IMPACTO DE BAJA ENERGÍA DE UN LAMINADO EPOXI-FIBRA DE CARBONO

M. Sánchez-Soto*, G. Gonzalo, O. Jiménez, O.O. Santana, A.B. Martinez.
Centre Català del Plástic. Universitat Politécnica de Catalunya
C/ Colom 114, 08222 Terrassa.

Resumen

El estudio del comportamiento a impacto de los materiales compuestos tiene un gran interés tecnológico. En general, estos materiales son ensayados bajo la geometría de flexión de platos, con un exceso de energía en el impactor que causa la completa destrucción de la muestra. Sin embargo, impactos de mucha menor energía pueden causar daños a menudo no visibles. Se han realizado ensayos de impacto instrumentado de baja energía en la geometría de flexión de platos, con un impactor semiesférico de pequeña masa dejándolo caer desde alturas crecientes, registrándose las curvas fuerza en función del tiempo. Al mismo tiempo se han cuantificado las pérdidas de energía mediante la determinación del coeficiente de restitución. En general, estos resultados se han explicado mediante modelos conservativos de masa y muelles que no ajustan con los resultados experimentales. En nuestro trabajo se ha aplicado un modelo no conservativo y no lineal que tiene en consideración simultáneamente los fenómenos de flexión e indentación así como las pérdidas de energía. Con este modelo no conservativo se obtiene un excelente ajuste de los resultados experimentales, que permite determinar el nivel de energía necesario para causar el primer daño sobre la probeta y hallar el módulo elástico del composite a estas elevadas velocidades de impacto.

Abstract

The study of materials behaviour under impact loads is a subject of great interest. In the flexed plate geometry test, usually, the impact causes the total samples destroy, as the impact energy is in great excess. On the other hand, low energy impact loading can produce internal failures that usually are not notice. In this work, low impact energy test where performed over an epoxi-carbon fiber composite using a hemispherical headstock. A non-conservative and non-lineal model has been proposed in order to explain the material behaviour. This model take into accounts simultaneously the flexural and indentation phenomena. The energy losses have been quantified by means of the restitution coefficient. Using the proposed model an excellent fit of the experimental force-time trace is obtained. Further, it was possible to find the energy that produces the first composite damage, and, finally, the composite modulus was precisely determined.

1. INTRODUCCIÓN

Los diferentes procedimientos desarrollados para predecir el comportamiento a impacto de los materiales, se han basado, generalmente [1,2], en modelos conservativos que utilizan masas y resortes. Estos modelos consideran que no hay pérdidas de energía y asumen un comportamiento del material lineal y elástico.

Los resultados obtenidos a partir de los modelos citados no representan con exactitud el comportamiento de los materiales poliméricos, ya que en estos últimos se producen mecanismos que ocasionan notables pérdidas de energía.

Los modelos propuestos tratan de la flexión [2] y de la indentación [1] separadamente, aunque también se han propuesto modelos simultáneos [1,3] pero no conservativos.

Un modelo ajustado y completo debe considerar simultáneamente la flexión de las probetas así como la indentación producida por el impactor, y tener en cuenta las pérdidas de energía. Estas pérdidas se producen como consecuencia de: la naturaleza viscoelástica, la fricción entre el impactor y la probeta, las vibraciones y ondas de choque y finalmente por deformación plástica. Dichas pérdidas de energía se evalúan mediante la determinación del coeficiente de restitución [3].

El presente trabajo se ha llevado a cabo con el propósito de alcanzar varios objetivos. El primero, pretende determinar la viabilidad de la técnica de impacto de baja energía por caída de dardo (bajo geometría de flexión de platos) para caracterizar mecánicamente un composite. Un segundo objetivo consiste determinar las pérdidas de energía.

Finalmente se tratará de verificar la validez del modelo no conservativo propuesto aplicándolo a la caracterización de un laminado epoxi-fibra de carbono con el fin de determinar sus parámetros mecánicos característicos.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1. Coeficiente de restitución.

El coeficiente de restitución (ε) se define como la relación entre las velocidades anterior y posterior al impacto. Su valor es igual a la unidad si el impacto es puramente elástico, mientras que toma valor cero para un impacto puramente inelástico.

