

The use of viscoelastic sheets, and their future in the shipbuilding of planing hulls of GFRP

Patrick Townsend Valencia, Doctor¹, Juan Carlos Suárez, Doctor², Paz Pinilla Cea, Doctor²


¹ESPOL, Ecuador, UPM, España, ptownsen@live.com

²UPM, España, juancarlos.suarez@upm.es, paz.pinilla@upm.es

Abstract– In the Galapagos Islands there is an important fleet of coastal shipping vessels for navigation between islands, less than 15 meters in length and constructed of fiberglass reinforced plastic (GFRP). The proposal to modify the hulls of the new ships that enter to operate in the islands with viscoelastic sheets is presented. In order to protect them from the damage caused by the phenomenon of slamming and increase their life time. By means of fatigue tests applying cyclic loading, the evolution of the damage within the laminate is observed, and by means of characterization techniques the levels of microcracks induced by the impacts are compared. The results show that the modification introduced in the laminate significantly reduces the repair times protecting the environment.

Keywords– Slamming, GFRP, Viscoelastic, ships, impacts.

Digital Object Identifier (DOI):

 <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.9>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

El uso de las láminas viscoelásticas y su futuro en la construcción naval de embarcaciones planeadoras de GFRP

Patrick Townsend Valencia, Doctor¹, Juan Carlos Suárez, Doctor², Paz Pinilla Cea, Doctor²

¹ESPOL, Ecuador, UPM, España, ptownsen@live.com

²UPM, España, juancarlos.suarez@upm.es, paz.pinilla@upm.es

Abstract– In the Galapagos Islands there is an important fleet of coastal shipping vessels for navigation between islands, less than 15 meters in length and constructed of fiberglass reinforced plastic (GFRP). The proposal to modify the hulls of the new ships that enter to operate in the islands with viscoelastic sheets is presented. In order to protect them from the damage caused by the phenomenon of slamming and increase their life time. By means of fatigue tests applying cyclic loading, the evolution of the damage within the laminate is observed, and by means of characterization techniques the levels of microcracks induced by the impacts are compared. The results show that the modification introduced in the laminate significantly reduces the repair times protecting the environment.

Keywords: Slamming, GFRP, Viscoelastic, ships, impacts

I. INTRODUCCIÓN

Desde que en el mundo globalizado se inició la tendencia de proteger el medio ambiente se han desarrollado diferentes modos de realizarlo.

El mantenimiento de las embarcaciones construidas de plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP) genera contaminación que requiere altas inversiones para no producir daño al medio ambiente.

En las Islas Galápagos, existe una flota importante de naves de GFRP. Estas naves se construyeron con dicho material puesto que son planeadoras de alta velocidad y requieren ser ligeras [1]. Deben navegar durante largos trayectos entre islas para cumplir con los programas turísticos, sufriendo daño por el golpeo contra las olas. Navegar a altas velocidades incrementa un fenómeno conocido como slamming [2].

Este es un fenómeno producido por la velocidad de planeo en embarcaciones que navegan a alta velocidad. La sustentación hidrodinámica las eleva sobre la superficie del mar y cuando rompe el equilibrio caen golpeando contra las olas produciendo daño sobre el fondo de las naves.

Durante el fenómeno de slamming la fuerza que golpea verticalmente la embarcación en proa, genera una energía debida al impacto entre el casco de la embarcación en

navegación y la superficie libre del agua. Esta fuerza se traduce en pulsos de muy corta duración (del orden de milisegundos) que actúan sobre una superficie muy pequeña y que da lugar, consecuentemente, a elevados picos de presión.

La gravedad de este impacto y su daño en la nave es tan impredecible que los operarios son muy cautos y reducen la velocidad para no sufrir daños adicionales durante las travesías, situación que se ve agravada en el caso de embarcaciones planeadoras de alta velocidad. La importancia del slamming sobre la seguridad e integridad de los vehículos marinos ha tenido como consecuencia una intensa actividad investigadora.

Este es un fenómeno de fatiga sobre el material del casco de la embarcación que disminuye considerablemente su vida útil, haciendo que se requieran mantenimientos continuados dentro de la reserva natural.

