

ENSAYO DE FLEXIÓN CON ENTALLA FINAL PARA LA PROPAGACIÓN DE GRIETAS INTERLAMINARES EN MODO II EN MATERIALES COMPOSITOS. ESTUDIO EXPERIMENTAL EN TRES LABORATORIOS

J. Vicens*, I. Baraibar, J.A. Viña***, J.G. Carrión**, B. Corbella*, A. Fernández Canteli***, A. Argüelles***, J.M. Pintado**, N. Blanco*, J. Costa***

*AMADE, Universitat de Girona, Escola Politècnica Superior,
Campus Montilivi 17071 Girona, Catalunya, España
Email: pep.vicens@udg.es
Tfno: 972418908 Fax: 972418098

** Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA),
Cra. Ajalvir, p.k. 4 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, España
Email: baraibargmi@inta.es
Tfno.: 915201510 Fax: 915201274

*** Departamento de Construcción e Ingeniería, Universidad de Oviedo,
Campus de Viesques, edificio Oeste 33204 Gijón, Asturias, España
Email: jaure@uniovi.es
Tfno: 985182021 Fax: 985182022

Resumen. Este trabajo presenta un análisis de la reproducibilidad del ensayo a flexión con entalla final (*End Notched Flexure*, ENF) para la determinación de la energía de fractura de iniciación y propagación de grietas interlaminares en modo II en materiales compuestos. Los ensayos se realizaron en una ronda de comparación de metodologías y resultados por los laboratorios del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Universidad de Oviedo (UniOvi) y Universidad de Girona (UdG) en el marco de un proyecto de investigación del Programa Nacional de Materiales (MAT2003-09768-C03). El objetivo del trabajo es analizar el método de ensayo, las dificultades o ambigüedades de su aplicación, la variabilidad de resultados obtenidos mediante distintos métodos de cálculo y elucidar cuál de ellos conlleva menor dispersión. Así, se observa que los métodos basados en teoría de vigas producen mayor variabilidad, mientras que el método con menor dispersión es el basado en la calibración experimental de la flexibilidad.

Abstract. This study presents an analysis of the reproducibility of the End Notched Flexure (ENF) test for the determination of the fracture energy of interlaminar cracks in mode II in laminated composite materials. The tests were carried out in a comparison round of methodologies and results in the frame of a research project of the Programa Nacional de Materiales (MAT2003-09768-C03) by the laboratories of Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Universidad de Oviedo (UniOvi) and Universidad de Girona (UdG). The objective of the work is to analyse the test method, application difficulties, variability in results obtained by means of different calculation methods and to elucidate which of these implies less dispersion. Thus, it is observed that the methods based on the beam theory imply higher variability, while the method based on the experimental calibration of the compliance involves less dispersion of results.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de los materiales compuestos laminados se ha ido extendiendo a un amplio abanico de aplicaciones industriales. Sin embargo, es en sectores tecnológicamente avanzados como el aeronáutico donde este tipo de materiales resultan de mayor interés y donde es mayor la necesidad de predecir la durabilidad de los elementos estructurales que con ellos se construyen. A diferencia de lo que ocurre en los materiales tradicionales, metálicos, el fallo de un material compuesto laminado está asociado a la aparición de diversos mecanismos de daño. De entre ellos, uno de los mecanismos más críticos por su repercusión en la integridad del componente y por su dificultad de predicción es el despegue de dos láminas adyacentes del

compuesto (deslaminación o grieta interlaminar). Este mecanismo de daño no sólo es responsable de una importante reducción de la rigidez y resistencia del laminado sino que además puede facilitar la absorción de humedad por parte del compuesto, un exceso de vibraciones en la estructura, pandeo bajo el efecto de cargas a compresión, etc. A esto debe añadirse el hecho de que las grietas interlaminares pueden formarse fácilmente después de un impacto y que suelen localizarse en el interior del laminado, resultando de difícil detección. La deslaminación y su difícil predicción y detección es uno de los factores que explica que este tipo de materiales no se emplee de forma más extendida en sectores con responsabilidad civil. La atención mencionada a la propagación de grietas interlaminares se pone de manifiesto también por el

esfuerzo de comités de normalización de diversas instituciones en generar protocolos y normativas para los ensayos experimentales que determinen sus parámetros más importantes. Existen ensayos normalizados por ASTM para la determinación de G_c en modo I [1] y modo mixto [2] pero no en modo II. Por otro lado, la *European Structural Integrity Society* (ESIS) emitió un protocolo de ensayo en modo II en 1992 mediante el método de flexión con entalla final, (más conocido por ENF, *End Notch Flexure*) [3].

