DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN COMPUESTO FIBRORREFORZADO DE MATRIZ POLIMÉRICA Y FIBRA DE CARBONO COMO MODELO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE CASCOS PARA CICLISMO

J. C. Caicedo[1], L. Ipaz[1], O. Vanegas[1], W. Aperador[1,2], A. Cundar[1], S. Delvasto[2]*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (3): 1127-1132

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN COMPUESTO FIBRORREFORZADO DE MATRIZ POLIMÉRICA Y FIBRA DE CARBONO COMO MODELO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE CASCOS PARA CICLISMO

J. C. Caicedo[1], L. Ipaz[1], O. Vanegas[1], W. Aperador[1,2], A. Cundar[1], S. Delvasto[2]*

1: Grupo Películas Delgadas, Departamento de Física Universidad del Valle, Cali, Colombia
2: Grupo de Materiales Compuestos, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia

** E-mail: jcesarca@calima.univalle.edu.co*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008
Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

Se diseñó y caracterizó experimentalmente un material compuesto de matriz epóxica reforzado con fibra de carbono En este trabajo se estudió el efecto de la orientación de la fibra dentro de la matriz como contribución en la mejora de las propiedades mecánicas del material fibro-reforzado. La caracterización estructural, mecánica y morfológica se realizó mediante Difracción de rayos-X, Ensayos de Flexión e Impacto y Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) respectivamente. Los resultados obtenidos por XRD muestran un relativo alto grado de semi-cristalinidad con una orientación (002) para $2\Theta = 24.0$. Se encontró que en los ensayos de flexión para la matriz con fibras cortas distribuidas al azar presenta un esfuerzo máximo de 2900 KN/m^2 comparado con la matriz con fibras continuas que presenta un esfuerzo máximo de 5900 KN/m^2, un comportamiento similar fue evidenciado en los ensayos de impacto. Imágenes de SEM muestran una buena distribución de la fibra dentro de la matriz. Los anteriores resultados muestran el efecto de la orientación de la fibra dentro de la matriz, abriendo la posibilidad de aplicar este tipo de diseños en el uso de otros dispositivos empleados en deportes de alto desempeño.

Palabras Claves: *Composites de matriz polimérica, fibras de carbono, ensayos de flexión e impacto, cascos para ciclismo.*

Abstract

It was designed and characterized experimentally a composites material of epoxy matrix reinforced with carbon fiber. In this study was to assess the effect of matrix fiber orientation as a contribution in improving the mechanical properties of composites materials. The structural, mechanical and morphological characterization was performed using X-ray diffraction, bending and impact test and scanning slectron microscopy (SEM) respectively. The results obtained by XRD show a relatively high degree of semi-crystallinity due to the contribution of the amorphous epoxy resin phase and crystalline carbon fiber phase with an orientation (002) for $2\Theta = 24.0^o$. We found that bending test for matrix with short fibers randomly distributed presents a maximum stress 2900 KN/m^2 compared with matrix continuous fibres, which presents a maximum stress 5900 KN/m^2, a similar behavior was showed in impact tests. SEM images show a good fiber distribution within the matrix. The previous results show a systematic increase of the mechanical properties in fiber reforced material indicating that the analysis of the fiber orientation effect within the matrix displays an improved composite material, opening the possibility of applying such designs in the use of other devices used in high performance sports.

Keywords*: polymer matrix composites, carbon fiber, bending and impact tests, helmets for biking.*

