

DIMENSIONADO Y REDUCCIÓN DE DATOS DE PROBETAS CARBONO/EPOXI PARA ENSAYOS DE TIPO FLEXIÓN CON ENTALLA FINAL EN CARGA ESTÁTICA Y DINÁMICA

Fernando Cabrerizo García

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas (I.N.T.A.)

Dpto. de tecnologías y Procesos de Materiales Compuestos

División de Materiales y Estructuras

Ctra. de Ajalvir Km. 4

28850 Torrejón de Ardoz (MADRID)

Resumen. El presente trabajo es la antesala teórica a un completo programa de ensayos de crecimiento de grieta bajo Modo-II en carga estática y dinámica. El tipo de probeta elegida es la de flexión con entalla final (ENF). Se estudiarán varios parámetros del ensayo como tipos de fibra y matrices, velocidades de aplicación de carga, frecuencia, etc. En la actualidad, no existe un método de ensayo aceptado por la comunidad científica y por lo tanto el dimensionado se realizará de forma teórica.

Abstract. This is a preliminary work to a complete characterization program of Mode-II crack growth under static and cyclic loads in carbon/epoxy composites. The type of specimen tested is the End Notched Flexure (ENF) one. Several parameters will be studied like, fiber elastic modulus, resin toughness, static loading speed, frequency, displacement rate and so on. Actually, there is no standard test method. All the specimen sizing must be developed from theoretical analysis.

1.- INTRODUCCIÓN

Dentro del estudio de crecimiento y propagación de grietas interlaminares en materiales compuestos carbono/epoxi, el crecimiento por carga, ya sea estática ó dinámica, introducida mediante cortadura en modo II presenta unas características propias que requieren de una evaluación preliminar al ensayo. Tres materiales de distintas matrices y fibras cuyo ámbito de aplicación más habitual es el campo aeronáutico se han elegido de manera que permitan comparar fibras de alta resistencia, como la AS4, con fibras de módulo intermedio, como la IM7, y resinas de baja tenacidad, como la 3501-6, con resinas de tenacidad mejorada, como la 8552

2.- PROBETA "ENF"

Hay una serie de razones que hacen de la probeta ENF [2] la más cómoda de utilizar en ensayos de Modo-II:

- Fácil laminación y posicionamiento del frente de grieta.
- Fácil mecanización debido a su forma rectangular.
- Geometría sencilla de cara al uso de análisis por teoría de vigas.

- Ensayo y utillaje sencillo. Flexión en tres puntos.
- No es necesario ningún aditamento o suplemento de agarre en la probeta.
- Obtención de un Modo-II puro con rasgos fractográficos muy diferenciados.
- Los intentos de normalización del ensayo [13] contemplan este tipo de probeta.

3.- DETERMINACIÓN DE GEOMETRÍA

Partiendo de la forma geométrica de la probeta ENF, es necesario determinar las dimensiones que hagan posible el cumplimiento de todas las hipótesis que se van a considerar durante el desarrollo de las teorías necesarias para el análisis de los ensayos. Dichas dimensiones serían, la longitud entre apoyos de la probeta $2L$, la anchura w , el semiespesor de probeta t y la longitud de grieta inicial a_0 .

En cuanto a la distancia L se escoge un valor de 50 mm primordialmente por una razón, la posibilidad de comparación del resultado con el de otros autores, ya que es la longitud entre carga y apoyo más utilizada. El mismo razonamiento es aplicable a la anchura w , se establece en 25 mm [1,2,4,5,6,7,9,10,12,13].

En definitiva el único parámetro que quedaría por determinar razonablemente sería el semiespesor de probeta t . En principio este espesor debe de ser minimizado para disminuir el coste del ensayo.

Los dos requisitos más importantes a imponer a nuestra probeta para poderle aplicar un estudio analítico reproducible en el ensayo serían:

- Probeta con comportamiento elástico-lineal y pequeños desplazamientos.

- No se produzca fallo por flexión dentro del régimen lineal-elástico.

