

ESTUDIO ANALÍTICO DEL FENÓMENO DE IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD SOBRE LAMINADOS DE TEJIDOS EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA DE LA AUTOMOCIÓN

ANALYTICAL STUDY OF THE IMPACT PHENOMENON OF HIGH-VELOCITY ON WOVEN LAMINATES USED BY THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

¹Shirley García Castillo, ²Inés Iváñez, ³Sonia Sánchez Sáez, ⁴Enrique Barbero, ⁵Carlos Navarro

¹Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Universidad Carlos III de Madrid. Av de la Universidad, N° 30. 28911-Leganés-España
e – mail: ¹sgcastil@ing.uc3m.es

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 4 (09)

Resumen

El desarrollo de este trabajo de investigación está motivado por la alta aplicabilidad de los laminados de material compuesto en estructuras de diversos medios de transporte y la industria química, ya que poseen una alta resistencia y rigidez específica. Muchos componentes estructurales de las aeronaves, así como de los vehículos de automoción están fabricados con laminados reforzados con fibras en matriz polimérica. Con el objetivo de evaluar el comportamiento frente a impacto de diferentes laminados con refuerzos de fibra de vidrio o carbono, así como la influencia de las relaciones entre el laminado y el proyectil, en este trabajo se ha desarrollado y validado un modelo analítico. Las diferencias para el límite balístico y la velocidad residual entre los valores determinados a partir de los ensayos experimentales y los estimados con el modelo analítico son inferiores al 10% y el límite balístico se incrementa con la relación geométrica y con la relación de densidades.

Palabras Clave: Balístico, espesor, FRP refuerzo, modelización.

Abstract

The development of this research work is motivated by the high applicability of the laminates of composite materials for the manufacturing of different transport means and the chemistry industry. Many structural components of the aircrafts and cars are made with laminates reinforcement with fibres in polymer matrix. With the goal, to evaluate the behaviour of laminates reinforced glass or carbon fibres, as well the influence of the geometric and density ratio, between the laminate and projectile. In this work, it was development and validated an analytical model. The difference for the ballistic limit and residual velocity between the experimental and analytical results are less to 10%. The ballistic limit increases with the geometric and density ratios.

Keywords: Ballistic, FRP reinforcement, modelling, thickness

1. Introducción

El fenómeno impacto de alta de velocidad sobre estructuras fabricadas en laminados de material compuesto está controlado por las propiedades mecánicas del laminado y el proyectil, así como las condiciones de impacto, como son: la geometría del proyectil, espesor de la placa, ángulo de impacto, configuración del laminado [1].

El daño producido en un laminado de material compuesto sometido a un impacto del alta velocidad es un fenómeno complejo, debido a los diversos parámetros que actúan [2].

Los mecanismos de fallo que contribuyen a la absorción de la energía cinética del proyectil mecanismos son: el fallo de fibras, la deslaminación, la rotura de matriz y el fallo por cortadura. Adicionalmente, la deformación elástica de laminado, así como el movimiento del laminado, contribuyen a la absorción de la energía cinética del proyectil, aunque no contribuyan al fallo del laminado [1].

El límite balístico es la velocidad por debajo de la cual un proyectil específico no perfora la estructura que es impactada. Comúnmente, el límite balístico [3] es expresado en término de probabilidad como V50, lo que indica que existe un 50% de probabilidad de perforación y para su determinación se recurre a técnicas estadísticas.

La velocidad residual es la velocidad con la cual el proyectil atraviesa la probeta y sale de ésta. Desde el punto de vista experimental se ha demostrado que la velocidad residual se incrementa a medida que se aumenta la de impacto. Además, a partir de la velocidad residual se puede determinar la energía absorbida.

La energía de perforación es la energía mínima necesaria para perforar una estructura cuando los impactos se realizan a altas velocidades de impacto. Experimentalmente, se puede calcular a partir de la velocidad de impacto más baja con la cual se consigue atravesar las placas de material compuesto. Esta velocidad depende ligeramente de la forma del proyectil, y en mayor medida, del espesor del laminado en estudio [4].