El objetivo del presente trabajo es comprobar la reproducibilidad de la determinación de la tenacidad a la fractura para la propagación de grietas interlaminares en modo II, y asegurar la coincidencia de metodologías y resultados entre los tres laboratorios que participan en el proyecto de investigación del Programa Nacional de Materiales MAT2003-09768-C03: los laboratorios del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Universidad de Oviedo (UniOvi) y Universidad de Girona (UdG). Asimismo, se analizan los aspectos de los ensayos más sujetos a la subjetividad del investigador y que, por tanto, introducen mayor dispersión de resultados entre laboratorios. Finalmente, se analizan los distintos métodos de cálculo y se identifican aquellos más consistentes y que generan menor variabilidad de resultados.

Durante la realización de los ensayos, cada laboratorio ensayó tres lotes de probetas de material compuesto con fibra de carbono y matriz de epoxi. Las probetas, suministradas por INTA, eran de tres materiales compuestos distintos y su composición y propiedades mecánicas eran desconocidas para el resto de laboratorios. El acondicionamiento de las probetas y los ensayos ENF de crecimiento de grieta en modo II se realizaron según un detallado protocolo desarrollado en el seno del proyecto y basado en el *Protocol for interlaminar fracture testing no. 2 – Mode II (ENF)* de mayo de 1992 de la *European Structural Integrity Society* (ESIS) [3]. De esta manera se garantizaron las mismas condiciones y procedimientos de ensayo en los tres laboratorios.

Los ensayos se realizaron en los tres laboratorios de forma independiente y posteriormente se llevó a cabo la comparación y análisis de los resultados experimentales.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. El ensayo ENF. Generalidades

El ensayo ENF fue inicialmente propuesto por Carlsson *et al.* [4] y se basa, tal y como se muestra en el esquema de la Fig. 1, en un ensayo a flexión a tres puntos en el que la grieta interlaminar preexistente es forzada a propagarse por los esfuerzos cortantes que aparecen en las dos superficies de la grieta. Estos cortantes se generan cuando se carga la probeta y aparece un movimiento relativo entre ambas superficies de la grieta, causando la propagación de ésta en modo II. Este

ensayo suele utilizarse para materiales compuestos con refuerzo en forma de fibra larga y orientada, habitualmente unidireccional y en la dirección longitudinal de la probeta. A partir de los resultados del ensayo se obtiene el valor de la tenacidad de la fractura para la iniciación de grietas interlaminares por cortante (modo II), G_{IIc} .

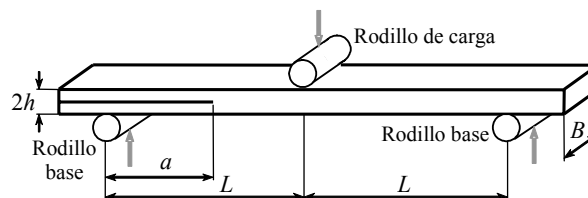


Fig. 1. Esquema del ensayo *End Notched Flexure* (ENF)

2.2. Procedimiento de ensayo

Las probetas de tres materiales distintos fueron producidas por el laboratorio de INTA obedeciendo a las especificaciones de producción del sector aeronáutico. Las probetas fueron sometidas a un acondicionamiento previo al ensayo de determinación de la tenacidad a la fractura por cortante, G_{IIc} , para minimizar su contenido en humedad con el fin de conseguir un estado común del material a ensayar en los tres laboratorios.

De acuerdo con el protocolo ESIS, antes de proceder a su ensayo, la probeta de material compuesto debe ser sometida a un proceso de calibración experimental de flexibilidad para distintas longitudes de grieta. Este proceso se debe llevar a cabo mediante un ciclo de carga y descarga de la probeta durante el cual se almacenan los valores de carga y desplazamiento registrados en la célula de carga y transductor de desplazamiento de la máquina de ensayo para cada longitud de grieta. Según el protocolo elaborado en el seno del proyecto, y para asegurar que con la carga aplicada no se sobrepasa la zona lineal, la carga máxima a aplicar debe ser menor que

$$P_{lin} = \frac{B\sqrt{G_{IIc}Eh^3}}{40} \quad (1)$$

donde G_{IIc} corresponde a un valor estimado de la tenacidad de fractura por cortante del material; B corresponde a la anchura de la probeta; h es la mitad del espesor de la probeta y E es el módulo de rigidez a flexión.

