

## Comportamiento frente a impacto de placas de vidrio/vinilester

S. K. García-Castillo, S. Sánchez-Sáez, E. Barbero, C. Navarro

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras  
Universidad Carlos III de Madrid, España.

### RESUMEN

Los elementos estructurales de fibra de vidrio en matriz polimérica pueden verse expuestos durante su montaje, mantenimiento y vida en servicio a cargas impulsivas, lo que hace necesario estudiar su comportamiento frente a este tipo de cargas. En este trabajo realizaron ensayos de impacto sobre placas de un tejido equilibrado vidrio/vinilester, utilizando los siguientes dispositivos experimentales: torre de caída, barra Hopkinson y cañón de gas, que permitieron trabajar en un rango de velocidades desde los 4 m/s hasta los 350 m/s. Se determinó la extensión del área dañada en todas las placas sometidas a impacto, por medio de técnicas de inspección no destructiva (C-Scan). En los ensayos de baja velocidad se midió el desplazamiento máximo de la placa; y en el caso de la torre de caída se obtuvo la energía absorbida. Por último, en los ensayos de impacto balístico se estableció la relación entre la velocidad residual y la de impacto. De los resultados obtenidos, se puede concluir que a bajas velocidades de impacto la relación existente entre la energía de impacto y la absorbida presenta una tendencia lineal; al igual que la relación entre la extensión del daño y la energía de impacto. Mientras, que para los impactos de alta velocidad se presenta un punto de inflexión a partir del cual la extensión del área dañada disminuye, con el aumento de la velocidad.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos de fibra de vidrio en matriz polimérica son ampliamente utilizados en la industria del transporte, electricidad y deporte, debido a su baja densidad, buen comportamiento mecánico, estabilidad química y bajo coste.

Al igual que otros materiales compuestos, en el diseño de elementos estructurales fabricados con fibra de vidrio-vinilester debe considerarse que pueden encontrarse expuestos durante su montaje, mantenimiento o vida en servicio, a impactos de baja o alta velocidad. Éste es uno de los principales factores que limitan el uso de los materiales compuestos (Hawyes et al. 2001), dado que estas cargas pueden originar daños que provocan cambios importantes en el comportamiento del elemento, por lo que, se hace necesario estudiar su comportamiento frente a este tipo de solicitaciones.

Los impactos de baja velocidad son considerados peligrosos en los materiales compuestos, porque el daño que pueden producir sobre el material puede no ser detectado por inspección visual (Reis et al. 1997), de ahí la importancia de realizar estudios de este tipo. En los ensayos de impacto a baja velocidad, la torre de caída es uno de los dispositivos experimentales más utilizados (Cantwell et al. 1989, Richardson et al. 1996, Collombet et al. 1997, Bayandor et al. 2003), pudiéndose reproducir fácilmente situaciones que pueden aparecer durante las operaciones de montaje o

mantenimiento en la que una masa relativamente grande impacta a baja velocidad y energía pequeña, como por ejemplo la caída de una herramienta.

En ensayos de baja velocidad pero con mayor energía de impacto, una alternativa a la torre de caída de peso es la barra Hopkinson, habitualmente empleada en la caracterización mecánica de materiales (Gary et al. 2000); y de la cual no existe mucha información, con respecto a su utilización en el impacto sobre placas.

En los ensayos de impacto a alta velocidad se suele utilizar el cañón de gas (Abrate 1991, Cantwell et al. 1989), con este dispositivo se pueden realizar impactos de pequeños fragmentos de poca masa, impulsados a elevadas velocidades, lo que permite reproducir los impactos que pueden ocurrir durante el vuelo, aterrizaje y despegue de los aviones.

La mayoría de los investigadores analizan la respuesta de los materiales compuestos frente a impactos, bien de alta velocidad o de baja velocidad, pero raramente ambos simultáneamente, lo que hace que las comparaciones entre los resultados presenten cierta dificultad, al emplearse materiales y geometría de probetas diferente. Por ello, en este trabajo se ha estudiado el comportamiento de un material compuesto frente a impactos, que van desde las bajas velocidades hasta las altas, utilizando la misma geometría de probetas. Además, se presentan los primeros resultados de la utilización de una barra Hopkinson modificada en la realización de ensayos impacto.