Se propone la inserción de capas viscoelásticas para las nuevas construcciones [3], la cual aumentará la vida útil permitiendo periodos más largos entre mantenimientos. Esto protegerá al medio ambiente a la no introducir polvo de fibra de vidrio y productos contaminantes en las islas.

¿Qué es la lámina viscoelástica? Es una capa más del laminado, que está compuesta de cápsulas rígidas de plástico junto con un material viscoelástico en su interior, aprovechando la Ley de Hooke 3D al ser restringida su deformación en dos de sus direcciones principales. El slamming a nivel del laminado de las embarcaciones es un fenómeno cíclico relacionado directamente con un evento de fatiga que produce daño en el material a nivel microestructural [4]-[5]-[6]. Estas naves se reparan cuando los paneles de GFRP de los fondos se vuelven “muy flexibles” volviéndose peligrosa la navegación.

Se ha reproducido el fenómeno de slamming en laboratorio y posteriormente se ha realizado la observación y caracterización de la evolución del daño en probetas fabricadas de GFRP, similares a los que se emplean en los cascos de las embarcaciones[7] - [8]. A medida que se van produciendo los golpes con el mar, aparecen las primeras delaminaciones entre capas. Mientras la matriz polimérica

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.9>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Sin embargo, cuando se han insertado las capas viscoelásticas, la propagación del daño se va amortiguando entre las capas disminuyendo así los daños a la matriz polimérica. Esto es debido a que el impacto se convierte en energía de daño y esa energía es absorbida por el material viscoelástico que al estar encapsulado dentro de un material polimérico utiliza la Ley de Hooke 3D para comprimirse en una sola dirección y posteriormente liberar la mayor cantidad de energía protegiendo al laminado [7].

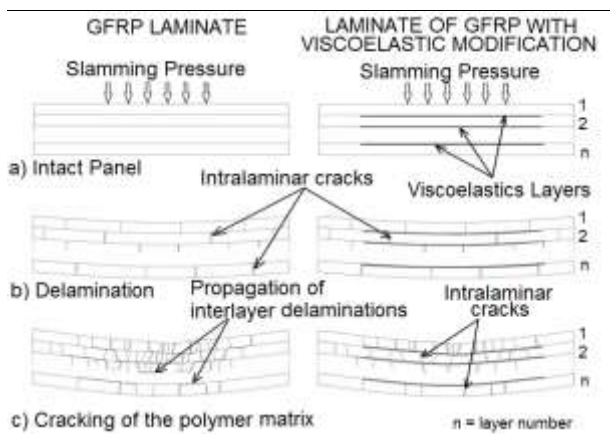


Fig. 3 Efecto de la capa viscoelástica en la propagación del daño por slamming

III. MÉTODOS EXPERIMENTALES

El fenómeno de slamming se caracteriza principalmente por su carácter no lineal, en el cual predomina el dominio de tiempo y no de la frecuencia, y en segundo lugar por ser un fenómeno aleatorio. De acuerdo con las Sociedades de Clasificación de buques, en especial la American Bureau of Shipping (ABS), consideran que las presiones de slamming para el tipo de embarcación considerada, se encuentran entre los 2250 kN/m² y 1100 kN/m², dependiendo de su posición longitudinal en el fondo de la nave. Dependiendo de la curvatura del casco, la embarcación recibe el impacto de la ola de forma diferente. En la Tabla 1 se muestran los datos característicos de la embarcación seleccionada para la experimentación.

Tabla 1
Características de la embarcación a condición de máxima carga

| Material | GFRP |
|------------------------------|----------|
| L (eslora) | 12400 mm |
| Δ (desplazamiento) | 7700 kg |
| B (manga) | 4000 mm |
| T (ángulo de astilla muerta) | 4° |
| V (velocidad máxima) | 22 Kn |

Las probetas fabricadas para los ensayos se confeccionaron de GFRP preimpregnado (270 mm x 270 mm) a las que se denominará “sin modificar”, y las otras se confeccionaron igualmente de GFRP pero con la inserción de una lámina viscoelástica a las que se denominará

“modificadas” con el propósito de establecer una comparación de resultados.