Carlsson y Gillespie [2] proponen dos expresiones para minimizar el espesor a considerar. La viga a considerar, estaría compuesta por dos efectos, la fuerza de cortadura y el momento flector distribuidos a lo largo de la longitud $2L$. En estas condiciones, se tendría:

$$G_{II} = \frac{P^2}{2w} \frac{dC}{da} \quad (1)$$

Donde C es la flexibilidad de la probeta, definida como el cociente entre el desplazamiento del punto medio δ y la carga aplicada en dicho punto P .

De acuerdo con la teoría elástica de vigas de Timoshenko [14] y la formulación propuesta por Carlsson [2], se obtiene un valor de flexibilidad de:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_1 w t^3} \left[1 + \frac{2(1.2L + 0.9a)t^2 E_1}{(2L^3 + 3a^3)G_{13}} \right] \quad (2)$$

Expresión en la que el segundo término de la derecha de la igualdad representa la contribución a la flexibilidad debida a la cortadura en la viga. En el caso de que no se consideren estos efectos de cortadura, la flexibilidad quedaría reducida al primer término. Si denotamos con superíndice FC a las propiedades que incluyan efectos debidos a flexión y cortadura y con F a las propiedades que sólo incluyan efectos de flexión, se puede expresar:

$$\frac{C^{FC}}{C^F} = 1 + \frac{2(1.2L + 0.9a)t^2 E_1}{(2L^3 + 3a^3)G_{13}} \quad (3)$$

$$\frac{G_{IIc}^{FC}}{G_{IIc}^F} = 1 + 0.2 \frac{E_1}{G_{13}} \left(\frac{t}{a} \right)^2 \quad (4)$$

Dando valores a estas expresiones y variando los distintos parámetros dentro de valores típicos, se puede obtener la tabla 1 para una distancia entre apoyo y punto de aplicación de carga L de 50 mm.

En dicha tabla, puede apreciarse que la diferencia máxima que se produce al incorporar efectos de cortadura está en torno al 6% para G_{IIc} en la condición más extrema de parámetros y por lo tanto no parece necesario arrastrar dichos términos durante el dimensionado de la probeta.

a (mm)	t (mm)	E1/G13	C ^{FC} /C ^F	%ΔC	GII ^{FC} /GII ^F	%ΔGII
25,00	1,50	10	1,013	1,2%	1,007	0,7%
		20	1,025	2,4%	1,014	1,4%
		30	1,038	3,6%	1,022	2,1%
		40	1,050	4,8%	1,029	2,8%
		50	1,063	5,9%	1,036	3,5%
25,00	2,00	10	1,022	2,2%	1,013	1,3%
		20	1,044	4,3%	1,026	2,5%
		30	1,067	6,3%	1,038	3,7%
		40	1,089	8,2%	1,051	4,9%
		50	1,111	10,0%	1,064	6,0%
35,00	1,50	10	1,011	1,1%	1,004	0,4%
		20	1,022	2,1%	1,007	0,7%
		30	1,033	3,2%	1,011	1,1%
		40	1,043	4,2%	1,015	1,4%
		50	1,054	5,2%	1,018	1,8%
35,00	2,00	10	1,019	1,9%	1,007	0,6%
		20	1,039	3,7%	1,013	1,3%
		30	1,058	5,5%	1,020	1,9%
		40	1,077	7,2%	1,026	2,5%
		50	1,097	8,8%	1,033	3,2%
45,00	1,50	10	1,009	0,9%	1,002	0,2%
		20	1,017	1,7%	1,004	0,4%
		30	1,026	2,5%	1,007	0,7%
		40	1,035	3,3%	1,009	0,9%
		50	1,043	4,1%	1,011	1,1%
45,00	2,00	10	1,015	1,5%	1,004	0,4%
		20	1,031	3,0%	1,008	0,8%
		30	1,046	4,4%	1,012	1,2%
		40	1,061	5,8%	1,016	1,6%
		50	1,077	7,1%	1,020	1,9%

Tabla 1. Comparación de términos con efectos de cortadura y sin ellos

De esta manera se tomaría la expresión de G_{II} que incluye sólo efectos de flexión:

$$G_{IIc} = \frac{9 P_c^2 a^2}{16 E_1 w^2 t^3} \quad (5)$$

Donde el subíndice c denota valor crítico, es decir, aquel para el que se produce un avance de grieta.

