

A. Mata-Díaz, J. López-Puente, D. Varas, J. Pernas-Sánchez,
J.A. Artero-Guerrero

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Avenida de la Universidad 30, 28911 Leganés, España

Análisis experimental de impactos de alta velocidad de fragmentos de material compuesto carbono/epoxi

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

Material compuesto

Alta-velocidad

Fragmento

Impacto

Modelo analítico

La industria aeronáutica persigue de forma continua la optimización de componentes estructurales con el objetivo de reducir su peso y conseguir un transporte más sostenible. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de aeronaves que probablemente incorporen motores de rotor abierto, ya que estos presentan un consumo sensiblemente menor que los actuales. Estos motores poseen una serie de palas contrarrotatorias realizadas empleando material compuesto, las cuales podrían desprenderse e impactar contra el fuselaje de la aeronave. Los impactos sobre una estructura aeronáutica pueden ser provocados por cuerpos cuasi-indeformables (fragmentos metálicos), o altamente deformables (granizo, pájaro). Aparte de éstos, que ya han sido estudiados con cierta profundidad, existe otro tipo de impactos, prácticamente inexplorados pero que suponen una problemática actual, que son los de fragmentos de laminados de carbono/epoxi.

En este trabajo se han realizado ensayos de impacto de alta velocidad de fragmentos de carbono/epoxi en un rango de velocidades desde los 80 hasta 190 m/s. Estos ensayos se han monitorizado empleando cámaras de alta velocidad lo cual ha permitido, por medio de un software específico de tracking, calcular su aceleración y por lo tanto la fuerza ejercida. Así mismo se ha cuantificado la erosión que sufren los mismos durante el impacto. Con el fin de estudiar el proceso de rotura, se ha propuesto un modelo analítico sencillo para poder evaluar la influencia de los diferentes mecanismos de absorción de energía durante el impacto y de esta manera poder predecir la erosión que sufre el fragmento durante el impacto.

Experimental analysis of high velocity impacts of carbon/epoxy composite fragments

ABSTRACT

Keywords:

Composite material

High-velocity

Impact

Analytical model

The aeronautical industry tries continuously to find different strategies to optimize structural components with the aim of reducing their weight and hence achieving a more sustainable transport. The new developments that will come in the following years, will probably use incorporate open rotor engines since they have lower consume. These engines have a series of counter-rotating blades made of composite materials, which could impact the aircraft fuselage in case of failure. Impacts on aeronautic structures can be caused by rigid (metallic fragments), or by highly deformable bodies (hail, bird). Apart from these, which have already been studied, there are other types of impacts, practically unexplored, which are the fragments of carbon/epoxy laminates.

In this work, high speed impact tests of carbon/epoxy fragments have been carried out in a wide range of impact velocities, from 80 to 190 m/s. These tests have been monitored using high-speed cameras which, using a specific tracking software, could calculate their acceleration and therefore the force exerted. The erosion suffered during impact has also been quantified. In order to study the failure process, a simple analytical model has been proposed to evaluate the influence of the different mechanisms of energy absorption during the impact and hence predict the erosion of the fragment during the impact.

1 Introducción

La industria aeronáutica está buscando activamente soluciones que permitan reducir el consumo de combustible de las aeronaves; éstas pasan por la mejora de los motores y por la reducción de peso de su estructura. Este hecho es de gran importancia ya que la huella de carbono de este sector industrial no es despreciable; de hecho, el transporte aéreo es responsable aproximadamente de un 2% de los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera.

Los últimos desarrollos realizados por los dos grandes fabricantes de aeronaves civiles emplean de manera profusa materiales compuestos laminados para su estructura, en particular laminados de carbono/epoxi (CFRPs por sus siglas en inglés). Estos materiales poseen unas propiedades mecánicas específicas excelentes, aunque sin embargo su tolerancia frente a impacto cuando este ocurre de forma perpendicular al plano del laminado, es baja.