Si v_0 es la velocidad del impactor en el instante anterior al contacto con la probeta, y v_1 la velocidad justo en el instante posterior, el coeficiente de restitución resulta:

$$e = \frac{v_1}{v_0} \tag{1}$$

No obstante el valor de v_1 no es conocido, siendo necesario otro método para su determinación. El método consiste en igualar el momento y el impulso, quedando una expresión del tipo:

$$\int_{v_0}^{v_1} mv = \int_{0}^{t_c} Fdt \tag{2}$$

A partir de esta expresión, integrando el término izquierdo de la ecuación y arreglando se obtiene:

$$e = \frac{\int_{0}^{t_c} Fdt}{mv_0} - 1 \tag{3}$$

la integral correspondiente al impulso puede calcularse directamente de la curva fuerza-tiempo registrada experimentalmente para cada ensayo.

2.2. Modelo de flexión e indentación no conservativo

En este modelo, la colisión del sistema impactor-probeta a baja energía, se representa por la disposición de la figura 1, en donde m es la masa del impactor, K la constante de los dos resortes, mientras que C representa el coeficiente de amortiguación. El subíndice *i* se emplea para indentación y *f* para flexión. El resorte K_i es no lineal (hertziano).

Al ser un modelo en serie la fuerza aplicada es la misma en cada elemento mientras que el desplazamiento total es la suma de los individuales. Del modelo se sigue que:

$$F_m = m\ddot{a} \tag{4}$$

$$F_{Ci} = C_i \dot{a}_{Ci} \tag{5}$$

$$F_{Cf} = C_f \dot{a}_{Cf} \tag{6}$$

$$F_{Kf} = K_f a_{Kf} \tag{7}$$

$$F_{Ki} = K_i a_{Ki}^{3/2} \tag{8}$$

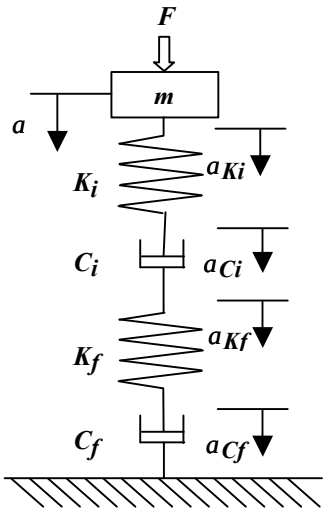


Fig 1. Modelo no conservativo en serie masa-resorte-amortiguador para flexión e indentación.

Las constantes K_f y K_i se definen como [4]

$$K_f = \frac{16p(1+u)D}{(3+u)r^2} = \frac{4pEe^3}{3(3+u)(1-u)r^2} \tag{9}$$

$$K_i = \frac{4\sqrt{R}}{3p(k_1+k_2)} = \frac{4\sqrt{R}}{3p}\left(\frac{1-u_1^2}{E_1} + \frac{1-u_2^2}{E_2}\right)^{-1} \tag{10}$$

El modelo puede simplificarse ya que los dos elementos amortiguadores son lineales y están dispuestos en serie, por lo que se puede representar como uno sólo:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_i} \tag{11}$$

Esta simplificación no es válida para los dos elementos elásticos ya que el de indentación no es lineal. Así pues, el nuevo modelo se puede representar tal y como se muestra en la figura 2.

Con este nuevo modelo simplificado, los desplazamientos de cada elemento se definen como:

$$a_{Ki} = a_1 \tag{12}$$

$$a_{Ci} + a_{Cf} = a_2 \tag{13}$$

$$a_{Kf} = a_3 \tag{14}$$

Por otro lado, la fuerza del amortiguador equivalente será igual a la aplicada sobre cada uno de los amortiguadores originales, de manera que:

$$F_{Ceq} = F_{Ci} = F_{Cf} \tag{15}$$

y:

$$F_{Ceq} = C_{eq}\,\dot{a}_2 \tag{16}$$

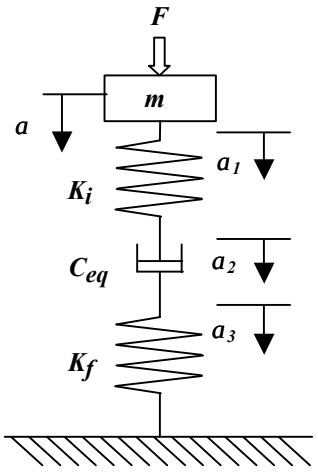


Fig 2. Modelo no conservativo en serie masa-resorte-amortiguador para flexión e indentación simplificado.