Combinando las ecuaciones (5) y (2), incluyendo efectos de flexión únicamente y concretando para valores críticos, se obtiene:

$$\delta_c = \frac{2L^3 + 3a^3}{6a} \sqrt{\frac{G_{IIc}}{E_1 t^3}} \quad (6)$$

Siendo δ_c el desplazamiento crítico del punto de aplicación de carga.

Con la hipótesis de pequeños desplazamientos, la pendiente máxima de la elástica de la probeta, $y'(x)_{\max}$ en función del desplazamiento del punto de aplicación de carga, δ , [2,3,10,11] se expresa como:

$$y'(x)_{\max} = \frac{3(L^2 + 3a^2)}{2L^3 + 3a^3} \delta \quad (7)$$

Dentro de la hipótesis anteriormente citada, se limita el valor de la pendiente máxima a uno determinado ($y'(x)_{\max} = \tan \theta \approx \theta$) y se impone que el desplazamiento en esas condiciones, sea al menos el crítico, δ_c , obteniéndose que el espesor debe de cumplir:

$$t \geq \sqrt[3]{\frac{G_{IIc}(L^2 + 3a^2)^2}{4 y'(x)_{\max}^2 a^2 E_1}} \quad (8)$$

Con este espesor se estarían cumpliendo la condición de pequeños desplazamientos y régimen elástico-lineal.

Para que se cumpla la segunda condición, que no haya fallo por flexión dentro del tramo elástico-lineal, hay que imponer un determinado δ_c máximo, en este caso, menor que el máximo desplazamiento admisible relativo a la máxima deformación admisible ϵ_{ma} para obtener comportamiento lineal, es decir:

$$\epsilon_m = \frac{6Lt\delta}{2L^3 + 3a^3} \Rightarrow \epsilon_{ma} = \frac{6Lt\delta_a}{2L^3 + 3a^3} \quad (9)$$

Y por lo tanto, imponiendo la condición $\delta_c < \delta_a$ y haciendo uso de la ecuación (6), se obtiene:

$$t \geq \frac{L^2 G_{IIc}}{a^2 \epsilon_{ma}^2 E_1} \quad (10)$$

Representando las ecuaciones (8) y (10) con $y'(x)_{\max} = 0.2$ ($\theta = 0.1974$) y $\epsilon_{ma} = 5\%$ se obtienen la figura 1.

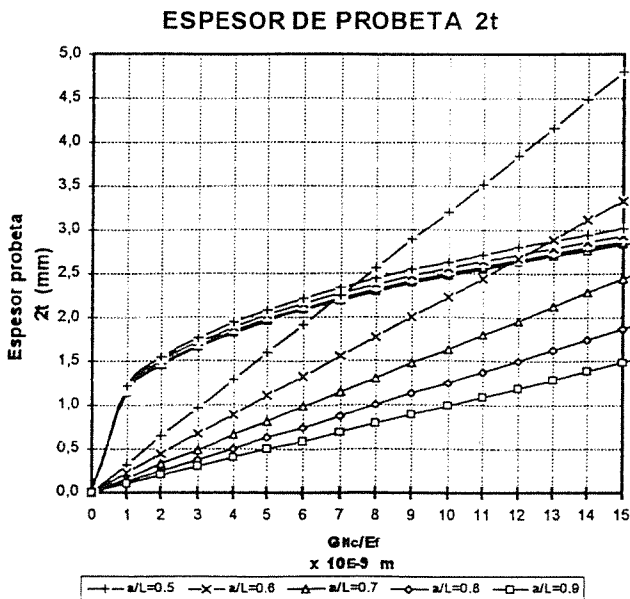


Figura 1. Espesor mínimo de probeta.