1. INTRODUCCIÓN

Los cascos para ciclismo se definen como una estructura considerablemente compleja con características de desempeño que incluyen: ligereza, rigidez, durabilidad, y absorción de impactos. Los cascos de otros materiales como de aluminio y titanio se han hecho populares porque superan a los de acero en al menos dos áreas: ligereza y resistencia a la corrosión, no obstante los fabricados en materiales compuestos superan a cualquier metal en todas las áreas de desempeño [1], por ende en el diseño de estos implementos basados en materiales compuestos se presentan algunas de las variaciones,

las cuales incluyen: diferente ángulo de la fibra, diferentes capas, espesores diferentes de la capa, y diferentes combinaciones de material. Por lo tanto, las propiedades del producto final pueden ser adaptadas a una especificación precisa [1]. Debido a lo anterior, en la fabricación de cascos para ciclismo se emplea resinas epóxicas reforzadas con fibras de carbono, siendo usada la fibra de tipo unidireccional en la mayoría de los casos y se orienta en varias direcciones (0, 22.5, 45 y 90 grados), con el objeto de que el casco pueda soportar en diversas direcciones las diferentes cargas a que va a estar sometido [2]. El objetivo de este trabajo, es estudiar las propiedades estructurales y mecánicas de un material fibrorreforzado de matriz polimérica analizando la influencia del contenido y distribución de la fibra en la matriz, lo cual exhibe una mejora del material compuesto y simular la respuesta de este material cuando se aplica en dispositivos deportivos como los casco de ciclismo.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El material compuesto fribroreforzado de matriz epóxica con fibras de carbono fue diseñado en probetas para efectos de estudio, como matriz se utilizó una resina epóxica de referencia R – 329 y un endurecedor de referencia E - 649, lo cual se ajusta a las características y propiedades óptimas para la elaboración de un casco para ciclismo como se muestra en la tabla 1, para el refuerzo se utilizó una fibra de carbono, que fue extraida de una comercial con referencia SikaWrap 300C, ya que esta es empleada como tejido de fibra de carbono para reforzamiento estructural ver tabla 2 [2].

Tabla 1. Características y propiedades de la resina y el endurecedor utilizados para la elaboración de las probetas.

Característica de Material	*Resina*	*Endurecedor*
Viscosidad a 19 °C, P	*20 – 30*	*9 – 16*
Peso específico, g/cm^3	*1.15*	*1.0 gr. cc.*
Color	*9*	*7*
Proporciones, partes en peso	*100*	*16*
Curado mínimo	*24 horas a 25 °C*	
Tiempo de gelificado	*50 – 60 minutos a 19 °C, 20 gr.*	
Postcurado	*8 horas a 100 °C*	

Tabla 2. Datos técnicos de la fibra de carbono SikaWrap 300C.

Propiedades de la fibra	
Resistencia a la tensión	*3.900 N/mm^2 (39.750 kg/cm^2)*
Módulo de elasticidad	*230.000 N/mm^2 (2.344,000 kg/cm^2)*
Elongación	*1.5 %*
Dirección de la fibra	*0° (unidireccional)*
Peso por m^2	*300 g*
Espesor	*0,17 mm*
Densidad de la fibra	*1.8 g/cc*

Las probetas para el análisis de tracción fueron elaboradas tomando como base la norma ASTM D 638 [3], las probetas de impacto fueron fabricadas tomando como base la norma ASTM D 256 [1], para elaborar las probetas se fabricaron dos moldes de seis cavidades cada uno, siendo elaboradas las cavidades en resina epóxica. La disposición del refuerzo en las probetas se diseñó teniendo en cuenta que los esfuerzos en el casco para ciclismo no son unidireccionales, por lo que se hace necesario disponer las fibras de tal modo que las propiedades mecánicas del compuesto sean los más similar posible a las de un material isotrópico. Se colocaron las fibras en varios ángulos respecto a la dirección longitudinal del elemento [4], [5]. Con el fin de evaluar su comportamiento se planeó fabricar las probetas de tracción y de impacto según las siguientes orientaciones: [0/90]s, [0/45/90]s, [0/22.5/45/90]s. Para la colocación de las capas se hizo necesario realizar una pre-impregnación de las fibras, pues de lo contrario estas al ser cortadas del tejido, se desprendían del encolamiento que las mantenía unidas, pero al no estar prensadas durante el proceso de curado, estas conservaron su estado de máxima expansión muy superior a los 0.17 mm, y al ser colocadas en el molde de tracción, solo se tuvo espacio suficiente para colocar 3 capas con las siguientes orientaciones: [0/90/0], [0/90/22.5], [0/90/45].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El efecto de la orientación de la fibra dentro de la matriz exhibe una variación de las propiedades mecánicas del material compuesto, al igual que en

su estructura y morfología interna como se presenta a continuación.

