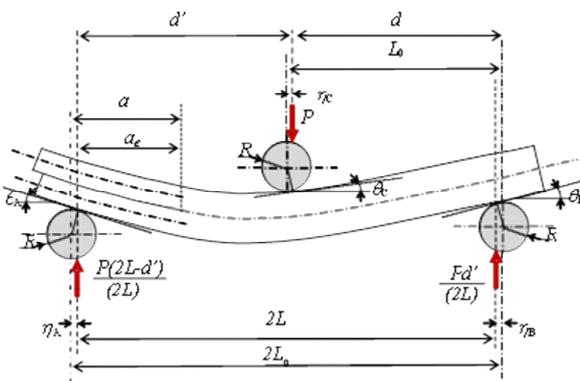


Figura 1. Configuración del ensayo ENF de acuerdo a BTBR

La integral-J es equivalente a la tasa de liberación de energía  $G$  para un cuerpo elástico. [2]

$$J = G = \frac{1}{b} \left( \frac{\partial V^*}{\partial a} \right)_P = G_I + \int_0^{\Delta} \tau(\Delta) d\Delta \quad \tau(\Delta) = \frac{dG}{d\Delta} \quad (1)$$

En la aproximación propuesta se asume que el desarrollo de la FPZ es análogo al avance de grieta equivalente  $\Delta a$ , relacionado con la variación de la flexibilidad.

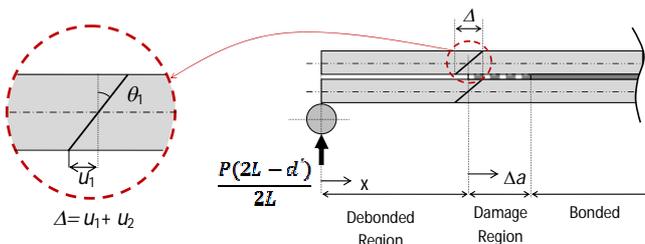


Figura 2. Zona de proceso de Fractura.

De acuerdo a la teoría clásica de vigas  $\Delta$  puede expresarse de la siguiente forma:

$$\Delta = u_2 - u_1 = \frac{6P}{4EBh^3} [\theta(a_{ie} + \Delta a)^2 - a_{ie}^2] [1 - \psi] \quad (2)$$

donde

$$\psi = R \left[ -\frac{\theta_A}{2L_0} + \frac{\theta_B}{2L_0} + \frac{\theta_C}{L_0} \right]$$

La relación  $G=G(\Delta)$  se aproxima a una función logística de la siguiente forma:

$$\frac{G-G_I}{G_{ss}-G_I} = [e^{-1/F(\Delta)}] \quad F(\Delta) = \frac{-1}{L_0 \left[ \frac{G-G_I}{G_{ss}-G_I} \right]} \quad (3)$$

$F(\Delta)$  se determina mediante un ajuste lineal por regiones de los datos experimentales. Finalmente la ley cohesiva se obtiene median derivación numérica.

$$\tau(\Delta) = \frac{dG}{d\Delta} = (G_{ss} - G_I) \frac{e^{-1/F(\Delta)}}{F(\Delta)^2} \left[ \frac{dF(\Delta)}{d\Delta} \right] \quad (4)$$

# 3 Procedimiento Experimental

## 3.1 Material

Para la fabricación de las probetas se han utilizado probetas unidireccionales fabricadas a partir de prepregs de carbono/epoxi T6T/F593 proporcionados por Hexcel Composites con 16 capas unidireccionales que han sido delaminadas completamente. Los adherentes fruto de la delaminación completa han sido unidas por el adhesivo Loctite 9644 Hysol.

Las dimensiones nominales de la probeta son 3 mm de espesor y 16mm de ancho. La grieta inicial se genera mediante un inserto de teflón.

Los ensayos se han realizado en una maquina de ensayo universal MTS-Insight 10 con célula de carga de 10kN

## 3.2 Ensayos Preliminares

Las propiedades elásticas  $E_f$  and  $G_{13}$ , se han determinado mediante el procedimiento propuesto por Mujika [3], siendo el modulo de flexión 107GPa y el modulo de cortadura 3 GPa.

El desplazamiento de la probeta ( $\delta_{spec}$ ) se determina de las curvas carga desplazamiento. El desplazamiento experimental ( $\delta_{exp}$ ) es la suma del desplazamiento de la probeta y el desplazamiento debido a la flexibilidad del sistema.