Durante su vida útil una estructura aeronáutica puede estar sometida a diferentes tipos de impactos de alta velocidad. Estos se pueden clasificar atendiendo a diferentes circunstancias, siendo una de ellas la resistencia del objeto que impacta comparado con la estructura sobre la que impacta. De esta manera se tendrían por una parte impactos de sólidos deformables (granizo, pájaro) e impactos de sólidos cuasi-indeformables (fragmentos metálicos). Sin embargo, en los últimos desarrollos de estructuras aeronáuticas ha surgido un caso intermedio en el que las propiedades mecánicas del objeto que impacta son similares a las de la estructura sobre la que impacta. Un ejemplo sería el de un impacto de un fragmento de material compuesto contra una estructura del mismo material.

Un impacto de alta velocidad de CFRP contra CFRP se podría producir en caso de un fallo en el motor de una aeronave, en que un fragmento del fan (fabricado habitualmente empleando laminados carbono/epoxi) impactase contra el fuselaje. Además de este caso, en un futuro cercano podría darse otra situación en la que podría ocurrir un fenómeno similar. Está previsto que la nueva generación de aeronaves de pasillo único incorpore una nueva tipología de motores denominada de rotor abierto que además se situarían en las cercanías de la sección 19 de la aeronave. Los prototipos de estos propulsores poseen dos series de palas contra-rotatorias, realizadas en carbono/epoxi, que podrían impactar contra el fuselaje (realizado también en carbono/epoxi). De hecho, una de las limitaciones más importantes que podrían impedir el uso de estas nuevas motorizaciones, es que los fabricantes deberían de demostrar que la aeronave puede seguir operativa en caso de que una de estas palas impactase contra el fuselaje.

Hasta la fecha, el análisis del impacto de alta velocidad de un laminado de material compuesto contra una placa del mismo material no ha sido analizado. No obstante, parece razonable realizar un análisis previo en el que se realice un ensayo de impacto de un fragmento contra una placa rígida para estudiar cómo se comporta y qué mecanismos de fallo aparecen. En este último caso sí que existe una publicación, realizada por los mismos autores de este trabajo [1].

Aunque el análisis del comportamiento de laminados cuando actúan como impactadores no ha sido apenas estudiado, existen un gran número de trabajos en los que se analiza el comportamiento de CFRPs frente a impacto de alta velocidad. Los primeros estudios datan de los 80 del siglo anterior; Cantwell publicó dos trabajos [2-3] señalando los principales mecanismos de absorción de energía que aparecían en estos materiales cuando eran impactados a alta velocidad. Posteriormente el número de trabajos ha crecido, pudiéndose encontrar estudios tanto experimentales como numéricos sobre esta temática [4-20].

En este trabajo se ha realizado un análisis del impacto de alta velocidad de fragmentos de material compuesto contra una placa rígida. Para ello se han llevado a cabo ensayos experimentales en un amplio rango de velocidades, con el fin de determinar la influencia de esta variable. Los ensayos han sido grabados con cámaras de alta velocidad para poder observar los mecanismos de fallo más importantes que aparecían durante el impacto.

2 Procedimiento experimental

Los ensayos de impacto de alta velocidad se realizaron en el Laboratorio de Impacto de la Universidad Carlos III de Madrid. El material usado para la fabricación de los especímenes fue cinta unidireccional con fibras de carbono AS4 y matriz 8552 producido por Hexcel Composites. El laminado se fabricó en autoclave usando los procedimientos estándar del sector aeronáutico; su espesor era de 4 mm y la secuencia de apilamiento la siguiente: (45/-45/90/0/90/-45/45/90/0/90/0)_s. A partir de los paneles fabricados, se obtuvieron fragmentos de 100 x 42 mm². Para lanzar los especímenes se ha empleado un lanzador neumático de 60 mm de calibre (figura 1), con una longitud total de 18 m. El dispositivo emplea aire comprimido a una presión de hasta 6 bares para acelerar los proyectiles. Los fragmentos se guían a través del tubo lanzador empleando un cartucho especialmente diseñado para la geometría del fragmento; las velocidades de impacto se variaron desde 70 hasta 190 m/s aproximadamente. La medida de la velocidad del impacto se realiza mediante una barrera laser colocada a la salida del cañón. Al salir de éste, el cartucho se separa del fragmento, y este último impacta sobre una placa rígida, en la cual no se observaron deformaciones plásticas. Para poder visualizar el proceso de impacto, se emplearon tres cámaras de alta velocidad; una de ellas se configuró para poder observar en detalle la parte trasera del fragmento y de esta manera realizar posteriormente un seguimiento de su posición en función del tiempo.