3.1 Análisis de XRD

La figura 1 muestra el difractograma obtenido para compuesto poliméricos con fibra de carbono distribuidas de manera continua. El patrón de difracción del material compuesto muestra un relativo alto grado de semi-cristalinidad debido a la contribución de la fase amorfa de la resina epóxica y la fase cristalina de la fibra de carbono con una orientación (002) para 2Θ = 24.0 y (101) para 2Θ = 44.9 lo cual corresponde con reportado en la literatura [6], [7]. La ampliación de los picos (002) y (101) se interpreta como una correspondencia a los cristales de menor tamaño. La fibras de carbono también exhiben picos estrechos de reflexión en el XRD, aunque estos picos son más amplios y menos intensos que los picos del grafito, las fibras de carbono presentan una gran pico en una posición similar, que indica que estas fibras son menos cristalinas que el grafito, aunque mantienen un cierto orden de cristalinidad como lo muestra la figura 1 [7]

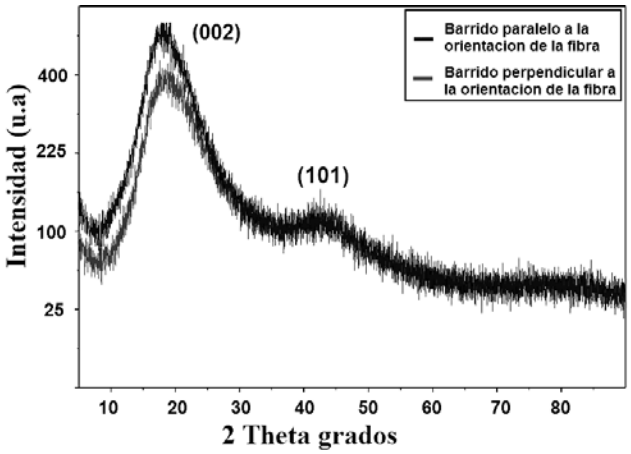


Figura 1. Patrón de difracción de rayos X para compuesto poliméricos con fibra de carbono.

3.2 Análisis de SEM

En las figuras 2a y 2b las imágenes de SEM muestran en un corte transversal la característica morfológica de la fractura y la región interfacial del compuesto después de un ensayo de flexión. Se pude observar que los compuestos más fuertes presentan mayor adhesión en la interfase, con fibras de carbono cubiertas por la matriz. Estos resultados se ajustan con los presentados en la literatura, lo cual confirman que la matriz epóxica tiene una mejor adherencia interfacial a las fibras de carbono [8]. En la magnificación de la Figura 2(b) también se pueden notar las secciones de falla después de fracturar para los compuestos en la prueba de impacto. Se puede observar que las fibras de carbono están bien adheridas por la matriz, con algunas fibras que están separadas de la matriz apreciándose dicho comportamiento mediante la prueba de arrancamiento o *pull-out*, la cual exhibe un indicador de alta adherencia [8].

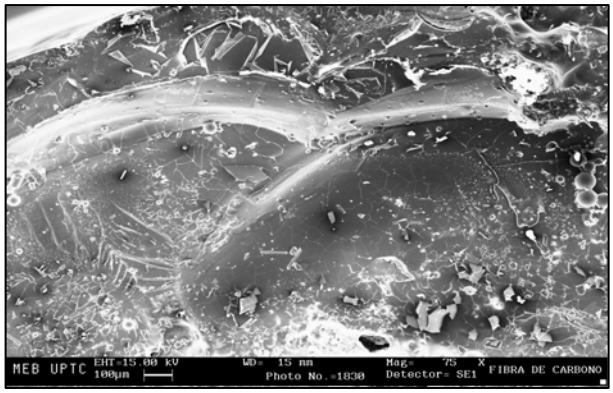


Figura 2a. Fractura del material compuesto después de un ensayo de flexión.