Una vez analizadas las expresiones anteriores, se pueden derivar las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema:

$$F = m\ddot{a} = K_f a_1 = C_{eq}\,\dot{a}_2 = K_i a_3^{3/2} \tag{17}$$

$$a = a_1 + a_2 + a_3 \tag{18}$$

Para reducir variables, de las dos expresiones anteriores se tiene que:

$$\ddot{a} = \frac{K_f}{m} a_1 \tag{19}$$

$$a_3 = \left[\frac{C_{eq}}{K_i}\dot{a}_2\right]^{2/3} \tag{20}$$

$$a_1 = a - a_2 - a_3 \tag{21}$$

Combinando adecuadamente estas tres ecuaciones se obtiene la siguiente expresión:

$$\ddot{a} = \frac{K_f}{m}\left(a - a_2 - \left[\frac{C_{eq}}{K_i}\dot{a}_2\right]^{2/3}\right) \tag{22}$$

También, a partir de la ecuación (17) se consigue:

$$\dot{a}_2 = \frac{K_f}{C_{eq}} a_1 \tag{23}$$

de forma que:

$$\dot{a}_2 = \frac{K_f}{C_{eq}}\left(a - a_2 - \left[\frac{C_{eq}}{K_i}\dot{a}_2\right]^{2/3}\right) \tag{24}$$

Las expresiones (22) y (24) establecen un sistema de ecuaciones que describe el comportamiento del sistema. Sin embargo, encontrar una solución analítica no es factible dado que se conocen 2 variables y un término no lineal, lo que nos obliga a buscar como solución una función numérica.

2.2. Resolución numérica

El método numérico más adecuado para la resolución numérica del sistema de ecuaciones planteado es el de Runge-Kutta de 4º orden. Si bien las ecuaciones (22) y (24) pueden transformarse directamente en dos de las funciones que necesitamos, se requieren otras dos expresiones que permitan el cálculo de las variables $a, \dot{a}, a_2 y\ \dot{a}_2$. El desplazamiento global queda:

$$\dot{a} = \frac{da}{dt} \tag{25}$$

Para determinar $\dot{a}_2$ sería necesario establecer una ecuación que relacione la velocidad del amortiguador equivalente con el resto de variables. Existen expresiones que establecen esta variable, pero no son válidas para el método usado, ya que se tratan con ecuaciones diferenciales no ordinarias. Una posible solución a este problema consiste en suponer el valor inicial de $\dot{a}_2 = 0$, de forma que se puede utilizar la siguiente aproximación:

$$\dot{a}_{2(i)} = \frac{da_{2(i)}}{dt} = \frac{a_{2(i)} - a_{2(i-1)}}{Dt} = \frac{Da_2}{Dt} \tag{26}$$

Así, el conjunto de funciones que definen el algoritmo es:

$$f_1 = \dot{a} \tag{27}$$

$$f_2 = \frac{K_f}{m}\left(a - a_2 - \left[\frac{C_{eq}}{K_i}\dot{a}_2\right]^{2/3}\right) \tag{28}$$

$$f_3 = \frac{K_f}{C_{eq}}\left(a - a_2 - \left[\frac{C_{eq}}{K_i}\dot{a}_2\right]^{2/3}\right) \tag{29}$$

donde

$$\dot{a}_{2(i)} = \frac{Da_2}{Dt} \tag{30}$$

sistema de ecuaciones que consta de 4 variables: $a, \dot{a}, a_2 y\ \dot{a}_2$.

Se resuelve el sistema ajustando simultáneamente la constante del amortiguador de manera que la curva teórica registrada coincida con la experimental, y el coeficiente de restitución calculado con la ecuación (3) a partir de la curva teórica de ajuste con el valor experimental.

3. MATERIALES.

El material ensayado es un laminado epóxi-fibra de carbono con la fibra distribuida unidireccionalmente a 0º, 45º y 90º en capas alternativas. La denominación del composite es *AW 193 PW/8552* y fue fabricada por *Hexcel Corporation*. La fibra de carbono fue tratada superficialmente y el curado del compuesto se produjo a 180ºC. Las características principales del laminado se reproducen en la tabla 1.