Posteriormente, y con el fin de obtener un fondo de grieta reproducible, se procede a la propagación en modo I de la grieta iniciadora. En este caso, se emplea el ensayo *Double Cantilever Beam* (DCB) [1] para obtener un crecimiento en modo I de entre 2 y 3 mm.

Durante el ensayo, se debe poner especial atención en asegurar la correcta alineación de la probeta con el

utilaje y en situar el frente de grieta, después de la propagación en modo I, a 25 mm del rodillo de apoyo, es decir, $a = 25$ mm. La correcta situación del frente de grieta respecto al rodillo de apoyo se debe asegurar mediante la calibración experimental de la flexibilidad y un proceso iterativo de carga y descarga en la zona lineal. Una vez situada la probeta en la posición correcta, se inicia el movimiento descendente del rodillo de carga a una velocidad entre 0.5 y 1 mm/min a la vez que se almacenan los valores de carga y desplazamiento. El inicio de la propagación de la grieta corresponde al punto donde se da una disminución súbita de la carga aplicada, si bien, siguiendo una práctica habitual en el sector aeronáutico para este tipo de ensayos, es aconsejable mantener el movimiento descendente del rodillo de carga hasta la detención del crecimiento de grieta y el repunte lineal de la curva carga/desplazamiento. A partir de este momento se invierte el movimiento del rodillo de carga hasta descargar completamente la probeta. Mediante un nuevo ciclo de carga/descarga en la zona lineal elástica y la calibración experimental de la flexibilidad se determina la longitud final de grieta.

Para el análisis de resultados y obtención de la tenacidad a la fractura por cortante, G_{IIc} , primero se debe representar para cada probeta la curva de la variación de la flexibilidad experimental respecto al cubo de la longitud de grieta. Este cálculo permite tanto la correcta colocación de la probeta en el utilaje como la estimación experimental de la longitud final de grieta. Asimismo, también es necesario representar para cada probeta ensayada la curva carga-desplazamiento identificando los puntos de no-linealidad (nl), carga máxima (max) y 5% de incremento de la flexibilidad (5%), tal y como se representa en la Fig. 2.

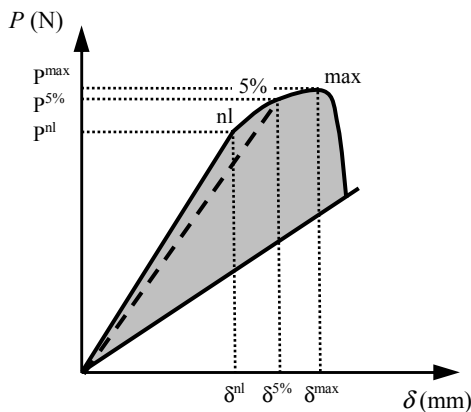


Fig. 2. Esquema de curva carga-desplazamiento

De acuerdo con el protocolo elaborado y las recomendaciones de ESIS, el cálculo de G_{IIc} debe realizarse para los tres puntos descritos en la Fig. 2. No obstante, en el marco del presente trabajo se ha observado que la determinación experimental del punto de no-linealidad responde a una apreciación subjetiva muy dependiente de la magnificación a la que se observe la gráfica en la proximidad de dicho punto. Por ello, este punto no se

consideró para la comparación entre laboratorios. Asimismo, en todas las probetas ensayadas se observó que el punto correspondiente al 5% se situó más allá del punto de carga máxima. En consecuencia, y tal y como indica el protocolo de ESIS, sólo se tuvo en cuenta el punto de carga máxima.

