

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL HÍBRIDO CON ESTRUCTURA JERARQUIZADA PARA PROTECCIÓN DE IMPACTOS

C. Alía¹, J.C. Suárez¹, P. Pinilla¹, A. Rodríguez¹, A. Sevilla¹

¹Centro de Investigación en Materiales Estructurales (CIME), Universidad Politécnica de Madrid, 28040, Madrid, España, cristina.alia@upm.es

Resumen: Las embarcaciones de alta velocidad navegan e impactan de manera repetitiva contra el agua del mar sufriendo un tipo de efecto que se conoce como *slamming*, que tiene lugar cuando la proa de la embarcación se eleva por encima de la superficie del agua. Este efecto daña la superficie del casco por ese cambio brusco de aceleración y esos pulsos muy cortos de presión. Para poder paliar este daño, sin aumentar el peso de las embarcaciones, se plantea utilizar materiales con estructuras novedosas, como las auxéticas, que presentan propiedades excepcionales frente a este tipo de situaciones. Por esto, este trabajo plantea la fabricación de un modelo de capa disipadora de impactos que se va a someter a ensayos de caída libre de peso bajo diferentes condiciones. Los resultados han demostrado que el uso de la capa disipadora de impactos reduce el daño en todos los casos estudiados.

Palabras clave: Auxético, *slamming*, disipación de impactos, material híbrido, FDM, ensayos de caída libre

1. INTRODUCCIÓN.

Los desarrollos actuales de nuevos materiales para las diferentes ramas de la industria se centran en una mejora de sus prestaciones y una adaptación cada vez más específica a su aplicación concreta. No es de extrañar, que en la industria actual sean de especial interés, por sus numerosas aplicaciones, aquellos materiales diseñados para la disipación de impactos y que a la vez sean ligeros. En este sentido, dentro de las distintas estructuras que pueden influir en la capacidad de absorción de impacto de los materiales, en los últimos años ha aumentado el interés en los materiales auténticos, no solo por su comportamiento favorable frente a impactos sino también por su elevada resistencia a la fatiga bajo determinadas condiciones [1,2].

Un material auxético es aquel que tiene un coeficiente de Poisson negativo [3]. En este sentido, el interés que ha suscitado esta categoría de materiales como absorbedores de impactos radica en la naturaleza de su respuesta mecánica ante fuerzas de baja velocidad [4,5]. Además, se ha comprobado que, al formar parte de laminados, los materiales auxéticos presentan una mayor robustez y, especialmente, mayor durabilidad que las geometrías con coeficiente de Poisson positivo frente a impactos y son capaces de permanecer intactos frente a un mayor número de ciclos. También se ha comprobado que al crear materiales compuestos con inclusiones auténticas pueden conseguirse materiales que muestran globalmente comportamientos auxéticos, mientras se mejora el módulo de Young en ciertas direcciones [6]. Por todo esto, este tipo de materiales se plantean como una solución al problema de *slamming* que se da en las embarcaciones de alta velocidad que navegan e impactan de manera repetitiva contra el agua de mar y que se caracteriza por ese cambio brusco de la aceleración, donde hay pulsos muy cortos de presión (milisegundos) y el área afectada es muy pequeña comprometiendo el material de las naves [7-9].

El casco de este tipo de embarcaciones se fabrica, normalmente, de fibra de vidrio y resina poliéster y hay mucha bibliografía en relación al daño que sufre el material bajo este efecto de *slamming*.

Por eso, en este trabajo, se desarrolla un modelo de capa disipadora de impactos que se introduce en los laminados para disipar la energía de impacto [10] y, para simular las condiciones reales de servicio de la embarcación, se van a realizar ensayos de caída libre de peso bajo diferentes condiciones. Mediante la evaluación del daño inducido se ha podido caracterizar el comportamiento de la capa disipadora de impactos y determinar los mecanismos de protección frente al impacto y el rango de utilidad de esta.