De forma general, el estudio del fenómeno de impacto de alta velocidad mediante técnicas experimentales requiere un gran consumo de tiempo

y recursos materiales, lo que se traduce en un elevado coste, porque se deben considerar numerosas variables como pueden ser, los materiales que constituyen el laminado, las condiciones de ensayo (aspectos medioambientales, condiciones de operación, etc) y [5] de la geometría y densidad del impactador, entre otras.

La metodología experimental es compleja y eficaz ya que reproduce el evento en condiciones similares a las que hay en la realidad. Existe numerosa bibliografía que usan ensayos experimentales para predecir el límite balístico de laminados de material compuesto [6-8]. El problema que surge con este tipo de métodos es la dificultad de reproducir las condiciones necesarias y sobre todo el coste económico que conlleva realizar este tipo de experimentos, haciendo necesario otras alternativas de estudio.

Los métodos numéricos están basados en la resolución de problemas mediante herramientas informáticas que tienen una potente matemática detrás. Dichos métodos permiten simular procesos a través de algoritmos matemáticos con el objetivo de proporcionar una respuesta que se ajuste bastante a la realidad. La principal ventaja de estos métodos es que son capaces de proporcionar una buena aproximación del comportamiento real sin demasiado coste económico aunque si es cierto que la inversión inicial puede ser elevada. Dependiendo del tipo y de la complejidad de la simulación el coste computacional varía, el tiempo de resolución puede ser corto pero también existen problemas que tardar semanas en finalizar. Otra de sus ventajas es que pueden resolver procesos matemáticos que no tienen solución analítica. Actualmente existe un desarrollo creciente de modelos numéricos para el análisis de los problemas de impacto de alta velocidad sobre laminados de material compuesto. Existen numerosos programas basados en métodos numéricos como Abaqus o Ansys que están basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF o FEM, en inglés). Dichos programas permiten realizar simulaciones mediante modelos en los que son necesarios introducir parámetros y propiedades (geometría, propiedades del material, propiedades de contacto, etc), en muchos casos de difícil determinación. Los estudios que se han realizado utilizando este tipo de métodos son muy numerosos como los de López-Puente et. al. [6] para impactos de alta velocidad en fibra de carbono y los de Iváñez et. al. [9] para estructuras sándwich con pieles de fibra de vidrio y núcleo de espuma. Actualmente existe un desarrollo creciente de modelos numéricos

para el análisis de los problemas de impacto de alta velocidad sobre laminados de material compuesto, debido a que estos proporcionan resultados muy detallados del fenómeno.

Otra alternativa de estudio son los métodos analíticos que se basan en la formulación matemática del problema a través de su descomposición en partes diferenciadas con el fin de entender el proceso y plantear la solución analítica de este.

La principal ventaja de la utilización de este método es el ahorro de tiempo y de dinero en comparación con los métodos experimentales y resultan muy útiles como una primera aproximación al diseño de componentes estructurales, porque permiten disminuir el número de ensayos experimentales a realizar y facilitar el desarrollo posterior de modelos numéricos.

En cuanto al fenómeno de impacto sobre materiales compuestos, existen principalmente dos maneras de abordar el problema analíticamente: por conservación de momento o por métodos energéticos.

Cuando se produce el impacto de un proyectil en un laminado de material compuesto la energía cinética de dicho proyectil es absorbida por diferentes mecanismos de absorción de energía. La filosofía de estos métodos consiste en definir todos los mecanismos de energía que actúan durante el evento y aplicar un balance energético entre el instante inicial y un instante genérico. Una vez realizado este paso, el problema puede resolverse de forma discreta, utilizando métodos explícitos o de forma continua, considerando todos los procesos y resolviendo la ecuación diferencial resultante. Dentro de estos últimos lo más habitual es que la variable de integración sea el tiempo, no obstante, algunos autores como [8] han preferido utilizar una variable de integración espacial.

Los modelos analíticos basados en la conservación de la energía, que consideran que la energía cinética o parte de ella es absorbida por el laminado durante el fenómeno de impacto, debido a: la deformación elástica de la placa de laminado material compuesto, el fallo del laminado, que incluye diversos mecanismos, la fricción y el calentamiento del laminado, así como la aceleración del mismo. Entre estos modelos se pueden nombrar los desarrollados por [2, 6, 8].

