

CRECIMIENTO BAJO FATIGA EN MODO-II DE GRIETAS INTERLAMINARES EN MATERIALES COMPUESTOS CARBONO/EPOXI.

Fernando Cabrerizo García, J. M. Pintado Sanjuanbenito.

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

Área de Materiales Compuestos

División de Materiales y Estructuras

Tfn. 34 1 520 15 06; e-mail: cabrerizogf@inta.es

Ctra. de Ajalvir Km. 4. 28850 Torrejón de Ardoz. MADRID

Resumen. En este trabajo se va a evaluar el comportamiento de compuestos carbono/epoxi a crecimiento de grietas en Modo-II bajo cargas cíclicas de manera experimental. Dicha valoración experimental se ha realizado sobre probetas dimensionadas para el ensayo de flexión con entalla final (ENF). En concreto en este estudio se van a evaluar las leyes de crecimiento de grieta para dos materiales y en dos condiciones de carga distintas, carga cíclica reversa ($R=-1$) y carga cíclica para $R=0.1$. Al tratarse de dos materiales con matrices de distinta tenacidad, se podrá comparar además la influencia de esta propiedad en el crecimiento de grietas.

Abstract. In this work it will be evaluated by testing the behaviour of carbon/epoxy composites to Mode-II cyclic crack growth. The End Notched Flexure specimen (ENF) is the most adequate specimen for this kind of test. There will be two materials under two different load conditions, $R=-1$ and $R=0.1$ for evaluate the crack growth rate. With these two materials of different matrix it is possible compare the influence of toughness.

1.- INTRODUCCIÓN.

Dentro del amplio espectro de propiedades mecánicas que presenta un material estructural y que son necesarias para poder diseñar y calcular las estructuras que estos forman, se encuentran las propiedades relacionadas con la mecánica de la fractura. Estas propiedades forman parte del estudio posterior al diseño de la estructura. Una vez diseñada y calculada, el ingeniero debe de saber predecir bajo qué cargas y ante qué determinados defectos, la estructura puede continuar su vida operativa y por cuanto tiempo más.

En este trabajo en concreto se pretende obtener para dos materiales de la industria aeroespacial las leyes que rigen el crecimiento de una grieta cuando esta forma parte de una estructura sometida a fatiga y la carga es introducida en el frente de grieta por cortadura (Modo-II).

2.- MATERIALES.

Los materiales objeto de estudio provienen de la marca comercial HEXCEL® [1] y se trata de una fibra de carbono de alta resistencia (AS4) combinada con dos matrices. Una de las matrices presenta una tenacidad a fractura intermedia, la 3501-6 y la otra presenta tenacidad

mejorada a fractura, la 8552. Ambas matrices son epoxi.

En este trabajo se muestran de manera parcial los resultados que se han obtenido, no estando completa toda la matriz de ensayos propuesta en el programa del que se deriva el trabajo (apartado 5).

3.- GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS.

Las razones básicas de uso de la probeta ENF son: su fácil laminación y posicionado del frente de grieta, mecanización sencilla, aplicación de teoría de vigas, utillaje de flexión en y tres puntos, obtención de un modo-II fractográficamente limpio, etc.

La longitud total de las probetas se toma de 160 mm y la longitud de grieta inicial será 55 mm. La anchura de las mismas se tomará de $w=25$ mm. [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15]. La figura 1 muestra las dimensiones elegidas definitivas de la probeta ENF y la figura 2 la posición de la probeta en el utillaje ($L=50$ mm).

A la vista de las características de comportamiento mecánico de los materiales en estudio se decidió tomar un valor de espesor en el entorno de los 5 mm., de tal manera que los materiales utilizados cumplan las

condiciones de teoría lineal elástica de vigas [15].

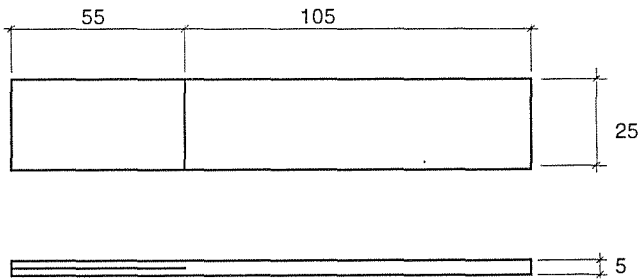


Figura 1.- Probeta de flexión con entalla final (ENF).