2. PARTE EXPERIMENTAL.

2.1. Diseño capa disipadora.

Para el desarrollo de la capa disipadora se han tenido en cuenta diferentes requisitos técnicos y de diseño como, por ejemplo, la estructura debe ser capaz de resistir un número elevado de ciclos de impacto a baja velocidad, debe tener un peso y un espesor reducido para poder formar parte de materiales laminados. Además, su geometría debe ser compatible con las restricciones de la técnica FDM.

El modelo desarrollado ha ido evolucionando en el tiempo. En la Figura 1 se puede observar la primera aproximación (Tipo A) formada por poliuretano termoplástico (TPU) como material elástico y poliláctico (PLA) como material rígido. Estos materiales están colocados estratégicamente para que el material elástico confine al material rígido. De tal forma que, al sufrir un impacto, la forma de número Pi que es la rígida, se abre (se deforma longitudinalmente) absorbiendo el impacto y la zona elástica (TPU) hace de contenedor de energía.

Con esa estructura con forma de número Pi se consigue un material auxético que consigue, principalmente, incrementar la rigidez a flexión del conjunto. Sin embargo, esta capa tiene un espesor muy elevado que es conveniente reducir ya que se va a introducir junto al mandando que constituye el casco de la embarcación.

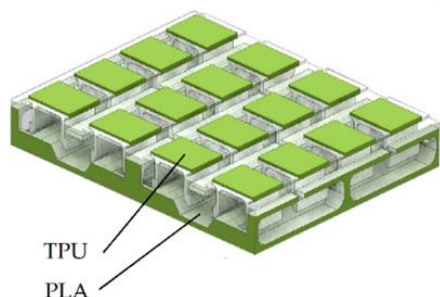


Figura 1. Modelo Tipo A de capa disipadora.

Por eso, se evoluciona a un segundo modelo (Tipo B) que se muestra en la Figura 2. En esta configuración se reduce el espesor, se cambia el PLA por Nylon que tiene mejores propiedades mecánicas y se modifica la estructura con forma de número Pi suavizando los ángulos. De esta forma se consigue optimizar la estructura por lo que es el modelo que se va a ensayar en este trabajo.



Figura 2. Modelo Tipo B de capa disipadora.

2.2. Fabricación.

Para el laminado se han empleado 6 capas de fibra de vidrio tipo C de 30 g/m² y resina poliéster Crystic U904LVK30. Las orientaciones han sido 0°/90° y +45°/-45°. El laminado se ha fabricado mediante infusión de resina a vacío.

Para la capa disipadora Tipo B se va a emplear impresión FDM 3D (modelado por deposición fundida).

Para colocar la capa en el laminado se va a emplear un velo de poliamida que no aporta propiedades mecánicas a la estructura. Solamente sirve para mantener la capa en su posición. En total se realizaron 10 laminados de 10 x 10 cm²: 3 sin capa disipadora para tenerlos de referencia y 7 con capa disipadora.

2.3. Ensayos realizados.

Los ensayos realizados han sido mediante impacto por caída de peso con diferentes pesos y repeticiones usando

la norma ASTM D2444 y la ISO 3127. En la Figura 3 se observa cómo impacta el impactador en una probeta.

El impactador está instrumentado con acelerómetros cuyo registro permite conocer, después del ensayo, la energía disipada durante los impactos. El proceso de impacto es cuestión de milisegundos por lo que se trabaja con sistemas de adquisición de datos por encima de los 20 kHz (20.000 datos por segundo). Para evaluar los daños se empleó inspección por ultrasonidos por inmersión que permite hacer una evaluación y comparación del daño sufrido.

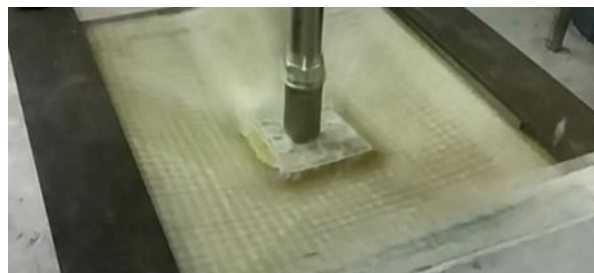


Figura 3. Impacto del importador en un laminado con capa disipadora.