Figura 1. Dispositivo experimental empleado para acelerar los

fragmentos de carbono/epoxi.

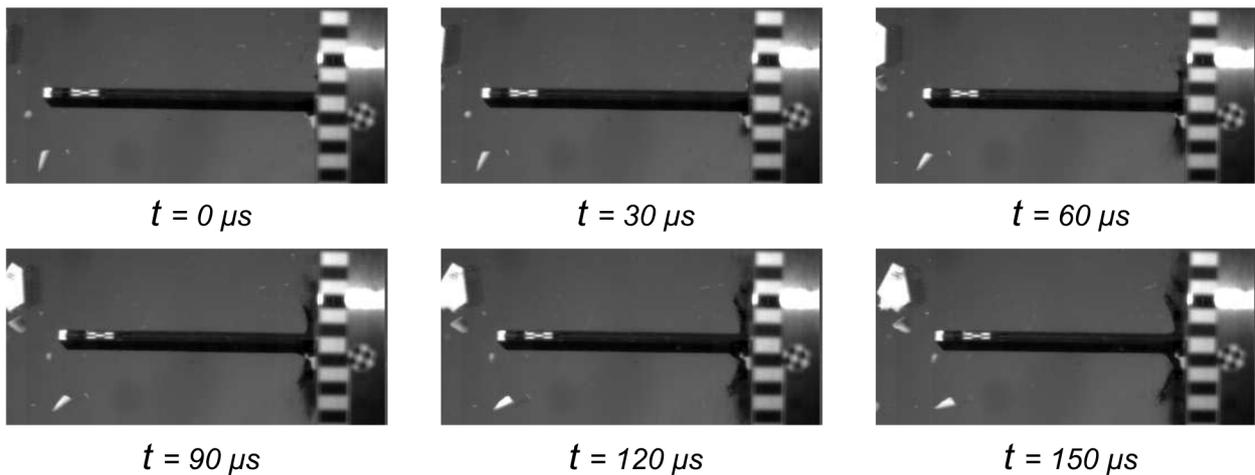


Figura 2. Secuencia de imágenes correspondientes a un impacto de un fragmento producido a una velocidad aproximada de 100 m/s

Después de la realización de los ensayos, las imágenes obtenidas de las cámaras de alta velocidad se emplearon para analizar el proceso de impacto, y de esta manera identificar los procesos de daño más relevantes a medida que el fragmento impacta contra la placa rígida. En la figura 2 se puede ver una secuencia de un impacto de un fragmento a una velocidad aproximada de 100 m/s. Se puede identificar un patrón en forma de damero colocado en la parte trasera del fragmento para realizar el seguimiento.

durante el impacto. Los fragmentos impactados presentaban prácticamente el mismo patrón de fallo. En todos ellos se podía identificar que se había producido un proceso de apertura de tal manera que el laminado se separaba en dos mitades por el plano medio. Además, se observaban deslaminaciones prácticamente a lo largo de todo el espesor del espécimen. En la figura 3 se puede identificar tanto la erosión producida, como las deslaminaciones en diferentes fragmentos impactados a velocidades crecientes (de izquierda a derecha); el primer fragmento mostrado es un ejemplar intacto que sirve de referencia para mostrar la importante erosión producida. La erosión implica la rotura de fibras a compresión (en las láminas orientadas a cero grados principalmente) y la rotura de la matriz a compresión (en el resto de láminas).