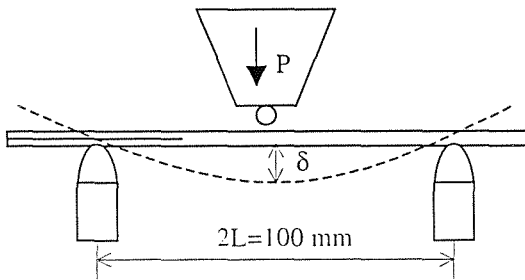


Figura 2.- Posición de la probeta en el ensayo.

4.- PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas fueron obtenidas de paneles curados en autoclave a los valores de presión y bolsa de vacío recomendados por el fabricante. La temperatura de curado es de 180°C [1].

La laminación se produjo en el área limpia con que cuenta el Area de Materiales Compuestos del Instituto. Durante el proceso de laminación, se introdujo un tejido teflonado (PTFE) de 20 μm en la zona de 55 mm x 25 mm y entre las láminas centrales de tal manera que se crease una delaminación artificial.

Las secuencias de laminación sobre las que se realizarán los ensayos quedan por lo tanto: [0°₁₅, PTFE (20 μm), 0°₁₅]

Todos los datos de ciclos de curado fueron correctamente almacenados y siguieron un estricto control de calidad al igual que las operaciones de corte de telas y laminación.

Posteriormente las paneles fueron mecanizados a probetas de las dimensiones ya comentadas.

5.- MATRIZ DE ENSAYOS.

La matriz de ensayos del programa completo de caracterización de crecimiento de grietas en modo-II bajo carga cíclica no ha sido abarcada por el presente trabajo, y por lo tanto, se expone a continuación la matriz real de trabajo de este estudio (tabla 1).

Materiales: AS4/3501-6
Ensayo: Modo-II

Acond.	N	f (Hz)	δ _{max} /δ _c	δ _c (mm)	δ _{max} (mm)	R
R.T.	2	5	0.70	0.9	0.63	0.1
R.T.	3	5	0.35	0.9	0.32	-1.0

Materiales: AS4/8552
Ensayo: Modo-II

Acond.	N	f (Hz)	δ _{max} /δ _c	δ _c (mm)	δ _{max} (mm)	R
R.T.	2	5	0.70	0.9	0.63	0.1
R.T.	1	5	0.35	0.9	0.32	-1.0

Tabla 1.- Matriz de ensayos del presente trabajo.

Como se puede comprobar en la matriz de ensayos, el número de probetas ensayados por punto de ensayo, es en algunos casos no significativo y por lo tanto la comentada matriz debe de ser completada hasta al menos 3 probetas por punto de ensayo.

6.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

El objetivo que se persigue es la obtención de leyes de crecimiento de grieta entre los parámetros que cuantifican la evolución de la misma. De esta manera la relación final que se trata de hallar sería del tipo:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta G_{II}) \quad (1)$$

En esta ecuación se encuentra en primer lugar el problema de obtener una expresión de ΔG_{II} adecuada. Esta expresión se determina a partir de [2]:

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

Dicha expresión se ha obtenido de:

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

Sabiendo que:

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (4)$$

En la expresión comentada, todos los valores son conocidos y por lo tanto la única dependencia de esta función es de la longitud de grieta a . Este valor de G_{II} se obtiene aplicando a la definición de G_{II} la teoría elástica lineal de vigas [14].

Los valores δ y P son los valores del desplazamiento del punto de aplicación de carga y de la carga

respectivamente del ensayo a flexión en tres puntos. Por lo tanto C es la flexibilidad de la probeta. Dicha flexibilidad irá variando al aumentar la longitud de grieta.

Para conocer la ley de crecimiento de grieta con el número de ciclos de fatiga $a(N)$, se recurre a un método experimental que se comentará en el siguiente apartado.

7.- REALIZACIÓN EXPERIMENTAL.