3. RESULTADOS.

La información se obtiene directamente del ensayo en lecturas de aceleración frente al tiempo que se pueden representar para distintas energías de impacto (35, 60, 70, 90 y 100 J). A partir de estas curvas se puede representar la fuerza frente al desplazamiento. En la Figura 4 se representan las curvas para las energías de impacto de 35 y 100 J.

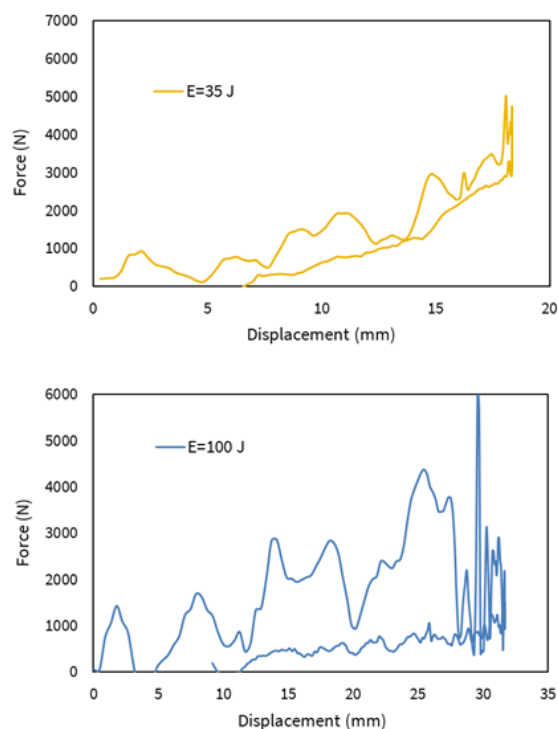
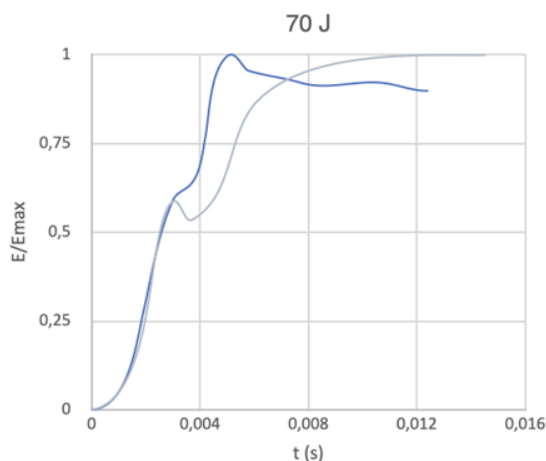


Figura 4. Curvas fuerza vs desplazamiento para energías de impacto de 35 y 100 J, respectivamente.

Se observa que hay una curva de subida que es la parte del impacto desde el momento inicial de contacto hasta el máximo desplazamiento alcanzado, que coincide con el punto más elevado de la curva. Posteriormente, hay una curva de bajada que está relacionada con el rebote del impactador y la devolución de la energía elástica almacenada en el material. El área comprendida entre ambas curvas es la energía disipada que se ha transformado en daño en el material.

Estas energías disipadas se pueden representar frente al tiempo. En la Figura 5 se representa un ejemplo a 70 J con y sin capa disipadora.



— Sin capa
— Con capa

Figura 5. Energía disipada frente al tiempo.

Una vez realizado el ensayo se realiza una primera inspección visual del daño causado por el impactador, tanto por el lado del impacto (vista frontal), como por la parte posterior a diferentes niveles de energía (Figura 6).