## **2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

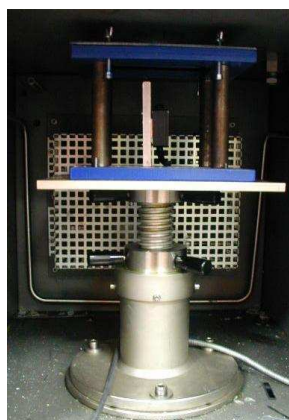
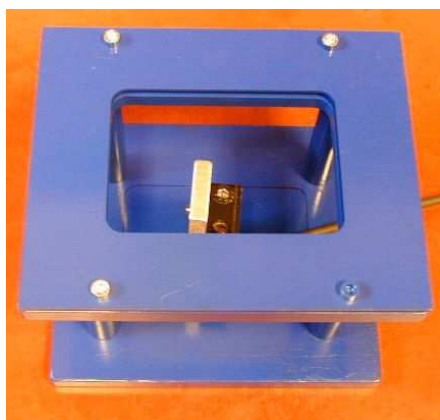
El material compuesto seleccionado para la realización del estudio fue un tejido equilibrado de fibra de vidrio "E" en matriz vinilester, de 2,5 mm de espesor, fabricado por la empresa ROGA y representativo del utilizado en la industria del transporte. De las placas suministradas, se cortaron probetas de 140 mm x 200 mm, que fueron utilizadas en todos los ensayos de impacto que se realizaron en la torre de caída, la barra Hopkinson y el cañón de gas. El tamaño de probeta se seleccionó para asegurar que el daño producido por el impacto no alcanzara los bordes de la misma.

### **2.1 Ensayos de impacto de baja velocidad**

Estos ensayos se realizaron en dos dispositivos experimentales diferentes, que permitieron alcanzar diversos niveles de energía.

Los ensayos de impacto de más baja energía sobre el material compuesto se realizaron en una torre de caída de peso, marca CEAST Fractovis, modelo 6785, empleando para ello un percutor de punta semiesférica, de 22 mm de diámetro y 3,6 Kg de masa. Para llevar a cabo estos ensayos, se diseñó y fabricó un soporte específico, que permitía la sujeción de las probetas, su colocación en la cámara de ensayos y en cuya base estaba posicionado un laser doppler que permitió medir el desplazamiento del punto central de las placas durante el impacto (Fig. 1 y 2).

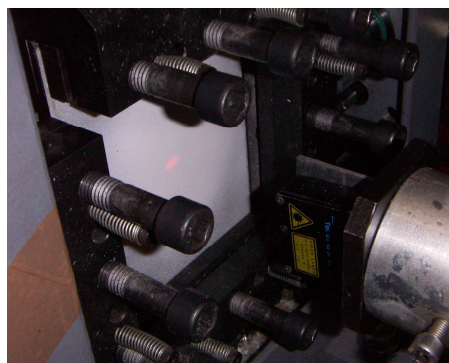
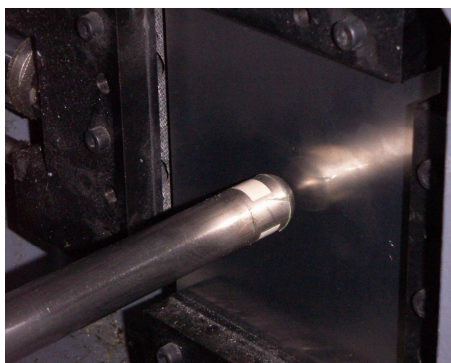
El número total de ensayos realizados en la torre de caída fue doce, para las siguientes energías de impacto: 15 J, 25 J y 35 J; que corresponden a velocidades de impacto de 2,89 m/s, 3,73 m/s y 4,41 m/s. A partir de estos ensayos se determinó la energía absorbida, la extensión del daño y el desplazamiento máximo de las placas en función de la energía de impacto.



**Fig. 1 - Soporte para la sujeción de las probetas y el medidor de desplazamiento**

**Fig. 2 - Soporte ubicado en la cámara de ensayos de la torre de caída**

Para realizar ensayos de impacto a baja velocidad pero de mayor energía que la obtenida en la torre de caída, se utilizó una barra Hopkinson de compresión a la que se le realizaron una serie de modificaciones, que consistieron en: prescindir de la barra transmitida; sustituir la barra incidente de punta plana por una de punta semiesférica de 22 mm de diámetro (Fig. 3), 1 m de largo y 2,95 Kg de masa; instrumentar la barra incidente en un solo punto; y por último acoplar un laser doppler (Fig. 4) que permitió medir el desplazamiento del punto de la placa donde se produce el impacto.