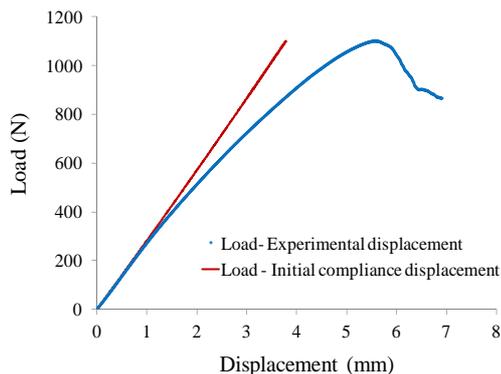
$$\delta_{exp} = \delta_{spec} + C_s P \longrightarrow \delta_{spec} = \delta_{exp} - C_s P$$

La flexibilidad del sistema se determina experimentalmente siendo su valor promedio  $C_s = 1/15 \cdot 10^{-3}$  mm/N.

## 3.3 Resultados

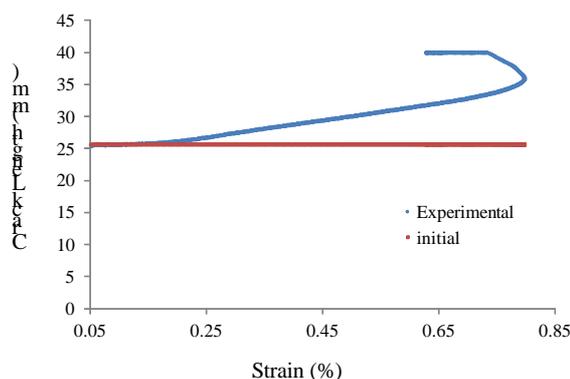
En la Figura 3 se muestra la curva experimental carga desplazamiento correspondiente a la probeta S1.





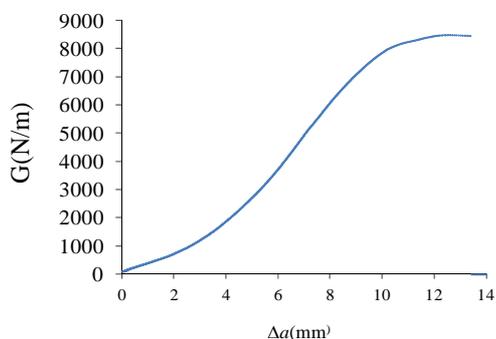
**Figura 3.** Curva carga-desplazamiento.

Una vez determinada la longitud de grieta para cada punto del ensayo, la longitud de grieta inicial se determina como promedio de los valores en el rango de carga donde la longitud de grieta se mantiene constante, tal y como se aprecia en la Fig. 4. Por lo tanto, la iniciación del daño local está relacionada con el primer punto donde el avance de grieta es distinto de cero.



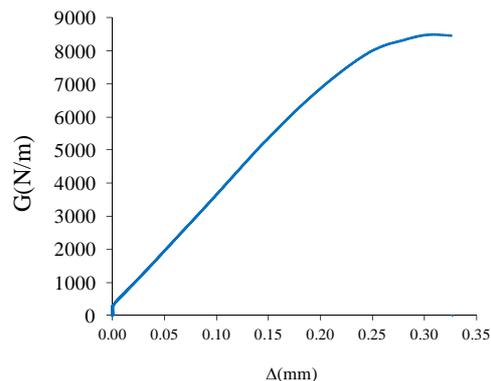
**Figura 4.** Evolución de la longitud de grieta

Teniendo la longitud de grieta inicial y la longitud de grieta para cada punto del ensayo, es posible obtener la curva-R, la cual representa la evolución de G respecto al avance de grieta, Fig. 5.



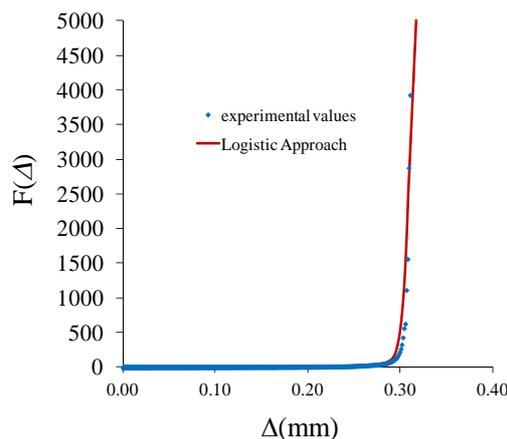
**Figura 5.** Curva R.

De acuerdo a la Eq. (2) el desplazamiento de cortadura en la punta de grieta puede ser determinado para cada punto del ensayo sustituyendo el correspondiente avance de grieta. La Fig 6. muestra la curva  $G-\Delta$  que corresponde a la probeta S1.