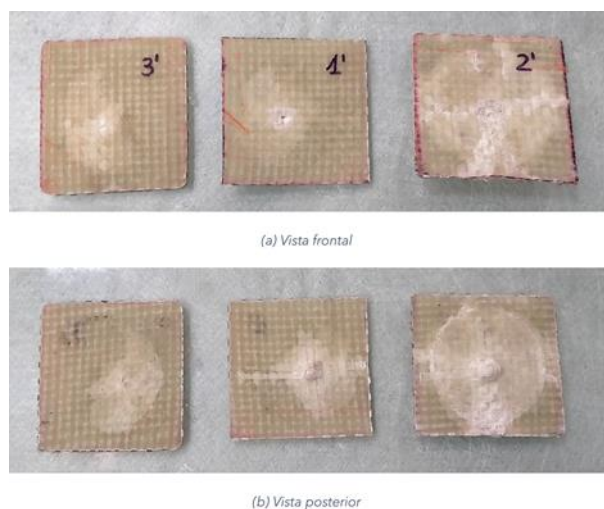


Figura 6. Inspección visual del daño por ambas vistas.

Sin embargo, la inspección visual no es suficiente sino que hay que cuantificar el daño y, para ello, se realizan ultrasonidos que permiten obtener un mapa de atenuación ultrasónica que cuantifica la extensión del daño.

Se representan, para distintas energías de impacto, el resultado antes y después del impacto.

4.- DISCUSIÓN.

A partir de la información proporcionada por los ensayos de ultrasonidos se puede medir el área dañada y obtener unas curvas de área dañada en función de la energía de impacto. Se observa cómo la curva con paneles protegidos está muy por debajo de los que no tienen protección. lo cual significa que la capa está protegiendo de manera efectiva el panel. En la Figura 7 se representa el porcentaje de área dañada frente a la energía de impacto.

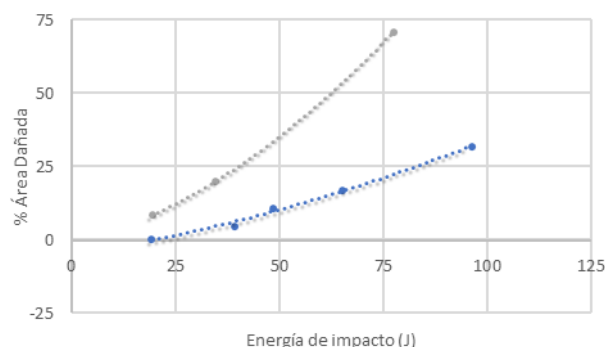


Figura 7. Porcentaje del área dañada frente a la energía de impacto

También se pueden obtener las curvas de energía absorbida por el material durante el impacto y cuál es la energía devuelta. Con esta información se pueden construir las curvas que indican la energía devuelta por el material en función de la energía de impacto recibida, con capa disipadora (Figura 8) y sin capa disipadora (Figura 9).

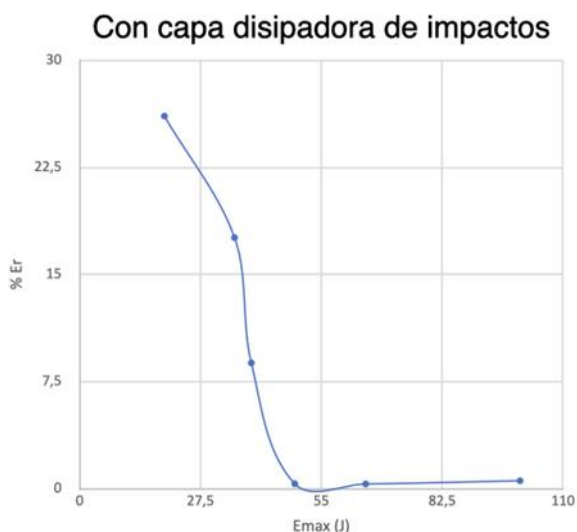


Figura 8. Energía devuelta frente a la energía de impacto con capa disipadora.