De forma general, todos los modelos indicados previamente son modelos específicos que son válidos para determinados constituyentes, espesores de

laminado, tamaño del proyectil y no han evaluado la influencia de variables geométricas, de resistencia y densidades entre el laminado y el proyectil. Por ello, en este trabajo de investigación se ha desarrollado un modelo analítico general, que permitirá evaluar el comportamiento frente a impacto de diferentes laminados, así como la influencia de las relaciones entre el laminado y el proyectil.

2. Descripción del modelo analítico

El modelo desarrollado en este trabajo de investigación ha sido desarrollado para cualquier laminado de tejido en resina polimérica, de espesor delgado.

Está basado en las leyes de conservación de energía y considera tres mecanismos de absorción de energía: la deformación elástica de fibras, la aceleración del laminado y el daño producido en el laminado. Este último mecanismo incluye el fallo de fibras, la formación del tapón de cortadura (laminado de fibra de carbono), así como el daño por deslaminación y rotura de matriz. Ha sido planteado en una formulación diferencial, cuya variable de integración es la velocidad en cada instante de tiempo y que puede ser resuelto mediante cualquier método numérico.

Para el planteamiento de la formulación del modelo analítico se han considerado las siguientes hipótesis:

- El proyectil es perfectamente rígido y se mantiene indeformable durante el fenómeno de impacto.
- El laminado de tejido se considera homogéneo y cuasi-isótropo en el plano.
- El ancho de la mecha del laminado es menor o igual al diámetro del proyectil.
- Las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales son constante a lo largo del espesor del laminado.
- La energía absorbida por fallo en tensión de las fibras y la deformación elástica de las fibras son tratadas de forma independiente.
- La energía absorbida por fricción entre el laminado y el proyectil, así como la absorbida por calentamiento del laminado se consideran despreciables, porque el laminado es delgado.

El modelo requiere del conocimiento de la ecuación constitutiva, la tenacidad de fractura en modo II, la densidad y el espesor del laminado, así como los parámetros del proyectil como la masa y el diámetro.

El modelo establece la conservación de la energía entre el instante inicial en el que toda la energía está asociada a la energía cinética del proyectil y un instante genérico en el que parte de la energía del proyectil ha sido absorbida por el laminado. Una explicación detallada de los mecanismos de absorción de energía y del modelo analítico se puede encontrar en el capítulo de libro desarrollado por García-Castillo et. al. [2].

La formulación del modelo se ha llevado a cabo mediante métodos energéticos, haciendo uso de los mecanismos de absorción de energía definidos por García-Castillo et. al. [1].

Entre el instante inicial t_0 y uno genérico t se cumple el siguiente balance energético.

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot v(t)^2 + E_{AB}(t) \quad (1)$$

Donde: E_0 es la energía de impacto, m_p es la masa del proyectil y E_{AB} es energía absorbida por los diferentes mecanismos de absorción de energía desde t_0 hasta t .

$$E_{AB} = E_{KC} + E_{TF} + E_{ED} + E_{DL} + E_{MC} + E_{SP} \quad (2)$$

Donde: E_{KC} es la energía absorbida por aceleración del laminado, E_{TF} es la energía absorbida por fallo de fibras, E_{ED} es la energía absorbida por deformación elástica del laminado, E_{DL} es la energía absorbida por deslaminación, E_{MC} es la energía absorbida por rotura de la matriz, E_{SP} es la energía absorbida debida a la formación del tapón de cortadura, en el caso de los laminados de fibra de carbono.

3. Validación del modelo analítico

Para la validación del modelo analítico se emplearon dos laminados de tejido equilibrado, uno de fibra de vidrio E en resina poliéster de 3 y 6 mm de espesor y otro de fibra de carbono AS4 en resina epoxi 8552 de 2 mm de espesor. Las propiedades y variables necesarias para la aplicación del modelo analítico desarrollado en este trabajo se encuentran recogidas en [1, 8, 10].

La validación del modelo analítico se ha realizado con respecto a la velocidad residual y el límite balístico, tal como se observa en las Figuras 1, 2 y 3 en la cuales se muestra la velocidad residual del proyectil en función de su velocidad de impacto para los ensayos experimentales y el modelo analítico.