**Fig. 3 - Barra incidente de punta semi-esférica**

**Fig. 4 - Dispositivo de medición de desplazamiento**

En la barra Hopkinson también se realizaron doce ensayos, repartidos entre 46,5 J, 54,1 J y 76,5 J de energía de impacto, las cuales corresponden a 5,6 m/s, 6,1 m/s y 7,2 m/s de velocidad de impacto. Sin embargo, previamente fue necesario integrar los dispositivos experimentales y poner a punto el procedimiento, por lo que el número real fue mayor al indicado. A partir de estos ensayos se estimó la extensión del daño y el desplazamiento máximo en función de la energía de impacto.

## 2.2 Ensayos de impacto balístico

Para realizar los ensayos de impacto balístico se empleó un cañón de gas, fabricado por la empresa SABRE BALLISTICS (Fig. 5), de 12,7 mm de calibre (Fig. 6). Los impactos se realizaron con proyectiles esféricos, de 12,5 mm de diámetro y 8,33 g de masa, con velocidades de impacto entre 100 m/s y 350 m/s.

Para llevar a cabo estos ensayos fue necesario desarrollar un dispositivo experimental que permitió medir la velocidad de impacto y la residual. El medidor de velocidad se basa en la determinación del tiempo que tarda un proyectil en recorrer dos láminas metálicas separadas una distancia conocida.



Fig. 5 – Cañón de gas



Fig. 6 – Detalle del cañón de gas

Como resultado de los ensayos de alta velocidad se determinó la relación entre la velocidad residual y la de impacto, así como el límite balístico.

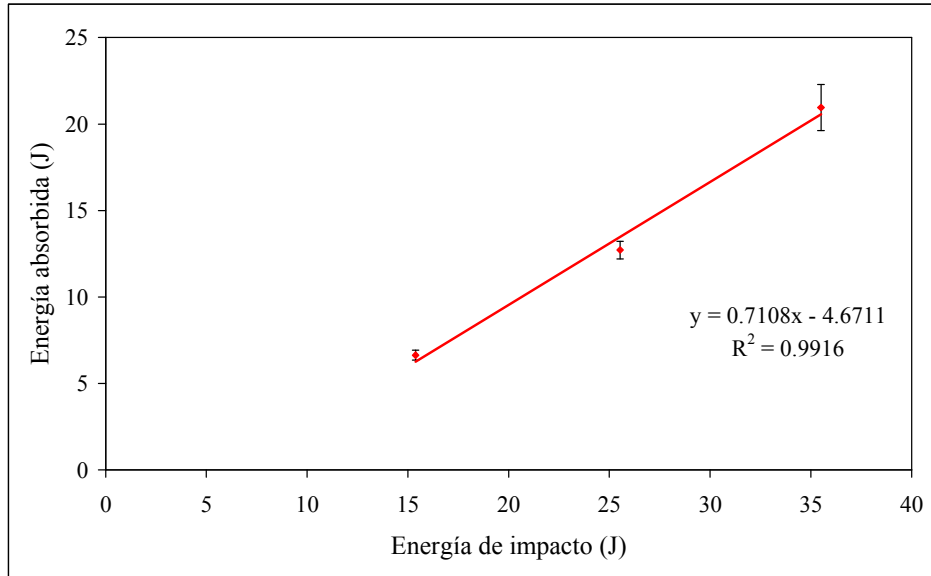
Finalmente, en todas las probetas se midió la extensión del daño mediante la técnica de inspección no destructiva, C-Scan, utilizando un palpador de 1 MHz.