7.1.- Equipos de ensayo y utillaje.

Los ensayos estáticos de obtención de valores críticos y curvas de flexibilidad se realizaron en una Máquina Universal de Ensayos INSTRON y los dinámicos en una Máquina MTS.

En cuanto al utillaje de ensayo por flexión en tres puntos, este fue diseñado por completo para minimizar efectos secundarios en el ensayo como la fricción entre las caras de las dos semiprobetas en la zona de grieta o el rozamiento en el apoyo de la probeta. Para ello, todos los rodillos de apoyo tanto inferiores como superiores (para el caso de carga reversa), fueron colocados con rodamientos en el útil de tal manera que se permitiera un apoyo con giro libre de la probeta. En la figura 3 se muestra un esquema del utillaje.

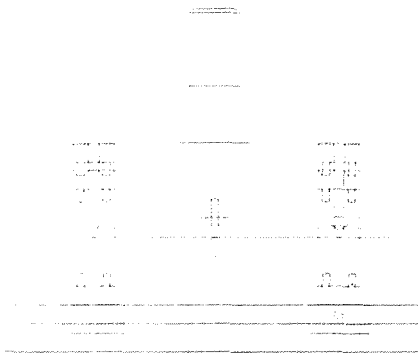


Figura 3.- Esquema del utillaje en flexión.

7.2.- Curvas de calibración y valores estáticos.

Previamente a la realización de los ensayos dinámicos, es necesario conocer una serie de características estáticas de la probeta en modo-II.

El primer parámetro a determinar es el valor de δ_c . Dicho valor es necesario para poder determinar el desplazamiento máximo del punto de aplicación de carga de tal manera que no se produzca crecimiento por carga estática. Este valor de δ_{max} es un porcentaje del crítico. Se han tomado valores de 0.63 mm y 0.32 mm para $R=0.1$ y $R=-1$ respectivamente, lo que equivaldría a valores del 70% y el 35% del valor δ_c .

Otra propiedad importante a obtener por carga estática por debajo de la crítica, es la curva de flexibilidad de la

probeta. Dicha curva es del tipo:

$$C = ma^3 + n \tag{5}$$

Donde se puede apreciar que C es una función lineal de a^3 . Esta curva se obtiene de manera experimental para cada probeta. En la figura 4 se representa una curva de calibración para una de las probetas ensayadas.

Previamente a la calibración de flexibilidad de la probeta, es necesario hacer progresar el frente de grieta con carga en modo-I hasta que se libere el frente de la misma de la zona rica en resina formada durante la laminación y que crea un frente artificial no real.

Esta curva se obtiene midiendo para cuatro longitudes de grieta conocidas (mediante desplazamiento de la probeta respecto al punto de aplicación de carga) la pendiente de la curva $P-\delta$ ($1/C$ en N/mm). Dichas longitudes conocidas no lo son con exactitud hasta que se abre la probeta completamente tras el ensayo dinámico y puede comprobarse donde estaba el frente real que se obtuvo en la preapertura en modo-I.

La regresión lineal que relaciona C con a^3 , tiene unos coeficientes de correlación en torno a 0.99.

CURVA DE FLEXIBILIDAD C vs a

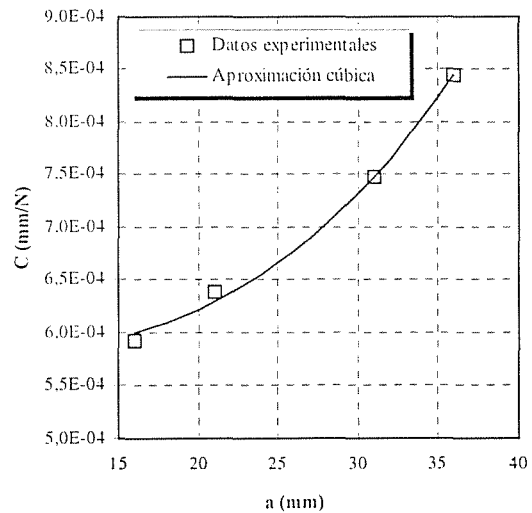


Figura 4.- Curva de flexibilidad.