Para la embarcación seleccionada, el laminado tiene la siguiente configuración: 9 capas con orientación (45°/-45°/90°/-45°/45°/0°/90°/-45°/+45°) para las no modificadas y (45°/-45°/90°/viscoelástico/-45°/45°/0°/90°/-45°/+45°) para las modificadas. Los paneles fueron curados en un horno fuera de autoclave. (Materiales OoA, Out-of-Autoclave). Un detalle de la lámina viscoelástica se muestra en la Figura 4, en la cual se observa el diseño de la cara del impacto, la cara contraria al impacto y el detalle de cómo está insertado el material viscoelástico dentro de la lámina.

En las probetas fue colocada una galga extensiométrica con el propósito de medir las microdeformaciones durante la realización de los ensayos.

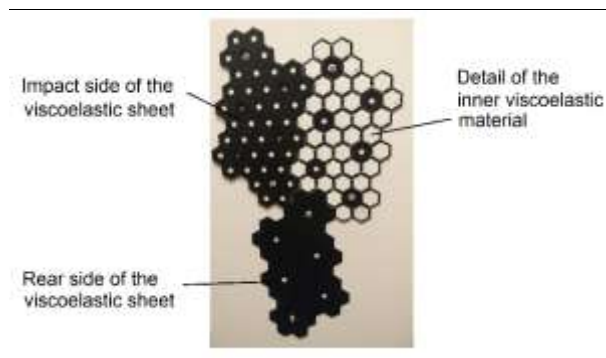


Fig. 4 Detalles de la lámina viscoelástica

En la Figura 5 se observa un panel ensayado con la galga extensiométrica pegada en la cara opuesta al impacto. También se ha marcado el área de contacto de la leva, la cual va a impactar por la cara contrario en los ensayos de slamming.

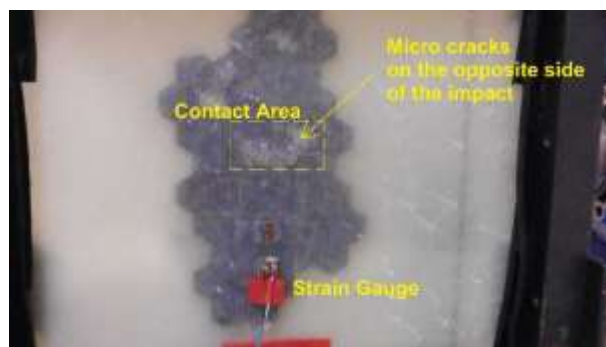


Fig. 5 Panel impactado con daño en la cara opuesta a los golpes de slamming

El equipo fabricado para la reproducción de los impactos de slamming en el laboratorio de la Universidad Politécnica de Madrid ETSIN Navales [3], consiste en un motor eléctrico, una leva de impacto excéntrica, un contador de revoluciones y un marco rígido para el ajuste de la probeta tal como se observa en la Figura 6. El diseño de la leva hace

que la deformación y relajación del panel presionen de forma gradual sobre la cara de contacto y se eviten cargas puntuales.

Una de las características del equipo diseñado para el ensayo, es la distancia de ajuste de la leva. Esta se puede graduar moviendo el marco sobre guías perpendiculares al eje del sistema. Esto permite que se puedan producir diferentes deformaciones o flechas en la probeta. Esta distancia está directamente relacionada con la deformación unitaria sobre una de sus caras.

El equipo permite producir deformaciones desde 0 a 2050 $\mu\text{m}/\text{m}$ en el centro del panel, valores correspondientes a la mínima y máxima distancia de la probeta contra la leva. Para poder estimar la superficie de contacto de la leva con el panel a la presión de slamming, se utilizó un modelo de elementos finitos.

El slamming es un evento de presiones en donde el área a analizar corresponde solo al área de contacto con la leva.



Fig. 6 Equipo reproductor de slamming

Los paneles ensayados fueron caracterizados con tinta penetrante fluorescente y luego observados bajo la luz ultravioleta para examinar el tipo de daño que se ha producido en la cara contraria al impacto y su evolución en las delaminaciones intralaminares e interlaminares. Para este tipo de ensayo se cortaron las zonas del impacto correspondientes a 60mm x 60 mm y se perforaron con una broca de taladro de 0.5 mm.