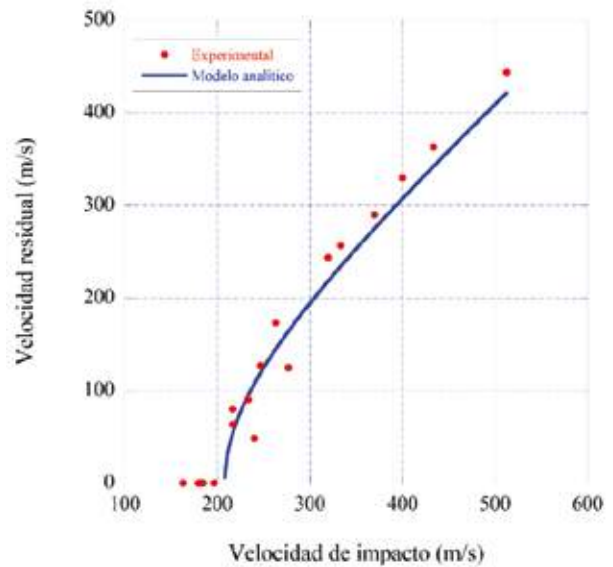


Figura 1. Velocidad residual frente a la velocidad de impacto para un tejido de fibra de vidrio/poliéster de 3 mm de espesor.

En todos los laminados estudiados la máxima diferencia entre los resultados del modelo analítico y los experimentales, para una misma velocidad de impacto, no supera el 10%, lo que indica que el modelo velocidad residual del proyectil al atravesar la placa de material compuesto. Se puede afirmar que, para estudiar el fenómeno de impacto transversal a alta velocidad sobre laminados de tejido, los mecanismos de daño seleccionados para el desarrollo del modelo son los más relevantes y que las hipótesis realizadas son apropiadas.

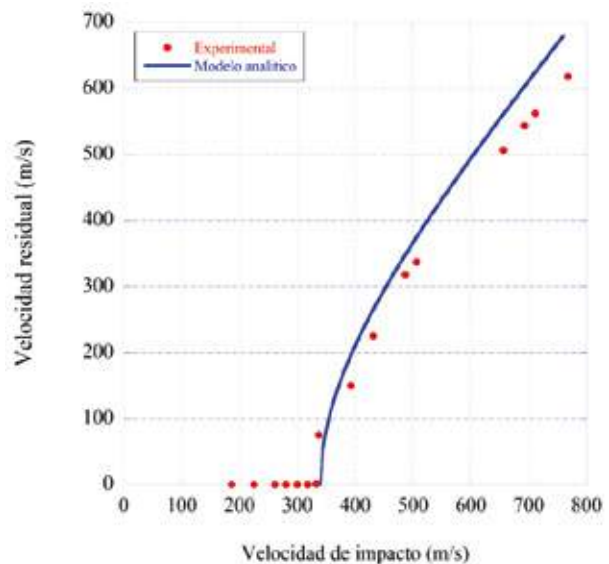


Figura 2. Velocidad residual frente a la velocidad de impacto para un tejido de fibra de vidrio/poliéster de 6 mm de espesor.

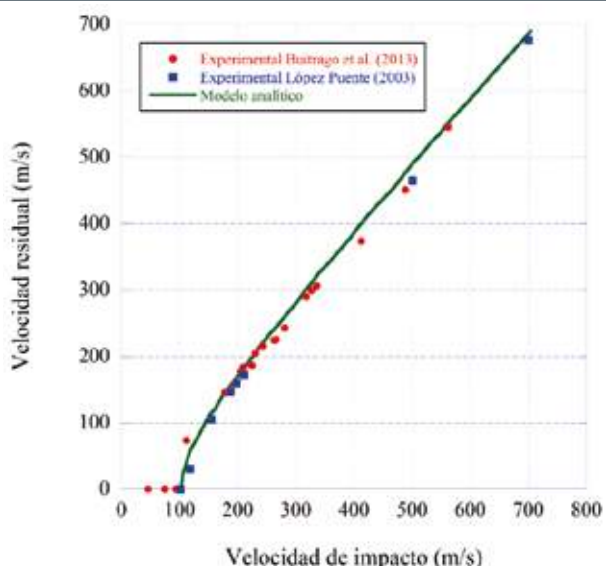


Figura 3. Velocidad residual frente a la velocidad de impacto para un tejido de fibra de carbono/epoxi de 2 mm de espesor

Los errores en la estimación de la velocidad residual que proporciona el modelo, en relación a los resultados experimentales disminuyen, en las inmediaciones del límite balístico, lo que es muy importante desde el punto de vista del ingeniero de diseño, pues le permite predecir la energía crítica que produce la perforación del laminado.