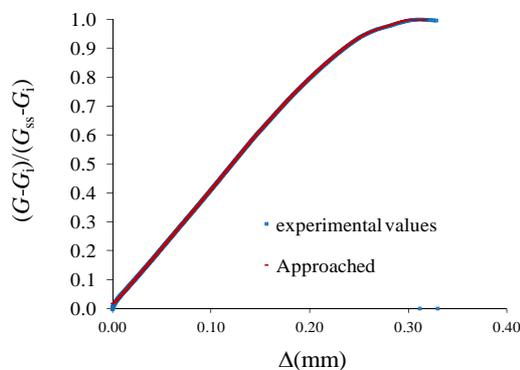


**Figura 6.** Curva  $G-\Delta$ .

Para evitar el ruido excesivo de los datos experimentales, los datos los datos  $G-\Delta$  se aproximan a la función logística de la Eq (3). La función  $F(\Delta)$  se ajusta a los datos experimentales mediante un ajuste lineal por regiones. Fig. 7 muestra los datos experimentales obtenidos de la Eq. (3) y la curva ajustada. Con el fin de evaluar la precisión del ajuste, los datos experimentales y la función logística aproximada se representan en la Fig. 8.



**Figura 7.** La función  $F(\Delta)$



**Figura 8.**  $(G-G_{ini})/(G_{ss}-G_{ini})$  experimental y aproximada

Reemplazando los valores de  $F(\Delta)$  y sus derivadas obtenidas por diferenciación numérica en la Eq. (4), se obtiene la ley cohesiva.



La Fig. 9 muestra la ley cohesiva de la probeta S1

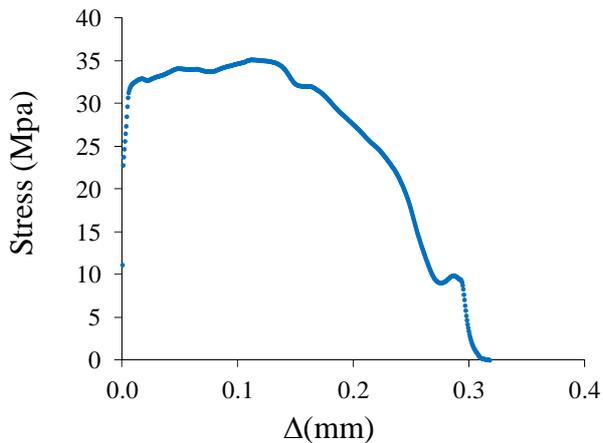


Figura 9. Ley cohesiva de la probeta S1.

## 4 Conclusiones

En el presente trabajo se propone un nuevo método para la determinación de la ley cohesiva en modo II para uniones adhesivas de pequeño espesor.

La aproximación propuesta, se basa en la correlación entre la tasa de liberación de energía desarrollada ( $G$ ) en función del desplazamiento de cortadura de la punta de grieta ( $\Delta$ ).

La Curva de Resistencia se determina obteniendo  $G$  en función del avance de grieta cuya determinación se basa en la variación de la flexibilidad de la probeta debido al avance del daño.

El desplazamiento de cortadura de la punta de la grieta se determina en función del avance de grieta equivalente suponiendo que el desarrollo de la Zona de Proceso de Fractura es análogo a un avance grieta.

Finalmente, representando la tasa de liberación de energía y el desplazamiento de cortadura de la grieta determinados, y mediante un ajuste a una función logística de la curva  $G-\Delta$  y la ley cohesiva experimental se determina por diferenciación numérica.

Mediante el método propuesto se ha evaluado una unión realizada con LOCTITE HYSOL 9644. La resistencia cohesiva obtenida es del orden de 34 MPa,

El método propuesto proporciona una manera sencilla de obtener la ley cohesiva en modo II utilizando únicamente datos de desplazamiento y carga proporcionados por la máquina de ensayo universal, sin necesidad de ninguna medición de desplazamiento externo y sin asumir ninguna forma de la ley cohesiva.

## 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] A. Arrese, N. Carbajal, G. Vargas, F. Mujika F. A new method for determining mode II R-curve by the End-Notched flexure test. *Engineering Fracture Mechanics*, 77, 2010, p.77-20.
- [2] Anderson TL. *Fracture Mechanics. Fundamentals and applications*. 2005
- [3] Mujika F. On the effect of shear and local deformation in three point bending tests. *Polymer testing* 2007;26:869-77