Los paneles cortados fueron sumergidos en un líquido penetrante fluorescente, para que la tinta penetre por las delaminaciones interlaminares e intralaminares y puedan ser observados. Posteriormente se realizaron cortes seccionales en las zonas del impacto a cada una de las probetas. Este hecho permite presentar una secuencia de secciones, y poder diferenciar las delaminaciones intralaminares en interlaminares.

Mediante el empleo del software Rhinoceros, se identificaron las capas y se modelaron en 3D las delaminaciones para relacionar la forma de las delaminaciones, con la orientación de las capas.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se ensayaron numerosos paneles para observar la evolución de daño y establecer la comparativa. Aproximadamente 60 paneles fueron testados a diferentes ciclos y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

En la Figura 7, se muestra a una probeta sin modificar después de (12.000 ciclos). La presión aplicada por la leva es equivalente a 410 kN/m^2 , y se observa que sobre los (1.000 ciclos) ha aparecido daño sobre la cara opuesta al impacto, que se orienta en la dirección de las fibras y corresponde a una delaminación.

A los (3.000 ciclos) ya no solo están las delaminaciones alineadas con la dirección de la fibra en la cara opuesta al panel, sino que hay rotura de la matriz.

A los (12.000 ciclos) toda la superficie de impacto se encuentra dañada.

Las microgrietas de la matriz y las delaminaciones forman un solo conjunto. Incluso se observa un cambio de color en la zona central de la superficie de impacto, a modo de delaminación completa de la capa en esa sección.

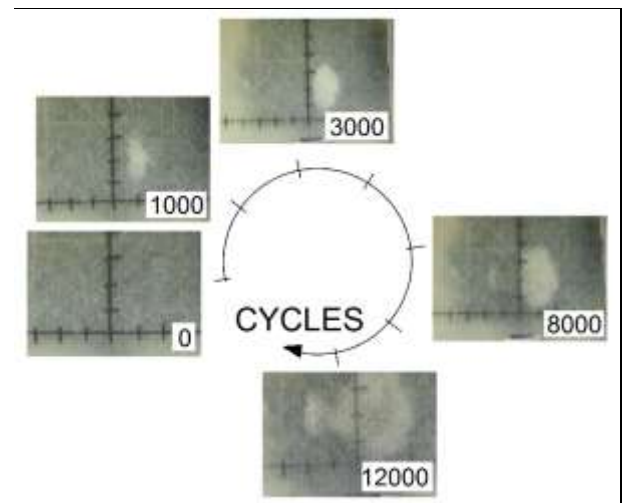


Fig. 7 Evolución del daño en un panel sin modificar impactado a (410 kN/m^2) de presión de slamming con (10^4) ciclos

En la Figura 8, se puede observar el ensayo de impacto de slamming realizado a un panel modificado viscoelásticamente a los mismos (12.000 ciclos) y 410 kN/m^2 de presión de slamming aplicados con la leva en la cara contraria de impacto.

A los (4.000 ciclos) no se observan roturas de la matriz ni alineaciones de delaminación en la orientación de las fibras.

Cuando el ensayo de fatiga llega a los (9.000 ciclos), se produce rotura de la matriz en forma de micro grietas y orientadas en la dirección de la fibra en la cara contraria al impacto.

A los (12.000 ciclos) de impacto, en el evento de fatiga se observan un mayor número de micro grietas en la matriz, pero que no llegan, en gran medida, a vincularse. La capa viscoelástica se encuentra adherida en el interior del panel y no se observa desprendimiento interior.

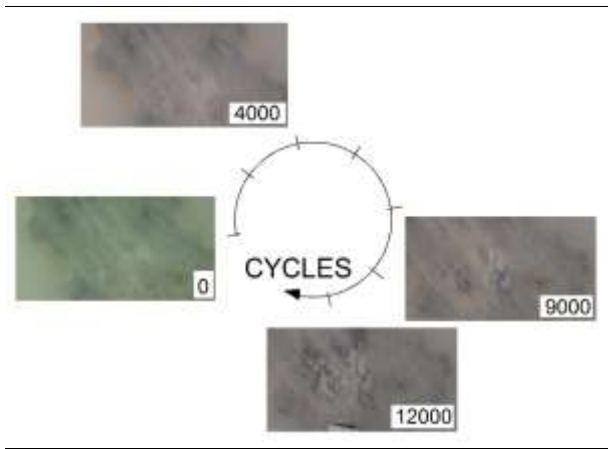


Fig. 8 Evolución del daño en un panel modificado viscoelásticamente impactado a (410 kN/m²) de presión de slamming con (10⁴) ciclos