7.3.- Ensayos dinámicos.

Los ensayos dinámicos se realizaron mediante introducción de ciclos de carga senoidal según los parámetros ya comentados de R , $\Delta\delta$, δ_{max} , etc. Cada 5000 ciclos se paró el ensayo dinámico y se introdujo una carga estática para medir la flexibilidad de la probeta y así a través de la curva de calibración de flexibilidad, poder obtener el valor de tamaño de grieta.

7.3.1.- Curvas a-N.

A la vista de los anteriores resultados, se obtuvieron las curvas a-N. Dichas curvas obedecen a curvas tipo sigmoide como la representada en la figura 5. Las sigmoides son curvas que aparecen generalmente en todo fenómeno de acumulación de daño. Las sigmoides que aparecen han sido aproximadas por polinomios del menor grado posible pero que reproduzcan con exactitud la tendencia de la curva de crecimiento. En la misma figura 5 se representa también el tipo de aproximación que se ha realizado sobre las curvas.

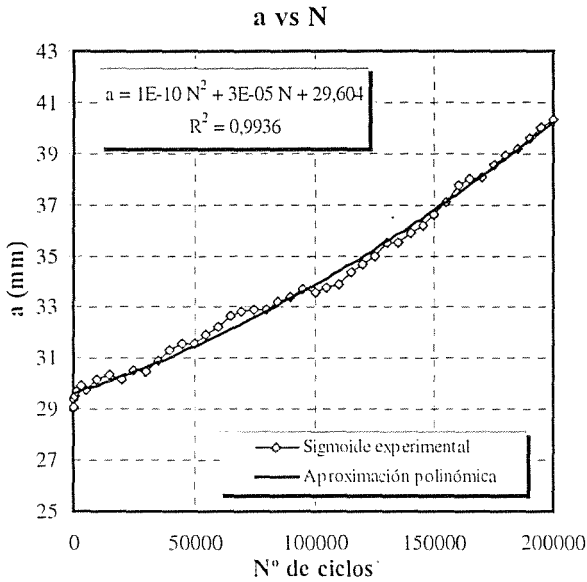


Figura 5.- Curvas a-N y aproximaciones.

7.3.2.- Leyes de crecimiento.

El objetivo final del estudio es conseguir la ley que sigue la relación entre:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta G_{II}) = \alpha(\Delta G_{II})^\beta \quad (6)$$

Esta ley se ha tratado de aproximar por la ley de Paris que cumplen los metales. Las gráficas para todas las condiciones de carga y materiales se muestran a continuación en las figuras 6, 7 8, y 9. En las gráficas se han incluido los valores de los parámetros α y β de la ley de Paris, así como los valores del coeficiente de regresión de la recta en escala logarítmica. Los pasos son los siguientes:

a.- Para parámetros f , R y $\Delta\delta$ dados, se comienza a cargar la probeta en ΔN .

b.- 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.

c.- A partir de la curva obtenida por carga estática $C-a$, se obtiene una apertura de grieta.

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

e.- Con la curva $C-a$ y la ecuación (2), se obtiene ΔG_{II} .

f.- Con da/dN y ΔG_{II} se obtiene la curva buscada.

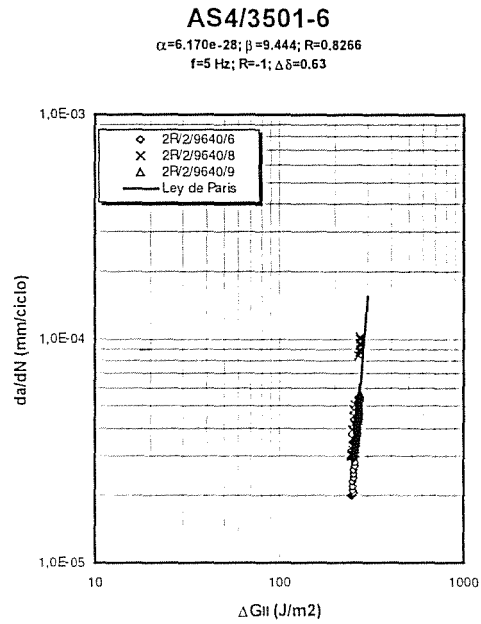


Figura 6.- da/dN vs ΔG_{II} . $R=-1$. $\Delta\delta=0.63$. Material AS4/3501-6.