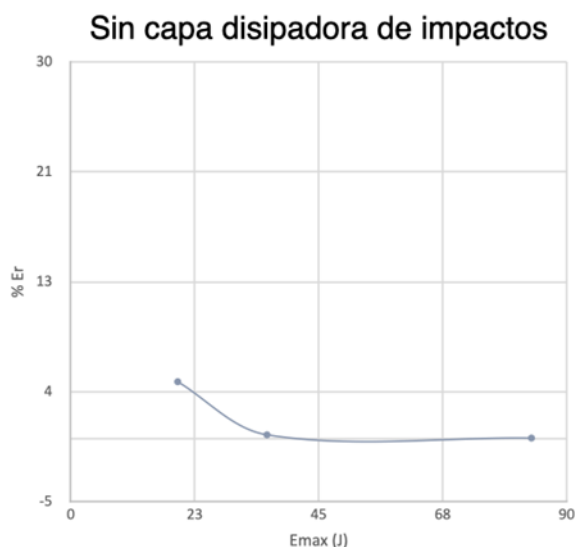


Figura 9. Energía devuelta frente a la energía de impacto sin capa disipadora.

Como se observa, el material sin protección solo devuelve parcialmente la energía para energía de impacto muy bajas. Después, el material absorbe toda la energía que recibe convirtiéndola en daño interno. Sin embargo, con la capa de protección logramos devolver un porcentaje mucho más elevado de la energía recibida durante el impacto y, además, la protección es eficaz hasta energías de impacto más elevadas.

5.- CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- El uso de la capa disipadora de impactos reduce el daño en todos los casos estudiados.
- Permite distribuir la energía de impacto sobre un área mayor, lo que reduce la energía por unidad de área que llega al laminado, evitando daños graves como, por ejemplo, la rotura de fibras y delaminaciones.
- Para energías de impacto de hasta 60 J las capas protectoras ensayadas han mostrado ser eficaces. Para energías superiores a estos valores hay perforación de la capa y se reduce la eficacia en la disipación de la energía.
- Para impactos por debajo de 20 J la protección es total y el laminado no sufre daño interno.

6.- REFERENCIAS

- [1] Alderson, A. y Alderson, K.L., “Auxetic Materials”, The University of Bolton, 2007.
- [2] Sierra, A., “Diseño, Construcción y Caracterización de un Material Auxético”, Trabajo Fin de Grado, UPM, Madrid, 2017.
- [3] Ortiz, L., “Elasticidad”, Ed. Mc Graw-Hill, 1998.
- [4] Sevilla, A., “Diseño, Fabricación y Caracterización de una Capa Disipadora de Impacto para Laminados

de Fibra de Vidrio”, Trabajo Fin de Grado, UPM, Madrid, 2020.

- [5] Li, T., Liu, F., y Wang, L., “Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 198, p. 108229, 2020.
- [6] Assidi, M. y Ganghoffer, J.F., “Composites with auxetic inclusions showing both an auxetic behavior and enhancement of their mechanical properties,” *Composite Structures*, vol. 94, no. 8, pp. 2373–2382, 2012.
- [7] Townsend, P. “Comportamiento a Impacto de Materiales Compuestos Sometidos a Fenómenos de Slamming en Embarcaciones de Alta Velocidad”, Tesis Doctoral, UPM, Madrid, 2018.
- [8] Lvov, V., Senatov, F., Stepashkin, A., Veveris, A., Pavlov, M., y Komissarov, A., “Low-cycle fatigue behavior of 3d-printed metallic auxetic structure,” *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [9] Lvov, V., Senatov, F., Korsunsky, A., y Salimon, A., “Design and mechanical properties of 3d-printed auxetic honeycomb structure,” *Materials Today Communications*, vol. 24, p. 101173, 2020.
- [10] Hou, S., Li, T., Jia, Z. y Wang, L., “Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact”, *Materials & Design*, vol. 160, pp. 1305–1321, 2018.