## 3. RESULTADOS

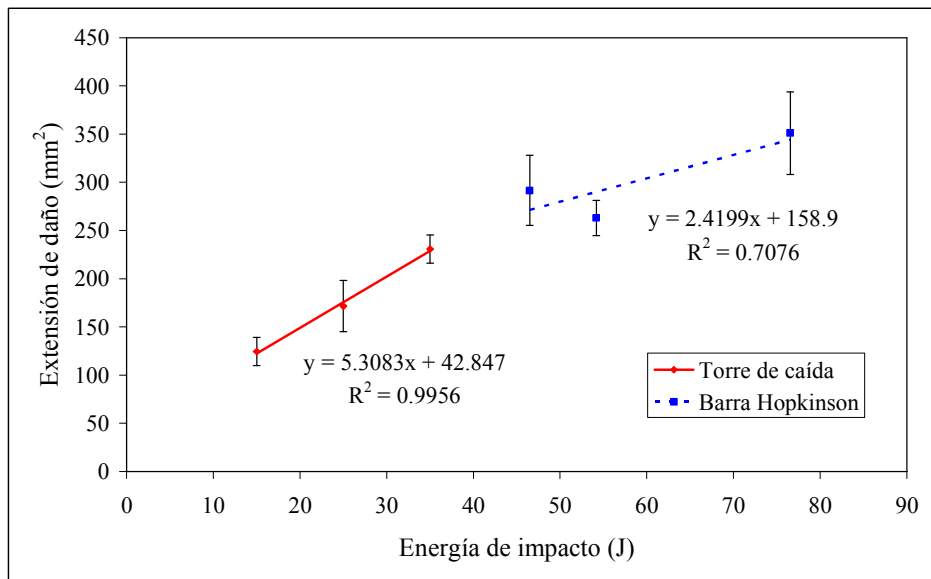
### 3.1 Ensayos de impacto de baja velocidad

En el caso de los ensayos de impacto en la torre de caída de peso se determinó la energía absorbida por las placas de material compuesto, y se relacionó cada una de ellas con su respectiva energía de impacto (Fig. 7), lo que permite afirmar que en rango de 15 J a 35 J de energía de impacto, la energía absorbida sigue una relación lineal.

En los ensayos de impacto a baja velocidad, tanto los realizados en torre de caída como en barra Hopkinson, se relacionó la extensión del daño con la energía de impacto (Fig. 8), observándose para ambos casos un incremento en la extensión del área dañada a medida que aumenta la energía de impacto. Sin embargo, la curva de ajuste para los impactos en la barra Hopkinson presenta un coeficiente de correlación inferior a 0,9; lo que indica que la relación entre ambas variables no es tan clara como en la torre de caída de peso. Además, para los ensayos en de la torre de caída la pendiente de la recta de ajuste es mayor que en la barra Hopkinson, lo que permite afirmar que la velocidad de incremento en la extensión del daño es mayor. Sin embargo, en todas estas afirmaciones se debe considerar que se trabajó con dos equipos de experimentación diferentes.



**Fig. 7 – Energía absorbida en función de la energía de impacto, para las placas de tejido vidrio/vinilester impactadas en torre de caída**



**Fig. 8 – Extensión del área dañada en función de la energía de impacto**

El desplazamiento máximo en función de la energía de impacto para los ensayos de baja velocidad de impacto (Fig. 9), también presenta un ajuste lineal. Pero, en este caso se observa que el desplazamiento de las placas en los impactos de torre de caída es mayor

que en los ensayos de barra Hopkinson, y que además la velocidad de crecimiento es más elevada.