3 Resultados experimentales

Una vez realizados los ensayos, se procedió a realizar un análisis cualitativo de la morfología del daño producido

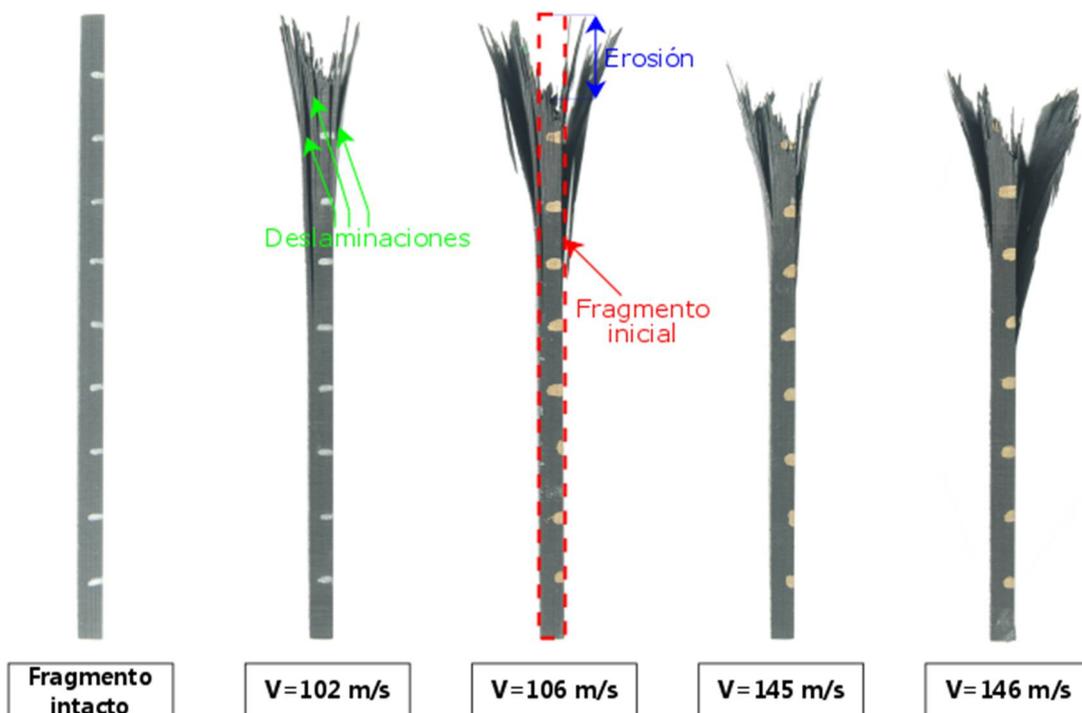


Figura 3. Imagen de diferentes fragmentos impactados, en los que se identifica la erosión producida y las deslaminaciones.



En cuanto al análisis cuantitativo del daño producido, la variable que se ha considerado más representativa ha sido la distancia erosionada. En la figura 3 ya se podía apreciar que, como parece lógico, ésta aumenta con la velocidad inicial del impacto (o la energía inicial del impacto). En la figura 4 se ha representado la distancia erosionada frente a la energía cinética de impacto, resultando una dependencia prácticamente lineal. Es importante destacar que la pérdida de masa del fragmento durante el impacto es muy importante, llegando a superar el 25% de su masa inicial.

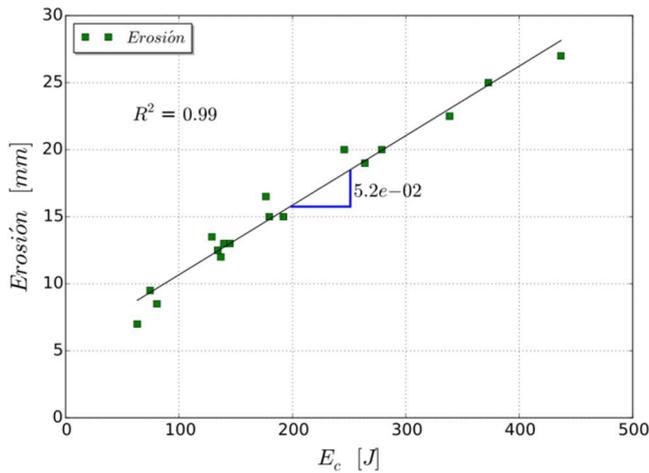


Figura 4. Longitud erosionada del fragmento frente a la energía cinética del impacto.