Se puede apreciar en esta figura, que el espesor $2t$ mínimo de probeta requerido para cumplir las hipótesis depende del material que se utilice. Si se estiman las propiedades de los materiales que se van a estudiar y se agrupan en una tabla (tabla 2), se tienen [8,15] los siguientes valores:

Material	E (GPa)	G _{IIc} (GPa)	G _{IIc} (J/m ²)	G _{IIc} /E (x 10 ⁹ m)	E/G _{IIc}
AS4/3501-6	130	6,2	734	5,6	21,0
AS4/8552	130	6,0	1769	13,6	21,7
IM7/8552	150	7,0	1344	9,0	21,4

Tabla 2. Propiedades estimadas materiales estudiados.

A la vista de los materiales en estudio, se pueden tomar valores de espesor en el entorno de los 4 mm. de tal manera que habrá materiales que cumplan las hipótesis establecidas en el límite y otros que las cumplan con holgura.

La longitud total de las probetas se toma de 150 mm y la longitud de grieta inicial será 50 mm. La figura 4 muestra las dimensiones elegidas definitivas de la

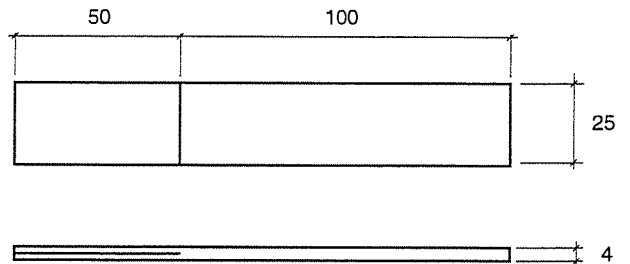


Figura 4. Dimensiones de la probeta ENF elegida. probeta ENF.

4.- REDUCCIÓN DE DATOS ENSAYO ESTÁTICO

Los distintos tipos de métodos para calcular G_{IIc} a partir de ensayos en probetas ENF, se basan en definitiva en medir el valor crítico de carga P_c necesario para hacer crecer una grieta de tamaño a en una probeta de flexibilidad C o en medir directa o indirectamente la energía necesaria para que la grieta progrese [2,3,10]. Estos métodos se reducen básicamente a tres:

4.1.- Análisis mediante teoría de vigas.

Basándose en teoría lineal elástica de vigas en flexión se obtienen ecuaciones como las (2) y (5) [2,3,10,11,12].

$$G_{IIc} = \frac{9 P_c^2 a^2}{16 E_1 w^2 t^3} \quad (11)$$

En dicha ecuación, a partir de la curva carga-deformación se puede obtener el valor de la carga crítica P_c a partir del cual avanza una grieta de tamaño a . Sobre dicha ecuación se pueden añadir términos que expresen la influencia de efectos tales como fuerza cortante (ya analizada), correcciones por elementos finitos o correcciones por la flexibilidad del conjunto útil-máquina de ensayos. Incluyendo los efectos de la fuerza cortante y de la flexibilidad del conjunto útil-máquina de ensayos, quedaría una expresión del tipo:

$$G_{IIc} = \frac{9 P_c^2 a^2}{2w(2L^3 + 3a^3)} (C_m - C_u - C_c) \quad (12)$$

Siendo C_m la flexibilidad medida en el ensayo de la probeta, C_u la flexibilidad del conjunto útil-máquina de ensayo que se determina mediante el ensayo de una probeta a flexión "infinitamente" más rígida que la de carbono y C_c la flexibilidad debida al término de cortadura.

El término C_m se obtiene como la pendiente de la curva $P-\delta$ y la flexibilidad C_c analíticamente, y en general con las hipótesis ya comentadas, se desprecia.

4.2.- Calibración de la flexibilidad.

Como se vio en la ecuación 2, la flexibilidad es una función polinómica cúbica de la longitud de grieta a . Dicha expresión, sin tener en cuenta efectos de cortadura, se reduce a:

$$C_m = m a^3 + n \quad (13)$$

De esta manera quedaría:

$$G_{IIc} = \frac{3 P_c^2 m}{2 w} a^2 \quad (14)$$

En general la obtención de esta curva de calibración de flexibilidad se obtiene a partir de una probeta idéntica a la que se está ensayando. La probeta se va desplazando entre los apoyos y se va cargando en flexión para valores de grieta a conocidos sin que se llegue a valores críticos de propagación de grieta, obteniéndose la curva $C_m(a)$.