Así, para el cálculo de G_{IIc} mediante el ensayo ENF se puede utilizar cualquiera de los métodos expuestos en el protocolo de ESIS. Según el método de la calibración experimental de la flexibilidad (CE), la tenacidad a la fractura por cortante viene dada por

$$G_{IIc} = \frac{3ma^3P^2}{2B} \tag{2}$$

donde m corresponde a la pendiente de la recta de calibración de la flexibilidad respecto al cubo de la longitud de grieta; a corresponde a la longitud de la grieta; P corresponde a la carga aplicada. Para el cálculo de G_{IIc} según la teoría de vigas directa (TV), se debe emplear la expresión

$$G_{IIc} = \frac{9a^2P\delta}{2B(2L^3 + 3a^3)} \tag{3}$$

donde δ corresponde al desplazamiento del rodillo de carga; L corresponde a la distancia entre el punto de apoyo y el punto de aplicación de la carga. Para la teoría de vigas corregida (TVC), G_{IIc} se determina según

$$G_{IIc} = \frac{9P^2a^2}{16B^2Eh^3} \tag{4}$$

donde E , módulo a flexión de la probeta, viene dado por

$$E = \frac{L^3}{2BCh^3} \tag{5}$$

siendo C el valor de la flexibilidad cuando $a = 0$.

2.3. Experimentos

Para la comparación experimental de resultados entre los tres laboratorios (INTA, UniOvi y UdG), cada laboratorio recibió y ensayó tres lotes de probetas. Cada lote correspondía a un material compuesto de fibra de carbono unidireccional y matriz epoxi de características distintas bajo la designación genérica de 3M, 4C y 4N. La composición y propiedades mecánicas de cada lote de probetas eran desconocidas por los laboratorios UniOvi y UdG. Los paneles se laminaron de acuerdo a las especificaciones de producción del sector aeronáutico utilizando una película desmoldeante como grieta iniciadora, situándose ésta en el plano medio del laminado. Las probetas empleadas se cortaron de dichos paneles de manera que sus dimensiones nominales correspondieron a $B = 25$ mm, $2L = 100$ mm y $2h = 6$ mm. P previo a los ensayos, todas las probetas fueron

sometidas a un proceso de acondicionamiento para minimizar su contenido en humedad. Para facilitar la localización del frente de grieta durante el ensayo, los bordes laterales de las probetas fueron recubiertos con fluido corrector soluble en agua y se realizaron unas marcas de referencia a intervalos de 1mm. Todos los ensayos se llevaron a cabo en condiciones de temperatura y humedad controladas.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se tabulan los resultados medios obtenidos en cada laboratorio, la media de los valores obtenidos en los tres laboratorios y su desviación estándar, para cada uno de los materiales ensayados: 3M, 4N y 4C.

Tabla 1: Resultados de G_{IIc} para los tres materiales según el método de la calibración experimental de la flexibilidad

G_{IIc} (J/m ²)					
	UdG	INTA	UniOvi	Media	Desv. Est.
3M	760	849	764	791	50.3
4N	737	769	819	775	41.1
4C	1090	1331	1129	1183	129

Tabla 2: Resultados de G_{IIc} para los tres materiales según el método de la teoría de vigas

G_{IIc} (J/m ²)					
	UdG	INTA	UniOvi	Media	Desv. Est.
3M	840	856	1168	955	185
4N	732	768	1187	896	253
4C	1288	1410	1817	1505	277

Tabla 3: Resultados de G_{IIc} para los tres materiales según el método de la teoría de vigas corregida

G_{IIc} (J/m ²)					
	UdG	INTA	UniOvi	Media	Desv. Est.
3M	830	1080	1300	1070	235
4N	796	1002	1360	1053	286
4C	1245	1707	2036	1662	397

Se puede observar que los resultados mostrados en la tabla 1, obtenidos con el método de calibración de flexibilidad, presentan una cohesión superior a los de las otras dos. En las tablas 2 y 3 aparecen tabulados los resultados correspondientes a la teoría de vigas y teoría de vigas corregida. La aplicación de estos métodos hace aumentar la dispersión de los resultados.

Para ilustrar la dependencia del valor de tenacidad obtenido con el método de cálculo se han representado

en las figuras 3 a 5 los resultados obtenidos para cada material y según el método de análisis utilizado.