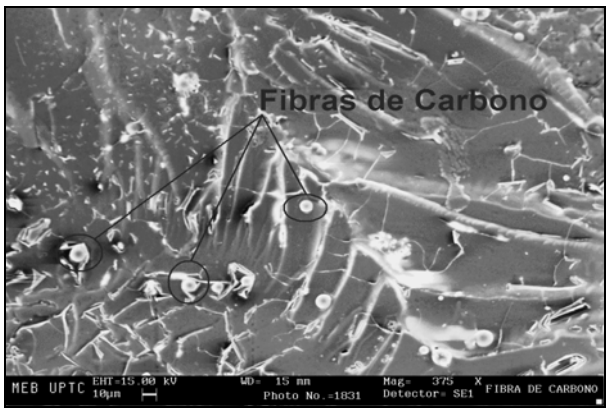


Figura 2b. Magnificación de la imagen de fractura del material compuesto después de un ensayo de impacto.

3.3 Análisis de Flexión

Los ensayos de flexión se realizaron en probetas con fibras largas unidireccionales y fibras cortas distribuidas al azar. Mediante la fotografía óptica se puso de manifiesto que el daño a partir de la grieta se produjo dentro de la región donde fue aplicada la carga como lo muestra las Figura 3 a y 3b. Cuando se analizó el compuesto tanto con fibras continuas como con fibras cortas distribuidas al azar como muestra las figuras 4a y 4b, se encontró que el daño se inició en la zona donde la matriz no presentaba fibras, en el caso de reforzamiento con fibras cortas,

generando así micro-fisuras que se propagaron a través de la interfase matriz fibra y posteriormente hacia todo el material compuesto, presentado al final un daño catastrófico lo que reflejó en una relativa menor resistencia a la flexión [9].

En la figura 4a se muestra el comportamiento del esfuerzo vs distancia para el material compuesto con fibras continuas. Se puede notar que la introducción del punto de carga y la energía fue asimilada y se propagada a lo largo y a través de la anchura de la probeta, dado que la matriz estuvo impregnada de fibras; el efecto no fue progresivo en la totalidad de la naturaleza del material dando como resultado un comportamiento carga-desplazamiento más dúctil, en lugar de las rupturas frágiles.

Este material compuesto presenta alta resistencia mecánica hasta el momento que se aplica una carga excesiva donde se generan fisuras tal como suele observarse cuando la matriz y las fibras se rompen [10]. La matriz con fibras cortas distribuidas al azar (figura 4 a) presenta un esfuerzo máximo de 2900 KN/m^2 comparado con la matriz con fibras continuas que presenta un esfuerzo máximo de 5900 KN/m^2 [11], representando así un incremento de un 50% en la resistencia al doblamiento lo cual es de suma relevancia para los escenarios físicos donde están sometidos los cascos de ciclismo.

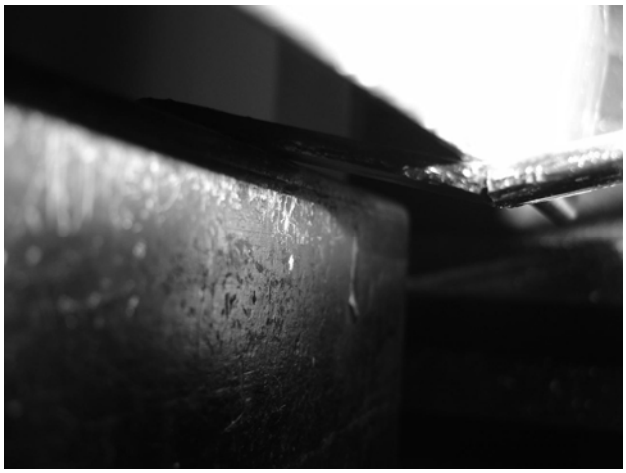


Figura 3a. Fotografía óptica para el ensayo de flexión.



Figura 3b. Fotografía óptica donde se evidencia el daño por la grieta e la región donde se aplicó la carga.