4.3.- Método de las áreas.

A partir de la figura 5, se puede observar que el área rayada A corresponde a la energía utilizada para hacer crecer la delaminación una superficie $a_1 w - a_0 w$, (considerando frente de grieta recto, no parabólico) es decir, desde una longitud de grieta a_0 hasta a_1 en una

probeta rectangular de anchura w . El valor de G_{IIc} quedaría en este caso:

$$G_{IIc} = \frac{A}{w(a_1 - a_0)} \quad (15)$$

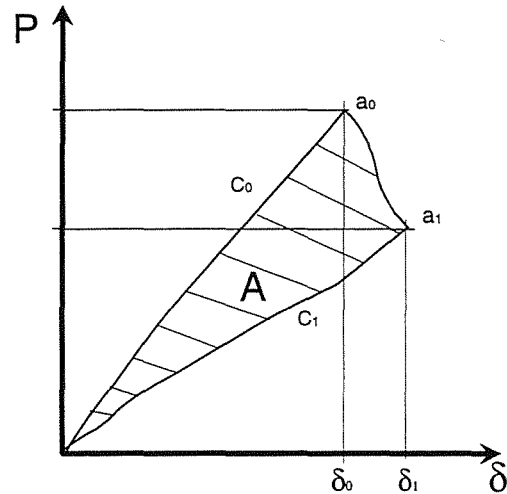


Figura 5. Curva $P-\delta$.

5.- PARÁMETROS DE ENSAYO DINÁMICO

En la mayoría de los casos, el control de la máquina de ensayos durante el ensayo a fatiga, se realiza por control de desplazamientos.

Un primer parámetro a fijar es la frecuencia de carga. Los distintos autores optan por ensayar en el rango de los 3 a 9 Hz. [1,5,6,10]. Valores inferiores a 3 Hz. no producen avances de grieta mas que a relaciones de esfuerzo mayores al 90% del valor de crecimiento por carga estática ($\Delta G/G_{IIc} \approx 0.9$) o con configuraciones de laminación distintas de unidireccionales lo cual hace aparecer inestabilidades.

Valores superiores a 9 Hz pueden producir calentamiento en la probeta suficiente como para sospechar que la energía disipada para hacer crecer la grieta está influenciada por estos efectos térmicos.

Un valor comúnmente utilizado en las distintas bibliografías [1,5,6,10] está en torno a los 5 Hz y será este el que se tome en principio.

En cuanto a la relación entre desplazamientos mínimo y máximo, se elegirá esta de tal manera que no exista fatiga por carga reversa ($R \geq 0$) y la probeta no quede en ningún momento descargada ($R > 0$) para evitar que se pueda desplazar de su posición inicial. Se tomarán valores de ensayo de $R=0.1$ y $R=0.3$.

El parámetro más difícil de precisar para el ensayo es la diferencia entre el máximo desplazamiento y el mínimo, $\Delta\delta$. La razón es que se precisa de cierta experiencia para asegurarse el crecimiento de grieta de

manera estable durante la carga. Fijando δ_{\min} , es necesario determinar cual será el δ_{\max} . Este valor tiene que ser menor que δ_c ya que si no lo fuera, la grieta progresaría de manera estática en el primer ciclo de carga.

Partiendo de la ecuación:

$$G_{II} = \frac{9 a^2 P^2 C}{2 w (2L^3 + 3 a^3)} \quad (16)$$

Y aplicando incrementos, se obtiene:

$$\Delta G_{II} = \frac{9 a^2 (\Delta \delta)^2}{2 w (2L^3 + 3 a^3) C} \quad (17)$$

Si se considera comportamiento elástico-lineal en la curva P- δ :

$$R = \frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (18)$$

Y considerando:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{\Delta \delta}{\Delta P} \quad (19)$$

Se puede normalizar la tasa de liberación de energía de deformación cíclica ΔG_{II} con un valor de G_{IIc} obtenido para una apertura de grieta $(a/L)_c$ y en función de la apertura de grieta:

$$\frac{\Delta G_{II}}{G_{IIc}} = \frac{\left[2 + 3 \left(\frac{a}{L}\right)_c\right]^2}{\left(\frac{a}{L}\right)_c^2} (1-R)^2 \left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_c}\right)^2 \frac{\left(\frac{a}{L}\right)^2}{\left[2 + 3 \left(\frac{a}{L}\right)\right]^2} \quad (20)$$