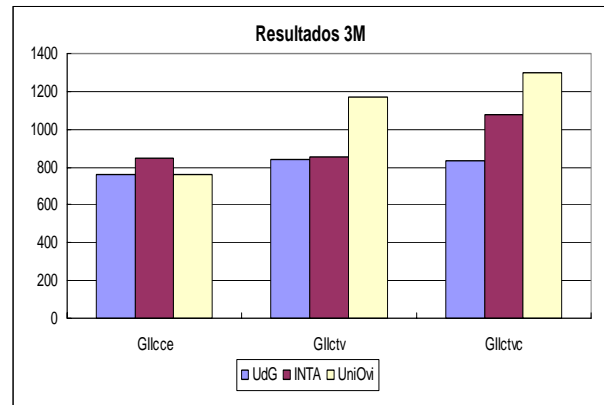


Fig.3. Resultados para el material 3M

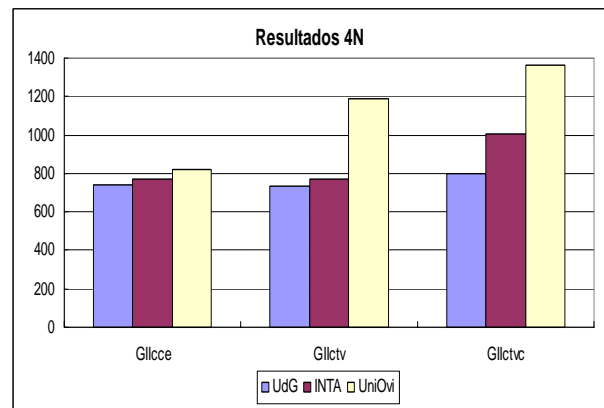


Fig.4. Resultados para el material 4N

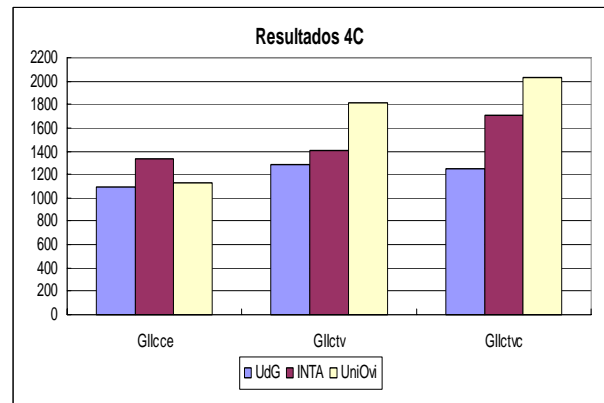


Fig.5. Resultados para el material 4C

Los valores de G_{IIc} obtenidos utilizando los métodos de cálculo descritos anteriormente presentan una variación relativa que se conserva en mayor o menor grado entre los distintos laboratorios participantes en el proyecto. Dicha variación consiste en que el método de la calibración experimental de la flexibilidad es el que resulta en un valor más conservador seguido del de teoría de vigas y finalmente el mayor valor de la tenacidad se obtiene de la teoría de vigas corregida. Se observa en las figuras anteriores como la columna correspondiente al laboratorio UniOvi presenta valores

superiores en los métodos de teoría de vigas y teoría de vigas corregida.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado se analiza la sensibilidad de los distintos métodos de cálculo a la subjetividad del investigador y su metodología. Así mismo, se señalan los aspectos del análisis de datos cuya diferente interpretación por parte de los laboratorios participantes en esta ronda de ensayos ha motivado una mayor dispersión de resultados finales.

4.1. Sensibilidad de los métodos de cálculo

Las expresiones de cálculo de G_{IIC} según la teoría de vigas y la teoría de vigas modificada, contenidas en las ecuaciones (3) y (4), implican una misma dependencia con los parámetros geométricos de la probeta (B , h) y del ensayo (L). Además, la determinación de estos parámetros no es sensible a la subjetividad del investigador.

En cambio, la determinación de la longitud de la grieta, a , es un aspecto que contiene varias fuentes de incertidumbre. El hecho de que el frente de grieta no sea plano y perpendicular a la dirección de avance de la grieta, desaconseja su determinación a partir de la observación de los laterales de la probeta (método éste además de notable subjetividad dada la dificultad de identificar en que extensión la grieta está ya efectivamente cerrada). Por ello, se determina la medida de grieta inicial a partir de un método indirecto: utilizando la recta de calibración de la flexibilidad $C(a^3)$. Al error experimental inherente a una metodología indirecta de este tipo, hay que añadir el hecho de que la recta de calibración de flexibilidad se obtiene para un frente de grieta plano (el inserto), bien distinto al frente de grieta resultante de la apertura de la pregrieta en modo I a partir de la cual se realizará el ensayo a flexión. Además, la determinación de G_{IIC} tienen una fuerte dependencia con a : el método de cálculo basado en la flexibilidad experimental, ec. (1), depende de a^3 , mientras que los basados en teoría de vigas dependen de a^2 . De ambos aspectos, se puede concluir que la determinación de la longitud de grieta es el aspecto geométrico que más error genera en la determinación de G_{IIC} y que causa además la disparidad de resultados entre el método de la flexibilidad experimental y los basados en teoría de vigas.