Las galgas extensiométricas, se colocaron a (4 cm) del área de impacto. En la Figura 9 se observan los perfiles de deformación en ($\mu\text{m/m}$) para el panel sin modificar. Las microdeformaciones a (1.000 ciclos, 5.000 ciclos y 12.000 ciclos) tienen tendencia a disminuir tanto, en la deformación por la presión ejercida de la leva sobre el panel, como en la restitución del panel al dejar de actuar la presión.

Esto significa que hay una mayor deformación en la zona del impacto, provocando que las fibras se separen más entre sí debido a roturas de la matriz polimérica. De (1.292 $\mu\text{m/m}$) a (1.000 ciclos), disminuye a (638 $\mu\text{m/m}$) en (12.000 ciclos).

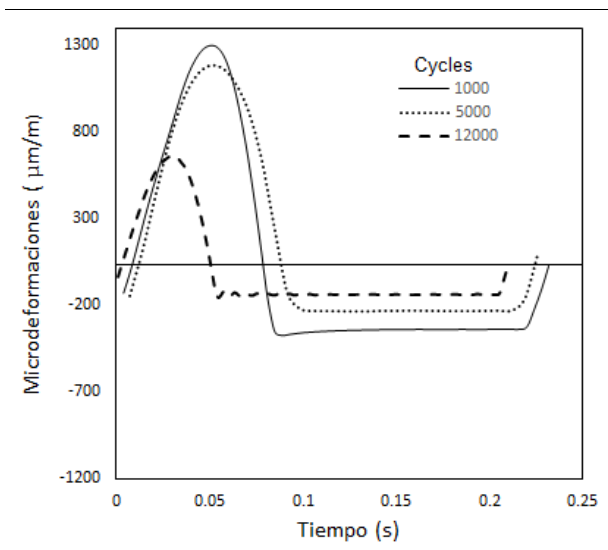


Fig. 9 Microdeformaciones de un panel sin modificar impactado a 10⁴ ciclos

Por el contrario, el panel modificado viscoelásticamente permanece menos flexible. Esto es debido a que se han producido menos roturas de la matriz polimérica, deformándose en mayor grado a 4 cm del área de impacto. Los paneles tienden a adquirir una deformación más regular en el momento de la restitución devolviendo en mayor grado la energía de daño y produciendo menos microgrietas en la matriz.

En la Figura 10 se observa que las microdeformaciones van de (1.261 $\mu\text{m/m}$) a ((1.700 ciclos), disminuyendo a (988 $\mu\text{m/m}$) en los (12.000 ciclos). A continuación se comparan los resultados en las mismas condiciones para ver el cambio de flexibilidad o de la pendiente de ingreso de la leva deformando el panel. Esto permite observar que el comportamiento del panel modificado tiene una restitución con menor deformación después del impacto de slamming.

El panel sin modificar pierde rápidamente la flexibilidad, mientras que en el modificado se mantiene debido a la lámina viscoelástica. Esta lámina es capaz de absorber el impacto cíclico. Esta capacidad del panel está directamente relacionada a la inserción de la lámina viscoelástica, en donde la repetición de los ciclos juega con las tensiones de tracción y compresión sobre ambas superficies del panel, disminuyendo el daño.

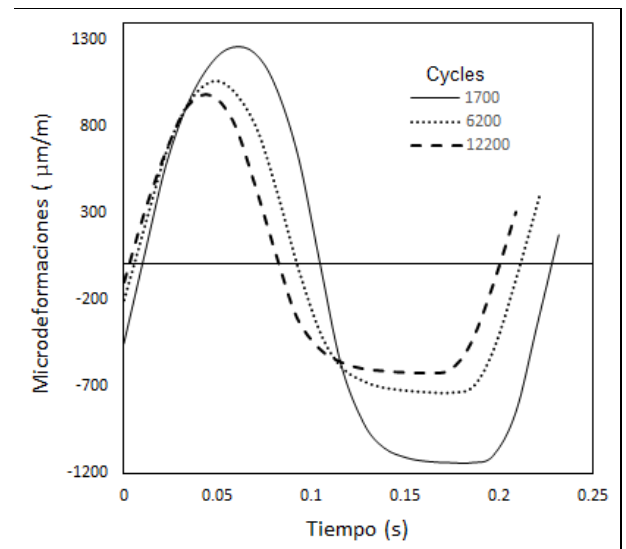


Fig. 10 Microdeformaciones de un panel modificado con capa viscoelástica impactado a 10⁴ ciclos