Tabla 1. Características del composite AW 193 PW/8552

Propiedad	Unidades S.I.
Configuración	Tafetán (no poroso)
Urdimbre	4.5 ± 0.2hilos/cm
Trama	4.5 ± 0.2hilos/cm
Espesor nominal	0.178 mm
Peso superficial	193 ± 8g/cm^2
Densidad	1.78 ± 0.05g/cm^3
Forma del filamento	Redondo
Tow cross-sección	0.12 mm^2
Módulo elástico a tracción a 0º	67.73Gpa
Resistencia a tracción a 0º	829.4MPa
Módulo elástico a tracción a 90º	65.5Gpa
Resistencia a tracción a 90º	794.8MPa
Módulo elástico a compresión a 0º	60.1Gpa
Resistencia a compresión a 0º	884.7MPa
Módulo elástico a compresión de la trama	62.2Gpa
Resistencia a compresión de la trama	877.7MPa

Las probetas de ensayo fueron cuadrados de *8,3mm* de lado y *2,58mm* de espesor.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos de impacto de baja energía se han llevado a cabo con un equipo instrumentado Dartvis (Ceast) empleando una masa total de caída de 0.7437 Kg. La altura de caída se tomó variable hasta alcanzar como máximo una velocidad de 2.5 m/s . En todos los casos se empleó un dardo semiesférico de 12.7mm de diámetro. Las probetas se colocaron simplemente apoyadas sobre una base en forma de corona circular de diámetro interno 60 mm. y externo de 80 mm. La temperatura de ensayo fue la ambiental.

Las variables más importantes extraídas de cada ensayo fueron (figura 3): La velocidad del impactor antes del impacto (v_{om}), la fuerza máxima alcanzada en el impacto ($F_{máx}$), el tiempo de contacto entre probeta e impactor (t_c) y el tiempo correspondiente a la fuerza máxima ($t_{Fmáx}$).

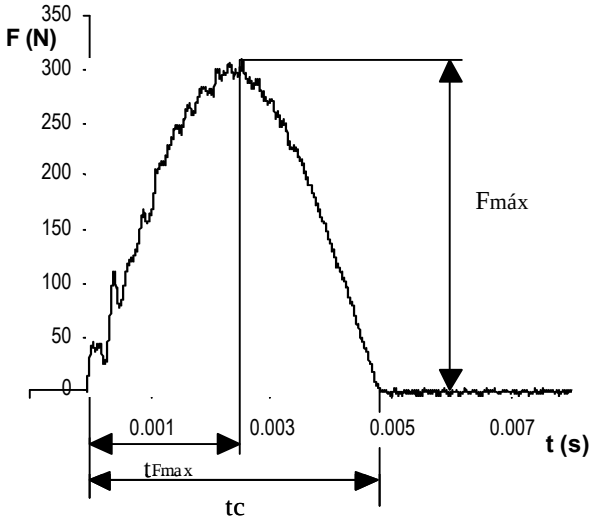


Fig 3. Curva F-t experimental de un ensayo de impacto sobre el composite.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Coeficiente de restitución

La representación del coeficiente de restitución en función de la velocidad se muestra en la figura 4.

Al observar el gráfico, se aprecia como el valor del coeficiente de restitución es siempre menor que la unidad con el mínimo situado en 0.85. Esta circunstancia implica que incluso en condiciones de baja velocidad de impacto existe pérdida energética, siendo ésta casi igual a la energía total perdida por el dardo o a la variación de su energía cinética (figura 4). También se puede observar un aumento de las pérdidas de energía al incrementar la velocidad de solicitación, dado que existe una ligera disminución de ε.

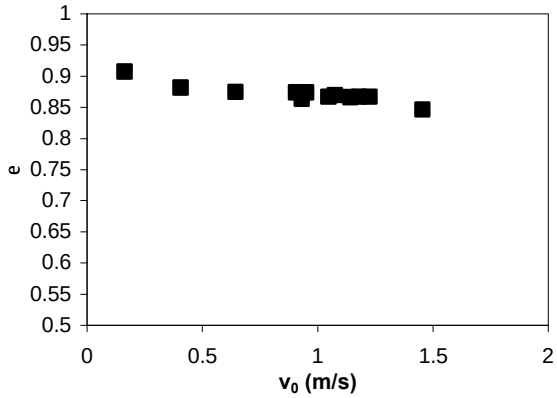


Fig 4. Coeficiente de restitución del composite en función de la velocidad.

Los coeficientes de restitución determinados experimentalmente confirman la existencia de pérdidas energéticas, en consecuencia, la hipótesis de utilizar

modelos no conservativos es adecuada. Por otra parte se corrobora que el coeficiente de restitución no es un parámetro intrínseco del material sino que depende de las condiciones del ensayo.