Los valores obtenidos directamente del ensayo, a partir de la curva $P-\delta$, P_X y δ_X (donde X puede ser nl , 5% o max) tienen una influencia notable sobre el cálculo siguiendo cualquiera de los métodos citados. Además, los métodos de flexibilidad experimental y teoría de vigas corregida contienen el término de fuerza al cuadrado mientras que en la teoría de vigas la dependencia con la fuerza es lineal. Por otra parte, en los métodos de teoría de vigas existe una dependencia lineal con el desplazamiento, δ_X , mientras que el método de flexibilidad experimental no

requiere su determinación. Ésta es una ventaja notable del método de flexibilidad experimental puesto que la determinación de δ_X , como se describe más adelante, contiene ciertas ambigüedades.

4.2. Elección de los valores de fuerza y desplazamiento de iniciación de grieta

Como se ha comentado en el apartado anterior la sensibilidad de los métodos de cálculo tiene una fuerte relación con los resultados experimentales obtenidos y su manipulación. Inicialmente según el procedimiento de ESIS [3] y el protocolo elaborado por los participantes en este estudio para este ensayo, se deberían tabular tres pares de valores fuerza-desplazamiento. El punto de no linealidad (nl), el punto de máxima carga (max) y el punto correspondiente al incremento del 5% de la flexibilidad (5%) como se observa en la Fig. 2.

Finalmente, se ha considerado que los puntos que permiten una mejor comparación de resultados son los correspondientes a carga máxima P_{max} y desplazamiento máximo δ_{max} . Se ha descartado utilizar los valores correspondientes a los puntos de desviación de la linealidad por la imposibilidad de aplicar un criterio en el que no influyera la subjetividad del analista en el momento de elegir el punto adecuado. En efecto, la determinación de dicho punto depende en gran medida del aumento al que se observa la gráfica y del criterio de desviación permitida entre la curva experimental y la recta de regresión correspondiente a la zona lineal. Los valores que corresponderían a 5% tampoco han sido consignados porque en los materiales estudiados se encuentran más allá del punto de carga máxima.

4.3. Incertidumbre en la elección de los puntos de iniciación

Los puntos, P_{max} y δ_{max} que se utilizan para el cálculo de G_{IIC} son obtenidos directamente de la gráfica carga-desplazamiento. El valor de fuerza máxima, asumiendo que la máquina de ensayos está correctamente calibrada, no conlleva más incertidumbre que la de la fijación del cero al inicio del ensayo. Éste se puede establecer con una elevada precisión acercando el punto de aplicación de carga a la probeta hasta que entran en contacto y se observa una leve variación en la lectura de la fuerza. Es decir, el cero de fuerza se puede determinar con una precisión del orden de la sensibilidad de la célula de carga que se utilice. La determinación de δ_{max} , en cambio, presenta mayor incertidumbre debido a la ambigüedad de la determinación del cero de desplazamiento. En primer lugar, la curva $P-\delta$, presenta una zona inicial no-lineal (Fig. 3). El nivel de desviación de la linealidad y la extensión de esta zona depende de factores geométricos del ensayo (probeta, alineamiento del sistema de introducción de carga respecto al plano de la probeta, etc). Se ha observado que el efecto de no-linealidad es tanto mayor cuanto mayor es la variación del grosor de la probeta en su dirección transversal.