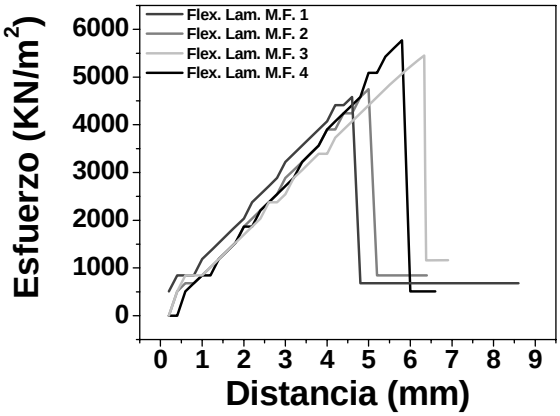


Figura 4a. Ensayo de flexión para un material compuesto fribroreforzado orientado con fibras continuas

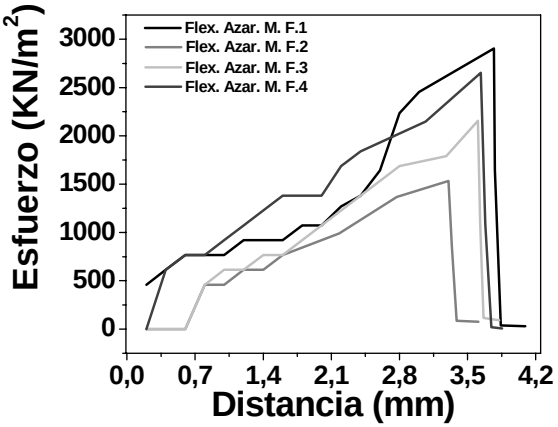


Figura 4b. Ensayo de flexión para un material compuesto con fibras distribuidas al azar.

3.4 Análisis de de Impacto

Mediante los ensayos de impacto se analizó la resiliencia para la matriz con fibras de diferente longitud y distribución. El composite con las fibras cortas distribuidas al azar presenta una resiliencia máxima de 12000 J/m^2 comparado con el compuesto de fibras continuas que presenta una resiliencia máxima de 42000 KN/m^2 representando así un incremento de un 71% en la resistencia la impacto como lo muestra la figura 5. Lo anterior evidencia que la energía aplicada por la carga en el momento del impacto es absorbida y distribuida en mayor cantidad debido a la continuidad de las fibras [12].

Los resultados de este trabajo son comparables a los reportados en la literatura para materiales similares ya que de de esta manera se puede asociar dicho comportamiento mecánico a la naturaleza del sistema fibro-reforzado continuo [13]. Además es bien sabido que la microestructura continua que se genera en la interfase matriz y fibra al tener una continuidad en dicha fibra está íntimamente relacionada con un incremento de la respuesta mecánica generando posteriormente y un bloqueo del desplazamiento de las dislocaciones y micro-fisuras por lo cual se observa una alta diferencia en los resultados para los compuestos fibro-reforzados con fibras distribuidas al azar y fibras continuas como lo muestra la figura 6 [14].

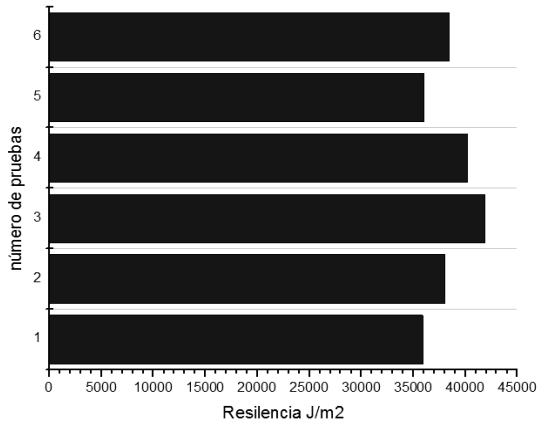


Figura 5a. Análisis de resiliencia para compuestos fibro-reforzados con f fibras continuas.