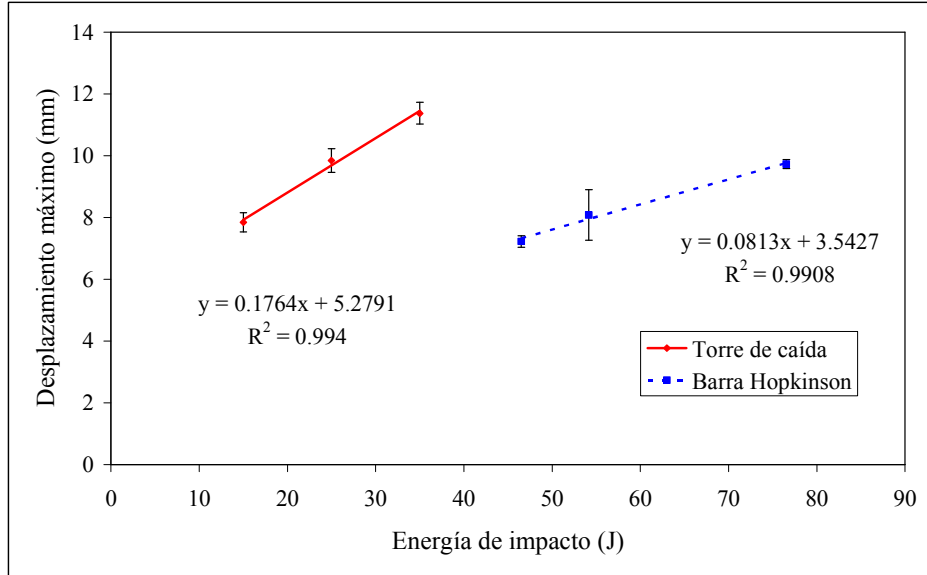


Fig. 9 – Desplazamiento máximo en función de la energía de impacto

### 3.2 Ensayos de impacto balístico

En los ensayos de impacto realizados en el cañón de gas, se estableció la relación existente entre la velocidad de impacto y la residual (Fig. 10) para el material estudiado, ajustándose la velocidad residual en función de la de impacto, mediante la ecuación que se presenta a continuación (Zuckas et al. 1992 y Kasano 1999):

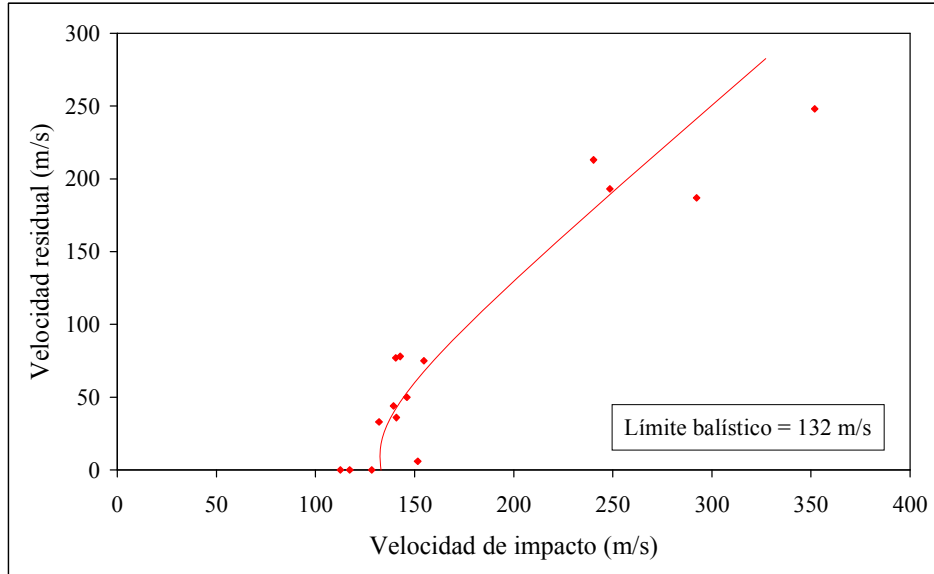
$$V_r = \begin{cases} 0, & 0 \leq V_i \leq V_l \\ A \cdot (V_i^p - V_l^p)^{1/p}, & V_i > V_l \end{cases} \quad (1)$$

donde:  $V_r$  es la velocidad residual,  $V_i$  es la velocidad de impacto,  $V_l$  es el límite balístico, y  $p$  y  $A$  son parámetros empíricos de ajuste, que para el caso en estudio toman los valores de 2 y 1 respectivamente.

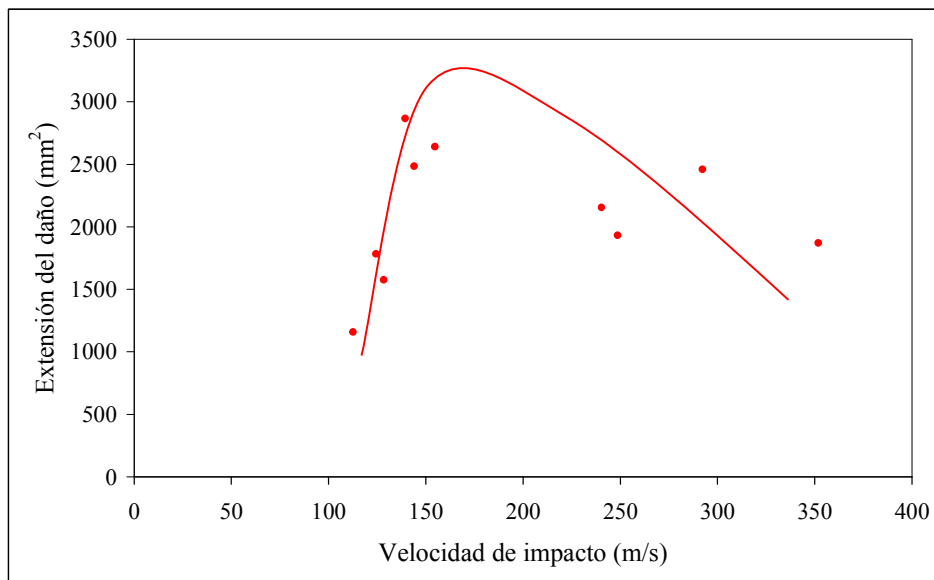
El límite balístico para las placas de tejido fue estimado a partir de la curva de ajuste de la velocidad residual en función de la de impacto, obteniéndose un valor de 132 m/s para el material en estudio y el proyectil empleado.