6.2. Aplicación del modelo

En la figura 5 se representa tanto la curva experimental de ensayo como el ajuste derivado de la aplicación del modelo. Puede observarse como, en el rango de velocidades de solicitación ensayadas, la coincidencia entre ambas es muy buena. Las pequeñas diferencias se deben a la existencia de efectos dinámicos inherentes a este tipo de ensayo.

A partir del modelo también se puede extraer el valor del módulo elástico del composite en función de la velocidad de ensayo (figura 6).

Puede observarse como el módulo de elasticidad se mantiene constante, dentro del error experimental, independientemente de la velocidad a la que se realiza el ensayo. La invarianza del módulo con la velocidad era de esperar dada la despreciable contribución de la viscoelasticidad en el compuesto.

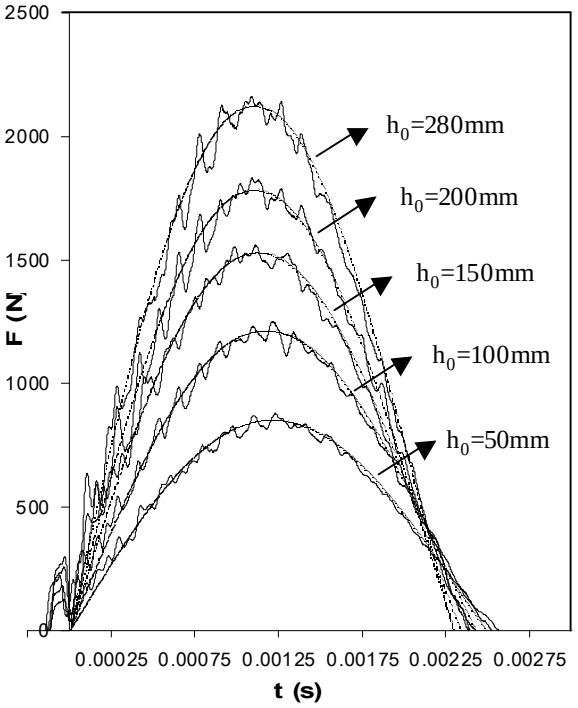


Fig.5. Curvas "fuerza-tiempo" experimentales (trazo fuerte) y teóricas (trazo débil) del composite a diferentes alturas y espesores

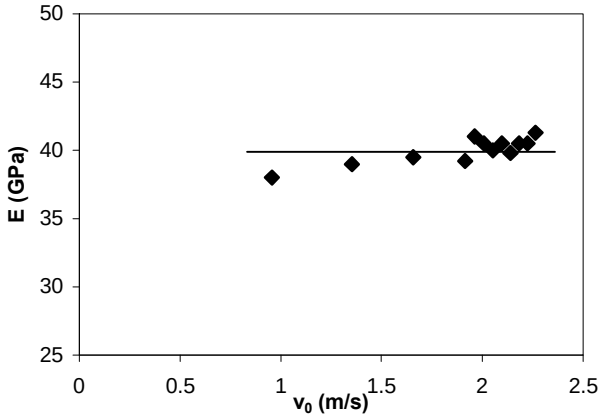


Fig.6. Variación del módulo de Young con la velocidad para el composite

Para tener una comprobación adicional del valor de los módulos hallados, se ensayó el compuesto en flexión por tres puntos a una velocidad de 1mm/min [5]. La comparativa de los valores se representa en la tabla 2.

Tabla 2. Valores medios de E aplicando el modelo de combinado y el obtenido por flexión de tres puntos.

ESPESOR (mm)	*E* (MPa) (Modelo)	*E* (MPa) (Tracción)
2,58	39983	39596

Se aprecia que el módulo de elasticidad encontrado por el modelo de flexión combinado es ligeramente mayor que el hallado en flexión a baja velocidad, sin embargo la diferencia entre ambos valores (menos del 1%) es despreciable, confirmándose la exactitud del modelo.

De manera complementaria, también se han representado gráficamente los diferentes parámetros relacionados con las pérdidas de energía (C_{eq}, C_i y C_f) en función de la velocidad de solicitación (figura 7) y el coeficiente de restitución (figura 8). A partir de ambos gráficos se desprende que al aumentar la velocidad de impacto las pérdidas energéticas totales aumentan (disminuye el valor de C_{eq},).