La otra variable que resulta importante en este tipo de impactos es la fuerza ejercida durante el impacto. Para poder realizar diseños de estructuras tolerantes a este tipo de impactos resulta de gran interés el conocer el registro de fuerza-tiempo a lo largo del impacto. Dado que existe una gran variación de la masa a lo largo del ensayo es necesario obtener la fuerza de contacto (F) a partir de la variación de momento lineal:

$$dt F = d(mv) = dm v + dv m \tag{1}$$

donde m es la masa del fragmento (que varía durante el impacto) y v es su velocidad. La variación de la masa durante el impacto no se conoce, pero se puede asumir una variación lineal proporcional al desplazamiento del fragmento desde la masa inicial (m_i) a la masa final (m_f), ambas conocidas. De esta manera la expresión para la masa del fragmento sería:

$$m(x) = m_i - \frac{m_i - m_f}{x_f} x(t) \tag{2}$$

donde x_f representa la erosión final del fragmento (dato conocido), y $x(t)$ es la posición del fragmento a lo largo del impacto. Sustituyendo esta expresión en la ecuación 1, se puede obtener la fuerza que se ejerce sobre el fragmento:

$$F(t) = a(t) \left(m_i - \frac{m_i - m_f}{x_f} x(t) \right) - \frac{m_i - m_f}{x_f} v^2(t) \tag{3}$$

donde $a(t)$ es la aceleración del fragmento. La posición del fragmento en función del tiempo se ha obtenido a través del seguimiento del fragmento realizado con una de las cámaras de alta velocidad. Para ello se ha utilizado el software Tracker. La velocidad y la aceleración se han obtenido derivando numéricamente una o dos veces con respecto al tiempo el desplazamiento del fragmento obtenido. Las curvas fuerza-

tiempo obtenidas mediante la ecuación 3 han sido filtradas con un filtro paso bajo de 15000 Hz.

La figura 5 muestra la fuerza que ejerce el fragmento para diferentes velocidades de impacto. Todas las curvas tienen un aspecto similar con un crecimiento muy rápido en los primeros instantes en el que se alcanza el máximo, y un posterior descenso mucho más progresivo hasta que la fuerza se anula. Según la velocidad de impacto aumenta, también lo hace la fuerza ejercida como era de esperar. La magnitud de la fuerza es considerable ya que se alcanzan valores de 30 kN para impactos cercanos a 180 m/s.

4 Modelo analítico

Para conocer el mecanismo de daño predominante en el impacto de fragmentos carbono/epoxi contra placa rígida, se plantea el siguiente balance energético:

$$E_{ci} = E_a + E_e + E_d \tag{4}$$

donde E_{ci} es la energía inicial del fragmento, E_a la energía absorbida por aplastamiento, E_e la energía absorbida por deformación elástica y finalmente E_d la energía absorbida por deslaminación. En la siguiente expresión se ha sustituido cada término por su expresión desarrollada:

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 = \sigma_a A_r y_a + \frac{1}{2} E_{eq} \epsilon_{eq}^2 w L h + G_{Ic} y_d w n \tag{5}$$

donde σ_a es la resistencia a compresión del laminado, A_r es el área frontal reducida (esta es menor que el área frontal debido al proceso de apertura anteriormente descrito), y_a es la distancia erosionada, E_{eq} es módulo de elasticidad equivalente del laminado, ϵ_{eq} es la deformación de fallo equivalente del laminado, w es el ancho del fragmento, L es la longitud del fragmento, h es el espesor del fragmento, G_{Ic} es la energía crítica de fractura interlaminar en modo I, y_d es la longitud media de la deslaminación y finalmente n es el número de láminas deslaminadas. Para poder realizar un análisis de la importancia de cada uno de los tres términos de absorción de energía indicados se va a proceder a comparar cada uno de ellos con la energía cinética inicial del laminado, empleando los valores que aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Valores característicos de las variables que intervienen en los diferentes mecanismos de absorción de energía.