Los resultados de límite balístico obtenidos a partir del modelo analítico, que se corresponde a la velocidad de impacto a la cual la velocidad del proyectil en un instante de tiempo es igual a cero y su desplazamiento es igual al espesor del laminado. De la Tabla 2 se deduce que el error existente entre el límite balístico experimental y el que proporciona modelo analítico para cada uno de los laminados estudiados no alcanza un 9 %, lo que confirma la fiabilidad del modelo analítico propuesto.

Tabla 1. Límite balístico obtenido a partir del ajuste de los datos experimentales y del modelo analítico.

Laminado	Espesor (mm)	Límite balístico (m/s)	
		Modelo analítico	Experimental
Fibra de vidrio/poliéster	3	208	211,0
	6	352	332,0
Fibra de carbono/epoxi	2	109	100,0 (López Puente 2003)
			100,2 (Puatigo et al. 2013)

4. Estimación del límite balístico

La variación del límite balístico con respecto a la relación geométrica (cociente del espesor laminado entre el radio del proyectil) para un laminado de

tejido de fibra de vidrio se observa en la Figura 4, donde se muestra que un aumento del límite balístico con el incremento de esta relación, ajustándose la relación entre ambas variable a una línea recta. Por lo tanto, un incremento en la relación geométrica y por consiguiente en el espesor del laminado o la disminución del radio del proyectil da lugar al incremento del límite balístico.

La influencia de la relación de densidades (cociente de la densidad del laminado entre la del proyectil) para un laminado de tejido de fibra de vidrio sobre el límite balístico se observa que este se incrementa con una ley potencial cuando se aumenta la relación de densidades, es decir cuando se incrementa la densidad del laminado o disminuye la del proyectil, tal como se observa la en la Figura.5.

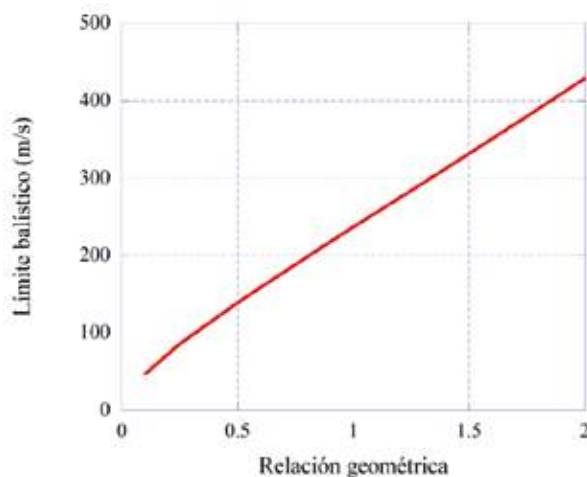


Figura 4. Relación del límite balístico con respecto a la relación geométrica para un laminado de tejido de fibra de vidrio E/poliéster.

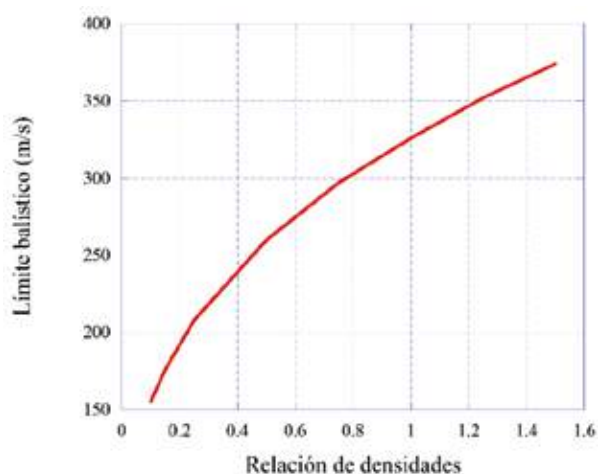


Figura 5. Relación del límite balístico con respecto a la relación geométrica para un laminado de tejido de fibra de vidrio E/poliéster