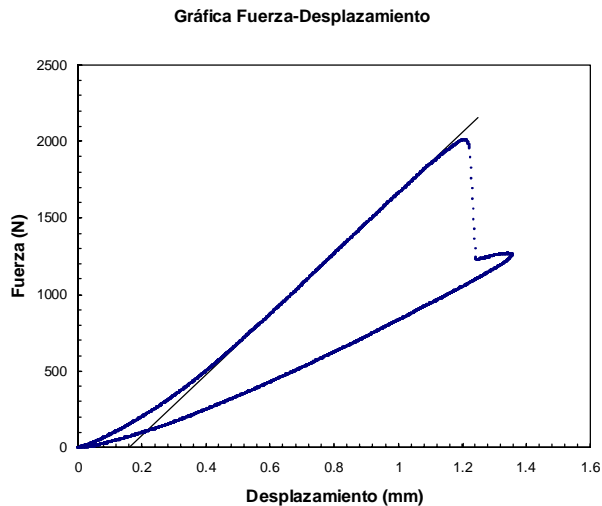


Fig. 3. Gráfico carga-desplazamiento con la recta de regresión lineal de la zona elástica

Al ensayar una probeta levemente inclinada, el utillaje contacta con la probeta por un punto y no por una línea de contacto. A medida que el rodillo de carga descende, se va adquiriendo un contacto uniforme sobre la probeta y por tanto ésta responde con una rigidez mayor hasta alcanzar el valor estacionario (zona lineal de la gráfica).

La corrección de este efecto se ha abordado restando un $\Delta\delta$ al valor δ_{\max} . En efecto, se ha considerado el cero de desplazamiento como el punto de intersección de la recta de regresión con el eje de abscisas. Se puede observar en la tabla 4 los valores de desplazamiento máximo obtenidos en los distintos laboratorios que han participado en la ronda de ensayos para los tres tipos de materiales. La dispersión de valores de δ_{\max} es mucho mayor que la que se observa en la determinación de P_{\max} debido al efecto comentado (el laboratorio de UniOvi no introdujo la corrección $\Delta\delta$).

Tabla 4. Resultados de la media de δ_{\max} en mm para cada material ensayado en los tres laboratorios

Material	UdG	INTA	UniOvi
3M	1.041	1.265	1.530
4N	1.397	1.530	1.982
4C	1.021	1.084	1.568

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los resultados de una ronda de ensayos para la determinación de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo II en tres laboratorios (INTA, Univ. de Oviedo y Univ. de Girona). Se han analizado los métodos de cálculo propuestos por el protocolo ESIS y se han señalado las distintas fuentes de divergencia entre resultados de distintos laboratorios.

Se concluye que el método de la calibración experimental de la flexibilidad aparece como el más consistente frente a la subjetividad del investigador ya

que no requiere para su cálculo del valor del desplazamiento máximo. Por esta razón, además, este método conduce a resultados no dispersos incluso en el caso de que las probetas presenten pequeñas variaciones de grosor en su dirección transversal.

Por otra parte, los valores de fuerza máxima y el correspondiente desplazamiento son los puntos más adecuados para el cálculo de G_{IIc} . El punto de no-linealidad presenta una notable dependencia de las condiciones de observación.

En cualquier caso, se observa que la discrepancia entre los valores deducidos por un mismo laboratorio utilizando distintos métodos de cálculo es notable. Aún más notable es la dispersión entre los resultados obtenidos sobre un mismo material y método por los tres laboratorios participantes en esta ronda de ensayos. A pesar de que el ensayo de ENF (de flexión con entalla final) sólo permite determinar una energía de iniciación de progresión de grieta, ésta es dependiente del método de cálculo y de aspectos subjetivos de la metodología de ensayo, por lo que resulta difícil definir inequívocamente un valor de este parámetro para introducirlo en las herramientas de diseño de componentes estructurales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado por los proyectos del Plan Nacional de Materiales: MAT2003-09768-C03-01 y 03. Se quiere reconocer, también, la labor realizada por el personal analista del Área de Materiales Compuestos del INTA en la fabricación y ensayo de las probetas asignadas a dicha entidad.

REFERENCIAS

- [1] ASTM D5528-01, "Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites", American Society for Testing and Materials, 2001.
- [2] ASTM D6671M-04E1, "Standard Test Method for MIXED MODE I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites", American Society for Testing and Materials, 2004.
- [3] Davies, P., "Protocol for Interlaminar Fracture Testing no. 2 – Mode II (ENF)", Protocols for Interlaminar Fracture testing of Composites, European Structural Integrity Society, 1992.
- [4] Carlsson, L.A., Gillespie, J.W., Pipes, R.B., "On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for mode-II testing", *Journal of Composite Materials* 20 (6), pag. 594-604, 1986.