Donde los valores críticos han sido obtenidos para el caso estático para una apertura de grieta $(a/L)_c$. Representando esta ecuación (20) para determinados valores críticos en la figura 6, se puede observar [1] que para un valor elegido de δ_{\max}/δ_c , hay un valor máximo en torno a $(a/L)=0.7$ antes del cual la energía necesaria para abrir la grieta va aumentando y pasado este punto la energía disminuye.

En el ensayo se tiene que asegurar que la grieta crecerá independientemente de la apertura que tenga la grieta. Los distintos autores establecen que los valores críticos de referencia deben tomarse en el rango $(a/L)_c=0.5-0.7$. Dentro de este rango se produce crecimiento de grieta sin ningún tipo de valor umbral para relaciones δ_{\max}/δ_c a 0.4.

TASA DE LIBERACIÓN DE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN CÍCLICA NORMALIZADA

$R=0.1$; $(a/L)_c = 0.5$

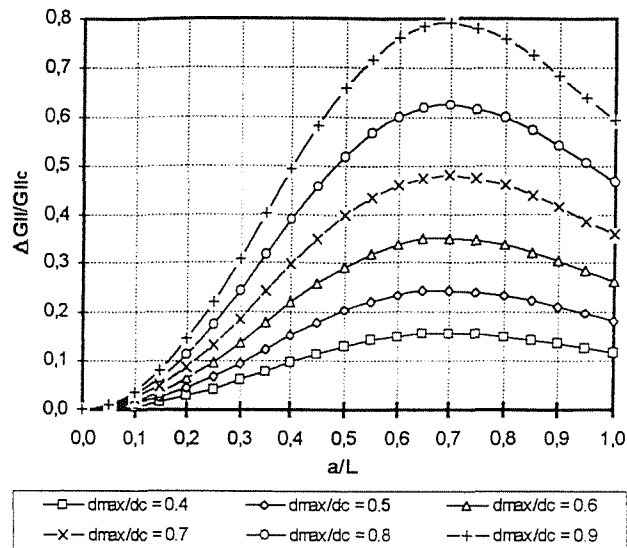


Figura 6. Tasa de energía de deformación cíclica

6.- REDUCCIÓN DE DATOS ENSAYO DINÁMICO

Son dos, básicamente y de manera general, las propiedades que se intentan obtener en los ensayos en fatiga de crecimiento de grietas bajo modo-II. En primer lugar, la existencia de valores umbrales que marquen los límites de crecimiento ó bloqueo de la grieta. En segundo lugar, la ley de crecimiento de grieta, es decir, cómo varía la derivada de la apertura de grieta respecto al número de ciclos con los incrementos de energía necesarios para producir esa apertura, es decir:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta G) \quad (21)$$

Esta ley para metales se conoce clásicamente como la ley de Paris cuando la relación es de tipo exponencial.

El procedimiento para calcular esta relación combina una parte analítica y otra experimental. Los pasos son los siguientes:

- 1.- Para parámetros f , R y $\Delta \delta$ dados, se comienza a cargar la probeta en ΔN .
- 2.- Al terminar el bloque de ciclos, se realiza una carga estática sin que haya crecimiento de grieta, obteniéndose la flexibilidad C_n para ese bloque de carga.
- 3.- A partir de la curva obtenida por carga estática $C-a$, se obtiene una apertura de grieta.

4.- Con estos valores se va repitiendo la carga para varios ciclos, obteniéndose la curva N-a y por lo tanto da/dN .

5.- A través de la curva C-a y la ecuación (17), se obtiene ΔG_{IIc} .

6.- Con da/dN y ΔG_{IIc} se obtiene la curva buscada.

La forma mas general de esta curva suele ser de tipo exponencial de parámetros α y β .

$$\frac{da}{dN} = \alpha (\Delta G_{II})^\beta \quad (22)$$

Lógicamente los parámetros α y β dependen tanto del material como de los parámetros de carga.