5. Conclusiones

En este trabajo de investigación se ha presentado un modelo analítico que permite evaluar el comportamiento frente a impacto transversal de dos espesores y un laminado de fibra de carbono. A partir de este modelo se ha realizado un estudio de las principales relaciones adimensionales que influyen en el límite balístico frente a impacto de laminados de tejido de fibra de vidrio, obteniéndose las conclusiones que se detallan a continuación:

- El modelo analítico propuesto permite predecir con suficiente precisión el comportamiento frente a impacto transversal de laminados de tejido equilibrado en matriz polimérica, independientemente del material de refuerzo.
- La validación del modelo analítico propuesto se ha realizado con respecto al límite balístico y la velocidad residual, observándose mínimas diferencias entre los valores experimentales y los estimados a partir del modelo.
- Las diferencias para el límite balístico entre los valores determinados a partir de los ensayos experimentales y los estimados con el modelo analítico son inferiores al 10%.
- El límite balístico se incrementa linealmente con la relación geométrica, mientras que con la relación de densidades lo hace con una ley potencial, para laminados delgados de fibra de vidrio.

6. Referencias

- [1] García-Castillo, S. K., Sánchez-Sáez, S., Santiuste, C., Navarro, C., & Barbero, E. (2013). Perforation of composite laminate subjected to dynamic loads. In *Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures* (pp. 291-337). Springer, Dordrecht.
- [2] Naik, N. K., & Shrirao, P. (2004). Composite structures under ballistic impact. *Composite structures*, 66(1-4), 579-590.
- [3] Zukas, J. A., & Scheffler, D. R. (2001). Impact effects in multilayered plates. *International Journal of Solids and Structures*, 38(19), 3321-3328.
- [4] Ulven, C., Vaidya, U. K., & Hosur, M. V. (2003). Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite

panels. *Composite structures*, 61(1-2), 143-150.

- [5] Moure, M. M., García-Castillo, S. K., Sánchez-Sáez, S., Barbero, E., & Barbero, E. J. (2018). Matrix cracking evolution in open-hole laminates subjected to thermo-mechanical loads. *Composite Structures*, 183, 510-520.
- [6] Morye, S. S., Hine, P. J., Duckett, R. A., Carr, D. J., & Ward, I. M. (2000). Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composites science and technology*, 60(14), 2631-2642.
- [7] Gellert, E. P., Cimpoeru, S. J., & Woodward, R. L. (2000). A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites. *International Journal of Impact Engineering*, 24(5), 445-456.
- [8] López-Puente, J., Zaera, R., & Navarro, C. (2007). An analytical model for high velocity impacts on thin CFRPs woven laminated plates. *International Journal of solids and structures*, 44(9), 2837-2851.
- [9] Iváñez, I., Santiuste, C., Barbero, E., & Sanchez-Saez, S. (2011). Numerical modelling of foam-cored sandwich plates under high-velocity impact. *Composite structures*, 93(9), 2392-2399.
- [10] Buitrago, B. L., García-Castillo, S. K., & Barbero, E. (2013). Influence of shear plugging in the energy absorbed by thin carbon-fibre laminates subjected to high-velocity impacts. *Composites Part B: Engineering*, 49, 86-92.

7. Biografía



¹Dra. Shirley K. García-Castillo, Profesora Titular de Universidad Carlos III de Madrid.



²Dra. Inés Iváñez, Profesora Titular de Universidad Carlos III de Madrid



³Dra. Sonia Sánchez-Sáez,
Catedrática de Universidad Carlos III
de Madrid.



⁴Dr. Enrique Barbero, Catedrático de
Universidad Carlos III de Madrid.



⁵Dr. Carlos Navarro, Catedrático de
Universidad Carlos III de Madrid.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	07 septiembre 2021
Fecha aceptación	26 octubre 2021