En la Figura 11 se observa un panel ensayado con tintas penetrantes fluorescentes. Al panel se le realizó un taladro con una broca de (0.3 mm) y a continuación se sumergió en la tinta.

Una vez cortada la sección con una cuchilla de diamante, se pudo observar como el daño interlaminar e intralaminar en las capas posteriores a la lámina viscoelástica, correspondía a un agrietamiento de la matriz polimérica y no a delaminaciones encadenadas en forma de escalera.

En la cara de impacto se observa gran daño producido por la leva. La matriz prácticamente ha sido dañada en su totalidad por la leva durante el evento de fatiga. Se empleó cera antifricción y agua como refrigerante para evitar que la temperatura del panel se eleve más allá de su temperatura de transición vítrea y afecte los resultados.

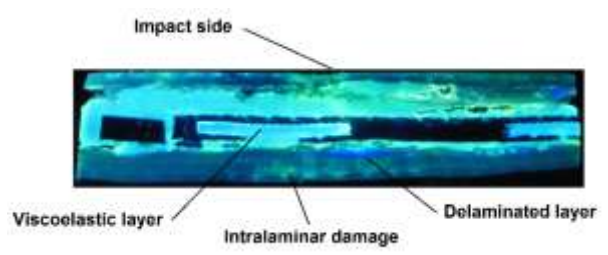


Fig. 11 Microdeformaciones de un panel modificado con capa viscoelástica impactado a 10^4 ciclos

V. CONCLUSIONES

El futuro de la construcción naval de embarcaciones fabricadas a base de GFRP está en la correcta inserción de las capas viscoelásticas para proteger a las naves de la carga destructiva de slamming. Efectivamente con la metodología presentada, se observa que se prolonga la vida útil de las embarcaciones planeadoras ya que la absorción de energía por parte del laminado del casco de la nave protege a la embarcación. Esto hace que disminuyan considerablemente la aparición de microgrietas que van aumentando la flexibilidad del panel volviéndolo inutilizable.

En los experimentos realizados para comprobar la efectividad de la inserción de la lámina viscoelástica, se pudo observar, que ambos paneles ensayados bajo las mismas condiciones, tenían una variación significativa en las microdeformaciones al término de los ensayos. Pero había una gran diferencia entre los daños observados bajo la luz fluorescente, en los cuales las microgrietas se habían alineado más en forma de cadena en el panel no deformado produciendo rotura en la matriz. En cambio en el panel modificado con la lámina viscoelástica, la matriz había sido protegida de daño produciendo más delaminación entre capas las cuales van relacionadas con la flexión de los paneles y no con el efecto de la energía entregada por el impacto.

El panel modificado era menos flexible que el panel sin modificar en gran medida. Esto va a estar directamente relacionado con la vida útil de las embarcaciones puesto que las presiones utilizadas corresponden a ensayos con eventos muy severos de slamming con el propósito de observar el daño producido.

Al insertar una lámina viscoelástica en los paneles de GFRP (OoA pre-impregnado) es posible mitigar efectivamente el daño por impacto. La combinación de polímeros con alta capacidad de deformación, formando

pequeñas células hexagonales, con paredes de un segundo polímero más rígido, consigue amortiguar los impactos. Las deformaciones se encuentran parcialmente aisladas en la lámina protectora y protegen las capas de material compuesto por debajo de la zona afectada.

De este modo, se controla la generación y propagación del daño, mejorando la disipación de la energía de impacto y protegiendo así la estructura del casco y aumentando la vida útil del barco. Este enfoque abre nuevas perspectivas en el diseño de embarcaciones rápidas, permitiendo la modificación de sus estructuras ya que la introducción de las capas viscoelásticas cambia la forma en que las tensiones, debidas al fenómeno de slamming, se distribuyen y se concentran en el casco.