Sin embargo, observando el valor de C_i y C_f, se aprecia que C_f se mantiene más o menos constante al aumentar la velocidad, de manera que las mayores pérdidas de energía son debidas a los fenómenos de flexión, siendo poco importantes las pérdidas por indentación.

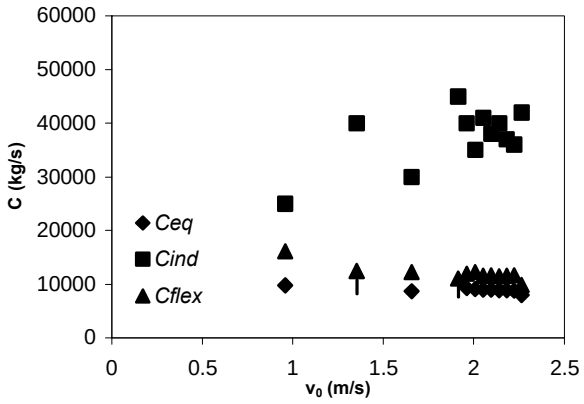


Fig 7. Comportamiento de C_{eq}, del amortiguador así como de sus componentes (C_i y C_f) con la velocidad

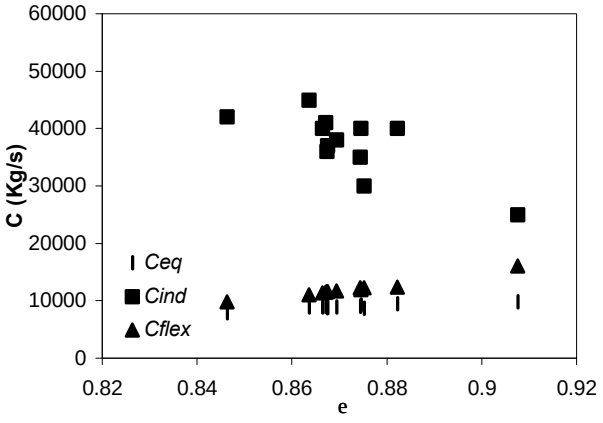


Fig. 8. Comportamiento de C_{eq}, del amortiguador y de sus componentes (C_i y C_f) con el coeficiente de restitución

A partir de una cierta altura de caída del impactor,la forma de la curva fuerza-tiempo resgistrada experimentalmente se separa paulatinamente de la forma ilustrada en la figura 5, y el ajuste del modelo empeora. Este fenómeno se debe a que el material se empieza a fisurar y cambia la constante K_f (ecuación 9). De esta manera se puede conocer en que punto se ha originado el daño, aún invisible, sobre el material.

7. CONCLUSIONES

A raíz del análisis de las curvas de impacto experimentales se ha comprobado que el coeficiente de restitución siempre es menor que la unidad y que no es una propiedad intrínseca del material, dado que varía significativamente con la velocidad de ensayo.

La aplicación del modelo combinado de flexión e indentación permite ajustar correctamente las curvas fuerza-tiempo experimentales. El módulo de elasticidad obtenido a través del modelo es coincidente con el hallado en flexión a muy baja velocidad. Así pues, el modelo conjunto propuesto representa de forma adecuada el comportamiento del composite dentro del rango de velocidades estudiado, permitiendo determinar las características elásticas de los materiales en condiciones de alta velocidad de deformación.

8. AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen la financiación recibida del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto MAT-2000-0188-p4.

9. REFERENCIAS

[1] Greszczuk, L.B., “Damage in Composite Materials due to Low Velocity Impact” en Impact Dynamics (Ed. J.A. Zukas et al. Editors) pp. 55-94, (1982). Jhon Wiley & Sons. New York.

[2] Casiraghi, T., G. Castiglioni and T. Ronchetti, “Fracture mechanics of polymers. Critical evaluation of linear elastic behaviour at high speed testing” Journal of Materials Sciencie, 23, 459-466 (1988)

[3] Pang S.S. and Y. Zhao “Impact response of composite laminates with hemispherical indenter” Polymer Engineering and Sciencie, 31, 1461-1466 (1991)

[4] A. B Martínez, J. Agullo, et al. “Impacto de baja energía de compposites de poliestireno” Actas del IV Congreso Nacional de Materiales Compuestos. Gijón pp. 43-78, (2001)

[5] UNE-EN-ISO 178, Plásticos: Determinación de las propiedades de flexión (Junio 1997)