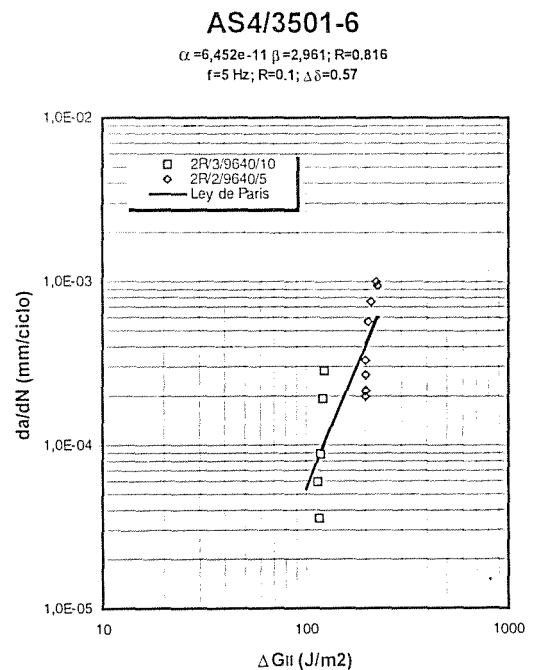


Figura 7.- da/dN vs ΔG_{II} . $R=0.1$. $\Delta\delta=0.57$. Material AS4/3501-6.

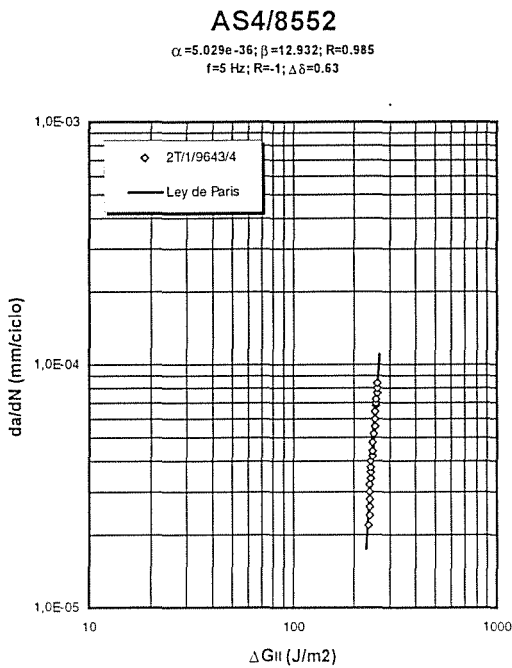


Figura 8.- da/dN vs ΔG_{II} . $R=-1$. $\Delta\delta=0.63$. Material AS4/8552.

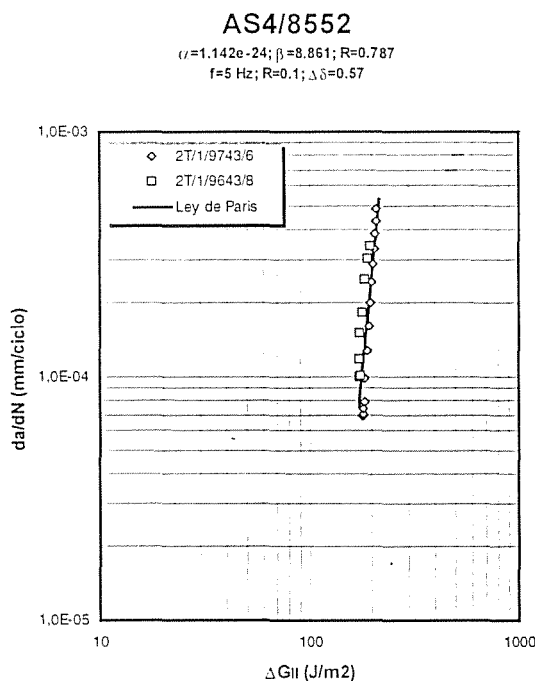


Figura 9.- da/dN vs ΔG_{II} . $R=0.1$. $\Delta\delta=0.57$. Material AS4/8552.