Variable	Valor
σ_a	$\sim 10^8 Pa$
A_r	$\sim 10^{-4} m^2$
m_i	$\sim 10^{-2} kg$
v_i	$\sim 10^2 m/s$
y_a	$\sim 10^{-4} m^2$
E_{eq}	$\sim 10^{-4} m^2$
ϵ_{eq}	$\sim 10^{-4} m^2$
w	$\sim 10^{-4} m^2$
L	$\sim 10^{-4} m^2$
G_{Ic}	$\sim 10^{-4} m^2$
y_d	$\sim 10^{-4} m^2$
n	$\sim 10^{-4} m^2$
h	$\sim 10^{-4} m^2$



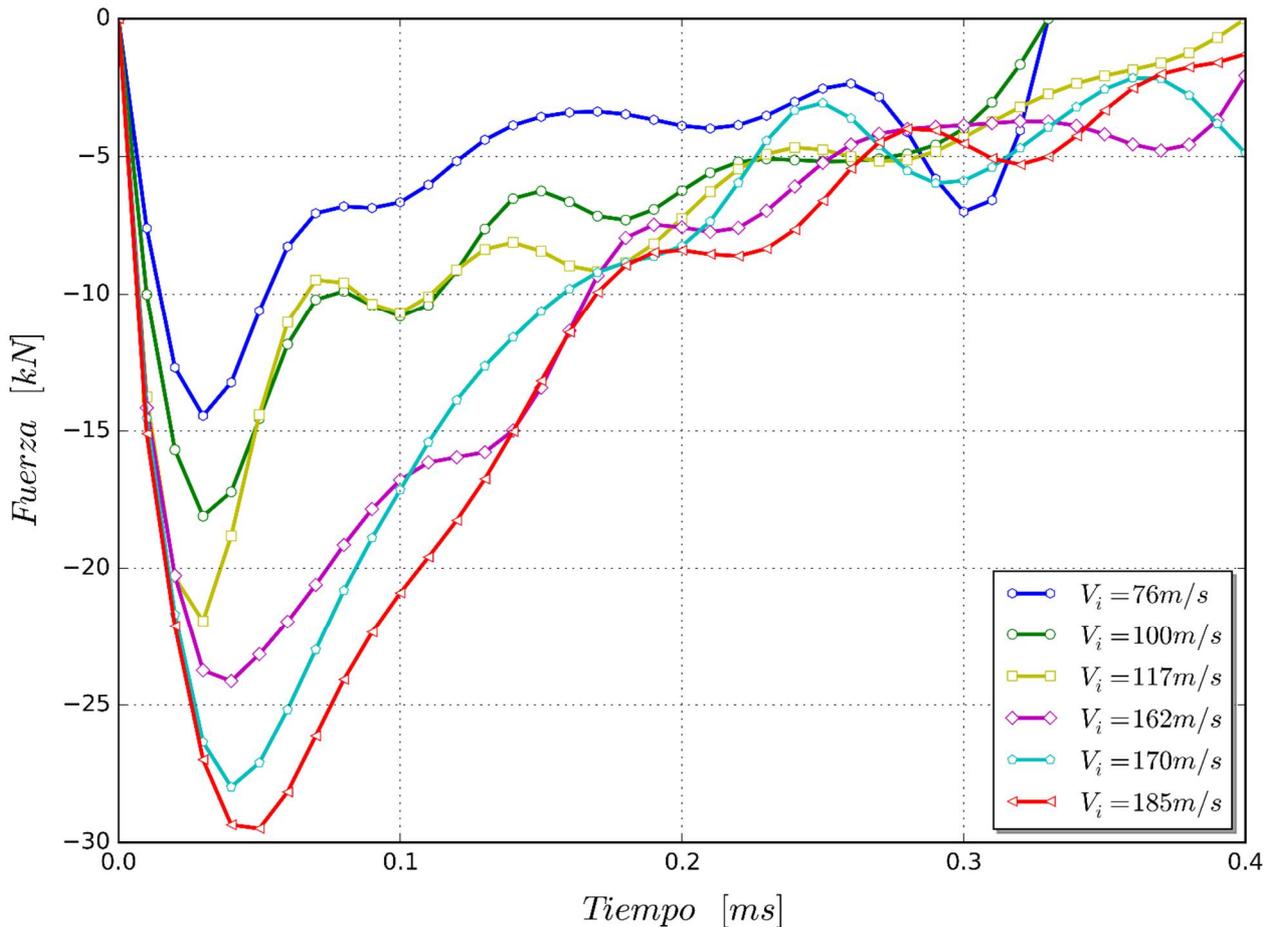


Figura 5. Imagen de diferentes fragmentos impactados, en los que se identifica la erosión producida y las deslaminaciones.

La ratio entre la energía absorbida por aplastamiento y la energía cinética del fragmento es de orden unidad ($E_a/E_{ci} \sim 1$), la energía consumida por deslaminación resulta ser mucho más pequeña que la energía cinética del fragmento ($E_d/E_{ci} \sim 10^{-3}$), y finalmente la energía absorbida por deformación elástica es también significativamente menor que la energía cinética del fragmento ($E_e/E_{ci} \sim 10^{-2}$). Con estos resultados se puede decir que el principal mecanismo de daño de absorción de energía es el aplastamiento.

A partir del resultado anterior y considerando que la energía absorbida por deslaminación y por energía elástica son despreciables, se puede establecer la siguiente ecuación en la que se igualan la energía cinética perdida por el fragmento a la energía absorbida por aplastamiento, cuando éste se desplaza un dx :

$$-\frac{1}{2}d(m(x)v^2(x)) = \sigma_a A_r dx \tag{6}$$

donde x representa el desplazamiento del fragmento y v su velocidad. Realizando el cambio de variable $h(x) = m(x) v^2(x)$, la ecuación es fácilmente integrable resultando:

$$h(x) = -2 \sigma_a A_r x + c_1 \tag{7}$$

La constante de integración c_1 se obtiene mediante la condición inicial $h(0) = m_i v_i^2$. Substituyendo y deshaciendo el cambio de variable se obtiene una expresión para la velocidad:

$$v(x) = \sqrt{\frac{m_i v_i^2}{m(x)} - \frac{2 \sigma_a A_r}{m(x)} x} \tag{8}$$

Para poder predecir la erosión del laminado, o lo que es lo mismo el desplazamiento final del fragmento, es necesario despejar el desplazamiento del fragmento x , imponiendo que su velocidad sea nula. De esta manera se puede obtener la siguiente expresión cerrada para la distancia erosionada:

$$x_f = \frac{m_i v_i^2}{2 \sigma_a A_r} \tag{9}$$

Analizando esta última expresión se puede ver que la distancia erosionada es proporcional a la energía del impacto e inversamente proporcional a la resistencia del laminado y a su área reducida. Esta expresión se puede reescribir como:

$$x_f = \frac{E_{ci}}{\sigma_a A_r} \tag{10}$$

De esta forma se explica que la distancia erosionada es proporcional a la energía cinética del impacto (tal y como se ha visto en la figura 4). La constante de proporcionalidad resulta ser $1/\sigma_a A_r$; teniendo en cuenta que $\sigma_a \sim 400 \text{ MPa}$, y que el área reducida es aproximadamente un cuarto del área frontal, se puede concluir que el contante de proporcionalidad es $1/\sigma_a A_r \sim 5 \cdot 10^{-5}$, valor muy similar al observado en la figura 4.