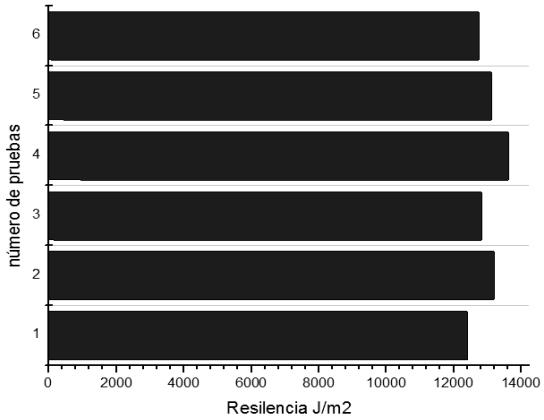


Figura 5b. Análisis de resiliencia para compuestos fibro-reforzados con fibras distribuidas al azar

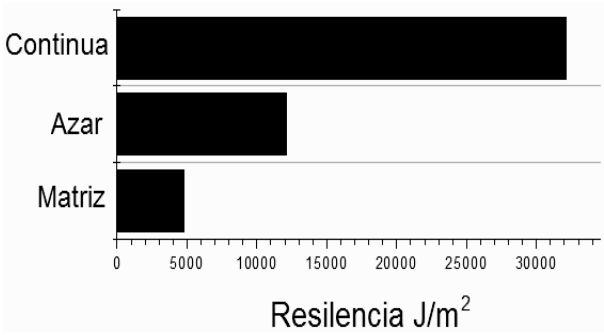


Figura 6. Diferencias en la resiliencia para compuestos fibro-reforzados con fibras distribuidas al azar y fibras continuas.

4. CONCLUSIONES

Los análisis de SEM confirman que la matriz de resina epóxica presenta buena adherencia interfacial con las fibras de carbono.

De los análisis de flexión, se pudo apreciar un incremento, de la resistencia a fractura por doblamiento en 50% cuando se trabajó con fibras continuas. De los análisis de resiliencia se encontró un aumento de un 71% en la resistencia al impacto para compuestos de matriz epóxica con fibras continúas unidireccionadas.

Las propiedades mecánicas de un compuesto fibro-reforzado con fibras de carbono distribuidas continuamente y unidireccionadas, confirman la bondad de aplicar este tipo de material en cascos utilizados para ciclismo al igual que en el uso de otros dispositivos empleados en deportes de alto desempeño.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. Designation: D 256 – 05. ASTM International. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, *West Conshohocken, PA United States*. **20** p. 1942-1959.

[2] Mills, N.J. and Gilchrist, A. *Accid. Anal. and Preview*. 1991, **23**,153-163 .

[3] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Designation: D 638 – 03. ASTM international. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, United States. 1**5** p. 19428-2959.

[4] Gibson, L.J. and Ashby, M.F. "Cellular Solids, Structure and Properties", **2nd** edition, Cambridge University Press (1996).

[5] Daniel. I. M, Hsiao. H. M. Int. *J Fract SpecialIssue.* 1999, **95,** 143–158.

[6] J. A. Macia, et al. *Microporous and Mesoporous Materials.* 2007, **10**, 397- 405.

[7] Md. Majibur Rahman Khan, et al. *Carbon* 2007, **45,** 1035–1042.

[8] Weiming Chen, et al. *Composites Science and Technology.* 2007, **67,** 2261–2270.

[9] Lee J, Soutis C. *Compos Part.* 2005; **36** (2), 21–27.

[10] Soutis C. *Compos Sci Technol*. 1991*;* **42** (4), 373–392.

[11] J. Lee, et al. "A study on the compressive strength of thick carbon fibre–epoxy laminates, 2007, **67**, 2015–2026.

[12] W. Chen et al. *Composites Science and Technology*. 2007, **67**, 2261-2270.

[13] Bazant PZ, et al. *Int J Fract; (Special Issue)*, 1999, **95,** 103–114.

[14] Chim ES, Lo KH. *J Reinf Plast Compos*, 1992, **11** (8), 838–896.