8.- CONCLUSIONES.

Teniendo en cuenta que es necesario completar la matriz de ensayos del programa para obtener unos valores fiables de los ensayos, se pueden extraer ciertas conclusiones de los ensayos realizados.

En primer lugar se puede concluir la bondad del método de Flexión con Entalla Final como método apropiado para conseguir un modo-II sin componentes de otros modos (I y III). Este estudio, de hecho, ha pretendido validar el método de ensayo y su puesta a punto.

Aunque no ha sido expuesto en este estudio concreto, es importante la elección de los espesores de probeta de tal manera que se cumpla teoría lineal de vigas. Esta elección del espesor se encuentra desarrollada en la referencia [15].

En cuanto al utillaje, aunque no es crítico, se considera positivo el apoyar la probeta sobre rodillos insertados en rodamientos de tal manera que se tenga el grado de libertad del giro. De esta manera se eliminan rozamientos.

Entrando más en el objeto de este estudio, se comprueba de nuevo la linealidad de la curva de flexibilidad C con el cubo de la longitud de grieta a y por lo tanto de la validez de este método a partir de una carga estática por debajo de valores críticos, para conocer el tamaño de la grieta.

Las curvas $a-N$ confirman una acumulación de daño que se expresa mediante una sigmoide. La aproximación de dicha sigmoide a un polinomio es básica para obtener la ley de crecimiento de grieta. En general estos polinomios no es necesario que sean de grado mayor a 3.

Como se confirma en la referencia [15], el valor de ΔG_{II} aumenta hasta relaciones a/L de 0.7 manteniéndose estable o disminuyendo a partir de este valor. Las leyes de crecimiento se establecen hasta estos valores de a/L .

A la vista de las relaciones entre da/dN y ΔG_{II} , se puede intuir una relación tipo Paris. Hay que hacer constar que el número de probetas utilizado en esta fase del estudio, es escaso para la obtención de valores fiables.

Un hecho detectado, en principio, es la independencia del tipo de matriz utilizado para el ensayo con $R=-1$. En ambos materiales, el comportamiento de las probetas es el mismo, produciéndose para valores de ΔG_{II} en torno a $200-300 \text{ J/m}^2$ valores de $5 \cdot 10^{-5} \text{ mm/ciclo}$.

Se ha detectado además para el AS4/3501-6 y $R=0.1$ un desplazamiento de los valores para las dos probetas ensayadas. Esto necesita la confirmación de más probetas por punto de ensayo.

Se puede además concluir a la vista de la referencia [16], trabajo paralelo a este con las mismas probetas, que los rasgos fractográficos aparecidos en las superficies de rotura corresponden a características de modo-II. En las

fractografías de dicha referencia, se observan además las estriaciones correspondientes a crecimiento cíclico de grieta.

La conclusión final es que parece posible, y siempre a la espera de concluir el programa, que este tipo de fenómeno de crecimiento de grieta esté dominado por una expresión tipo Paris.

9.- AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo se está realizando bajo la subvención de un Programa de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (MAT-95-0613-C02-02).

Los autores quieren agradecer la ayuda prestada a todo el personal del Area de Materiales Compuestos del INTA así como a Beatriz Romero de Pedro y a Federico Longo Gregorio del Area de Materiales metálicos del INTA y a todo su personal.

10.- REFERENCIAS.

- [1] HEXCEL Data Sheet. "Prepreg Data".
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, 1089, pp 251-269.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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] Cabrerizo García F.: "Dimensionado y Reducción de Datos de Probetas Carbono/Epoxi Para Ensayos de Tipo Flexión con Entalla Final en Carga Estática y Dinámica", *XIV Encuentro del Grupo Español de Fracturas*, 1997, pp 325-330.
- [16] Pintado Sanjuanbenito J.M., Cabrerizo García F.: "Análisis "Post-Mortem" de roturas interlaminares provocadas bajo fatiga en materiales compuestos Carbono/Epoxi". *XV Encuentro del Grupo Español de Fracturas*, 1997.