La conclusión es clara, la inserción de la capa viscoelástica en un laminado de GFRP “Si funciona para prevenir el daño por impactos verticales”, incluso para impactos de alta energía.

El daño es devuelto por la lámina viscoelástica protegiendo las capas sucesivas del laminado. Muestra ser el punto en el cual debe cambiarse la mentalidad de los diseñadores y establecerse como una nueva tendencia en la construcción de paneles de GFRP.

USO DE LOS VISCOELÁSTICOS: HACIA DÓNDE VAMOS

El futuro del uso de los materiales viscoelásticos está encaminado a mejorar las prestaciones como continuación de los trabajos descritos anteriormente, partiendo de unos resultados muy positivos. El principal objetivo de la investigación es obtener laminados con mejores propiedades frente al fenómeno de slamming.

Algunos de los materiales más destacables en términos de disipación de energía y resistencia al impacto son los producidos por la propia naturaleza. Sin embargo, no se trata tanto de utilizarlos como componentes de los propios materiales compuestos fabricados por el hombre (biocomposites), ni tan siquiera de replicar los sistemas y organización de los materiales naturales (composites biomiméticos). Se trataría de aprovechar los principios y mecanismos de disipación de energía de los materiales de la naturaleza para adaptarlos a nuestras tecnologías de fabricación de materiales compuestos (composites bioinspirados).

Evalrados los trabajos existentes en el ámbito de absorción de energía por materiales compuestos y observando el buen comportamiento de las nanocargas, sería necesario desarrollar nuevas estructuras jerárquicas mediante el uso de nanopartículas.

Estableciendo las relaciones existentes entre la estructura organizativa de estos materiales naturales y las

propiedades mecánicas obtenidas y haciendo énfasis en los mecanismos de absorción de energía, se pretenden establecer diferentes estrategias de diseño bioinspiradas, para materiales compuestos sintéticos, que sean más eficientes en la absorción y disipación de energía y además de ser más tolerantes al daño.

La investigación desarrollada facilita la elaboración de estudios complementarios para mejorar el tema de la adherencia, la curvatura de los paneles, el efecto de la humedad y el diseño de la lámina. Esto abre una amplia gama de líneas de investigación basadas en la demostración de las bondades del uso de la lámina viscoelástica en GFRP.

REFERENCES

- [1] Yail J. Kim, Isamu Yoshitake, "Composite hull structures subjected to wave - induced slamming impact". *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Vol 33(1) 3–13, 2014
- [2] Kabsenberg B., "Slamming or ships: where are we Now?" *Philosophical Transactions of Royal Society*, 20 de junio de 2011. Pág 2892-2897.
- [3] P. Townsend, j. Suarez, "Paneles GFRP modificados con capas viscoelásticas para mejorar la respuesta frente a impactos de baja velocidad", XII Congreso Nacional de Materiales Compuestos - MATCPMP 2017 - Donostia/San Sebastián, 2017
- [4] Hayman B., "Response of sandwich structures to slamming and impact loads". *Composite Materials in Marine Structures*, vol. 2. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain (Chapter 9). 1993.
- [5] Z. Qin, R.C. Batra, "Local slamming impact of sandwich composite hulls", *International Journal of Solids and Structures* 46 (2009) 2011-2035.
- [6] Lopes C., Seresta O., "Low-velocity impact damage on disperse stacking sequence laminates. Part I: experiments". *Compos Sci Tenchol* 69(2009) 926-936. 2009
- [7] P. Townsend, J. C. Suarez, "Reduction of slamming damage in the hull of high-speed crafts manufactured from composite materials using viscoelastic layers". *Ocean Engineering* 159 (2018) 253–267, 2018
- [8] Selvaraju S., Ilaiyavel S., "Applications of composites in marine industry". *Journal of Engineering Research and Studies E-ISSN0976-7916 JERS*, Vol.II. Pág 89-91, 2011.
- [9] Website www.windy.com
- [10] "Censo de naves de cabotaje en las Islas Galápagos 2018", Subsecretaría De Puertos Y Transporte Marítimo Y Fluvial, Ecuador, 2018