5 Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el impacto de alta velocidad de fragmentos de CFRP contra una placa rígida. Los ensayos experimentales se han realizado empleando un lanzador neumático; el evento se ha grabado mediante varias cámaras de alta velocidad lo que ha permitido determinar el desplazamiento del fragmento y posteriormente la fuerza ejercida durante el impacto. A partir de los resultados presentados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El fragmento de material compuesto tiende a fallar de la misma manera independientemente de la velocidad a la cual ocurre el impacto, provocándose una apertura por la mitad del plano del laminado.
- En cuanto a los mecanismos de fallo del laminado, se aprecian deslaminaciones a lo largo de todo el espesor del laminado y erosión principalmente en las láminas centrales.
- Se han identificado tres mecanismos principales de absorción de energía durante el impacto: la deslaminación, el aplastamiento y la deformación elástica. Mediante un análisis de cada uno de los tres términos se ha podido concluir que el aplastamiento es sensiblemente más importante (en cuanto a la absorción de energía) que los otros dos.
- Las curvas fuerza-tiempo obtenidas presentan un crecimiento muy rápido en los primeros instantes, alcanzando un máximo. Como era de esperar este máximo aumenta al aumentar la velocidad de impacto del fragmento.
- Se ha desarrollado un modelo analítico simple que ha permitido explicar la dependencia de la erosión con la energía cinética del impacto.

Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2013-41094R, así como del Vicerrectorado de Política Científica de la Universidad Carlos III de Madrid a través de los proyectos 2014/00006/002 y 2013/00413/002.

Referencias

- [1] A. Mata-Díaz, J. López-Puente, D. Varas, J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero, *International Journal of Impact Engineering*, **103**, pág. 231-240 (2017).
- [2] W. Cantwell, *Composite Structures*, **10**, pág. 247-265 (1988).
- [3] W. Cantwell, *Composites Science and Technology*, **38**, pág. 119-141 (1988).
- [4] J. López-Puente, R. Zaera, C. Navarro, *Composites Part B: Engineering*, **33**, pág. 559-566 (2002).
- [5] J. López-Puente, R. Zaera, C. Navarro, *Journal de Physique. IV*, **110**, pág. 639-644 (2003).
- [6] J. López-Puente, R. Zaera, C. Navarro, *International Journal of Solids and Structures*, **44**, pág. 2837-2851 (2007).

- [7] P.J. Hazell, G. Kister, C. Stennett, P. Bourque, G. Cooper, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **39**, pág. 866-874 (2008).
- [8] J. López-Puente, R. Zaera, C. Navarro, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **39**, pág. 374-387 (2008).
- [9] P.J. Hazell, C. Stennett, G. Cooper, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **40**, pág. 204-209 (2009).
- [10] P.J. Hazell, A. Cowie, G. Kister, C. Stennett, G.A. Cooper, *International Journal of Impact Engineering*, **36**, pág. 1136-1142 (2009).
- [11] D. Fernández-Fdz, J. López-Puente, R. Zaera *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **39**, pág. 989-996 (2008).
- [12] J. López-Puente, D. Varas, J.A. Loya, R. Zaera, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **40**, pág. 1223-1230 (2009).
- [13] D. Varas, R. Zaera, J. López-Puente, *Composite Structures* **93**, pág. 2598-2609 (2011).
- [14] J. López-Puente, S. Li, *International Journal of Impact Engineering*, **48**, pág. 54-64 (2012).
- [15] D. Varas, J.A. Artero-Guerrero, J. Pernas-Sánchez, J. López-Puente, *Composite Structures*, **95**, pág. 623-629 (2013).
- [16] J.A. Artero-Guerrero, J. Pernas-Sánchez, D. Varas, J. López-Puente, *Composite Structures*, **96**, pág. 286-297 (2013).
- [17] J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero, J. Zahr Viñuela, D. Varas, J. López-Puente, *Composite Structures*, **107**, pág. 629-634 (2014).
- [18] J.A. Artero-Guerrero, J. Pernas-Sánchez, J. López-Puente, D. Varas, *Composite Structures*, **107**, pág. 570-577 (2014).
- [19] J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero, D. Varas, J. López-Puente, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **60**, pág. 24-31 (2014).
- [20] J.A. Artero-Guerrero, J. Pernas-Sánchez, J. López-Puente, D. Varas, *Composite Structures* **133**, pág. 774-781 (2015).