Si consideramos la extensión del área dañada en función de la velocidad de impacto (Fig. 11), se puede observar que la extensión del daño aumenta con la velocidad de impacto hasta alcanzar un valor máximo de área, correspondiente a una velocidad de impacto en torno a 150 m/s, y a partir de este valor el área dañada disminuye con el incremento de la velocidad. Este comportamiento coincide con el descrito por otros autores para materiales de fibra de carbono-epoxi (López-Puente et al. 2003).

A partir de los resultados observados sería recomendable realizar un número mayor de ensayos, a velocidades de impacto por encima de los 350 m/s, para poder determinar cuál es el valor mínimo en la extensión del área dañada para altas velocidades.



**Fig. 10 – Velocidad residual en función de la de impacto para los ensayos de impacto balístico**



**Fig. 11 – Extensión del daño en función de la velocidad de impacto para los ensayos de impacto balístico.**

#### 4. CONCLUSIONES

En los ensayos de impacto en barra Hopkinson, se observa un comportamiento similar al descrito en la torre de caída de peso, donde las energías de impacto son menores.

La extensión del daño en las placas ensayadas en torre de caída y barra Hopkinson aumenta linealmente con la energía de impacto. El mismo comportamiento se observa en el caso del desplazamiento máximo del punto de la placa sobre el que se produce el impacto, aunque en ambos casos las pendientes son diferentes.

El comportamiento balístico del material compuesto fue estudiado con respecto a la velocidad residual, la extensión del área dañada y el límite balístico. En el caso de la velocidad residual se observó un comportamiento similar al descrito por otros autores en este tipo de ensayos, para otros materiales. La extensión del daño generado por el impacto se incrementa al aumentar la velocidad de impacto, hasta alcanzar un valor máximo a una determinada velocidad y a partir de esta disminuye con el incremento de la velocidad. Por último, se estimó que el límite balístico para el material estudiado y proyectil utilizado es de 132 m/s.

#### REFERENCIAS

- ABRATE S. (1998) Impact on composite structures, *Cambridge university press*.
- BAYANDOR J., THOMSON R. S., SCOTT M. L., NGUYEN M. Q., ELDER D. J. (2003). Investigation of impact and damage tolerance in advanced aerospace composite structures, *International Journal of Crashworthiness*, 8, 290-306.
- CANTWELL W. J., MORTON J. (1989). Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP, *Composite*, 20, 6.
- COLLOMBET F., LALBIN X., BONINI J., MARTIN V., LATAILLADE J. L. (1989). Damage criteria for the study of impacted composite laminates, *Composites science and technology*, 58(1989), 679-689.
- GARY G, ZHAO H. (2000). Dynamic testing of fibre polymer matrix composite plates under in-plane compression, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 31,8, 835-840
- HAWYES V.J.; CURTIS P.T. Y SOUTIS C. (2001). Effect of impact on the compressive response of composite laminates, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 32, 263-1270
- KASANO H. (1999). Recent advances in high-velocity impact perforation of fiber composite laminates, *JSME International journal*, serie A, 42,2, 147-157,
- LÓPEZ-PUENTE J., ZAERA R., NAVARRO C. (2003). High energy impact on woven laminates, *Journal Physique IV*, 639-644.
- REIS L., FREITAS M. (1997). Damage grow analysis of low velocity impacted composite panels. *Composite structures*, 38, 509-515,
- RICHARDSON M. O. W., WISHEART M. J. (1996), Review of low-velocity impact properties of composite materials, *Composites part A*, 27, 1123-1131.
- ZUKAS J. A., NICHOLAS T., SWIFT H., GRESZCZUK L. B., CURRAN D. R. (1992). *Impact Dynamic*, Krieger Publishing Company, Florida.