En definitiva, como puede apreciarse, evaluar las propiedades derivadas de un ensayo en Modo-II es una tarea que precisa de una planificación detallada de los distintos pasos a realizar. No es difícil imaginar lo que supondría añadir a todas las consideraciones anteriores una probeta cuya fabricación supusiese mecanizados más complejos ó incluso uniones adicionales de elementos de agarre.

7.- REFERENCIAS

- [1] Zhao S., Gaedke M. and Prinz R.: "Mode II delamination behavior of carbon/epoxy composites", *Adv. Composites Materials*, Vol. 4, No. 2, 1994, pp 111-127.
- [2] Carlsson L.A., Gillespie J.W. and Pipes R.B.: "On the analysis and design of the End Notched Flexure (ENF) specimen for Mode II testing", *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, 1986, pp 594-604.
- [3] Carlsson L.A., Gillespie J. W. Jr: "Mode II Interlaminar Fracture of Composites", *Application of Fracture Mechanics to Composite Materials*, K. Friedrich, Elsevier Science Publishers. pp 113-157.
- [4] Prel, Y.j., Davies, P., Benzeggagh, M.L., and de Charentenay, F.-X.: "Mode I and Mode II Delamination of Thermosetting and Thermoplastic Composites", *Composite Materials: Fatigue and Fracture, Second Volumen, ASTM STP 1012*, Paul A. Lagace, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp 251-269.
- [5] Trethewey, B.R. Jr., Gillespie, J.W. Jr., and Carlsson, L.A.: "Mode II Cyclic Delamination Growth", *Journal of Composite Materials*, 22, 1988, pp 459-483.
- [6] Mall, S., Yun, S.-T. and Kochlar, N. K.: "Characterization of Matrix Toughness Effect on Cyclic Delamination Growth in Graphite Fiber Composites", *Composite Materials: Fatigue and Fracture, Second Volume, ASTM STP 1012*, Paul A. Lagace, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 296-310.
- [7] Kageyama, K., Kikuchi, M., and Yanagisawa, N., "Stabilized End Notched Flexure Test: Characterization of Mode II Interlaminar Crack Growth", *Composite Materials: Fatigue and Fracture (Third Volume), ASTM STP 1110*, T. K. O'Brien, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991, pp. 210-225.
- [8] Carlsson, L.A., Gillespie, J.W. and Trethewey, B.R.: "Mode II Interlaminar Fracture of Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol 5 July, 1986, pp. 170-187.
- [9] Martin, R.H. and Murri, G.B., "Characterization of Mode I and Mode II Delamination Growth and Thresholds in AS4/PEEK Composites", *Composite Materials: Testing and Design (Ninth Volume), ASTM STP 1059*, S. P. Garbo, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 251-270.
- [10] Russell, A.J. and Street, K.N., "The Effect of Matrix Toughness on Delamination: Static and Fatigue Fracture Under Mode II Shear Loading of Graphite Fiber Composites", *Toughened Composites, ASTM STP 937*, Norman J. Johnston, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987, pp. 275-294.
- [11] Russell, A.J. and Street, K.N.: "Factors affecting the Interlaminar Fracture Energy of Graphite/Epoxy laminates". *Progress in Science and Engineering of Composites. ICCM-IV*. Tokyo 1982, pp. 279-287.
- [12] O'Brien, T.K., Murri, G.B., and Salpekar, S.A., "Interlaminar Shear Fracture Toughness and Fatigue Thresholds for Composite Materials", *Composite Materials: Fatigue and Fracture, Second Volume, ASTM STP 1012*, Paul A. Lagace, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 222-250.
- [13] AITM 1.0006. Airbus Industrie Test Method: "Determination of interlaminar fracture toughness energy. Mode II G_{IIc} Test", Issue 2, June 1984.
- [14] Timoshenko S.: "Resistencia de Materiales, Tomo I", *Capítulo VII*, Ed, Espasa-Calpe Madrid, 1944.
- [15] Hercules Data Sheet. "Prepreg Data".