

Insertión de capa viscoelástica para amortiguar la propagación de energía por impactos verticales de slamming en embarcaciones de plástico reforzado con fibra de vidrio

Insertion of viscoelastic layer to absorb the propagation of energy due to vertical slamming impacts in fiberglass reinforced plastic vessel

Patrick Townsend^{1*} Juan C. Suárez-Bermejo² Paz Pinilla² Nadia Muñoz¹

Recibido 14 de septiembre de 2020, aceptado 11 de marzo de 2022

Received: September 14, 2020 Accepted: March 11, 2022

RESUMEN

Para el diseño de embarcaciones construidas por laminados de GFRP se propone una inserción con capa viscoelástica para disminuir la propagación del daño producido por el impacto vertical del fondo de la nave con el mar o fenómeno de slamming. Mediante comparaciones de impactos verticales por caída de peso que reproducen la energía inferida al panel durante la navegación, se estudia la propagación del daño de paneles de preimpregnado curados OoA comparándolo con paneles modificados con inserción de capa viscoelástica. El empleo de lectura de datos de aceleraciones durante el impacto permite cuantificar mediante la formulación desarrollada los beneficios de la modificación observando el comportamiento de la fuerza, el desplazamiento y la energía que devuelve el panel luego del impacto y que no se convierte en daño intralaminar e interlaminar.

Palabras clave: Slamming, GFRP, viscoelástico, impacto.

ABSTRACT

For the design of vessels built by GFRP laminates, an insert with a memory foam layer is proposed to reduce the spread of damage produced by the vertical impact of the ship's bottom with the sea or slamming phenomenon. Using vertical drops—weight impact machine that reproduces the energy inferred to the panel during navigation, the propagation of the damage of OoA cured prepreg panels is studied by comparing it with modified panels with insertion of viscoelastic layer. The use of acceleration data reading allows the benefits of viscoelastic modification during impact to be quantified through the developed formulation. The force, displacement, and energy returned by the panel after impact have also been quantified, which does not become intralaminar and interlaminar damage.

Keywords: Slamming, GFRP, viscoelastic, impact.

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCBOR). Guayaquil, Ecuador. Email: ptownsen@espol.edu.ec; nmunoz@espol.edu.ec

² Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN). Madrid, España. Email: juancarlos.suarez@upm.es; paz.pinilla@upm.es

* Autor de correspondencia: ptownsen@espol.edu.ec

INTRODUCCIÓN

El slamming es un fenómeno energético importante para considerar en el diseño de las embarcaciones [1]. Esto se complica aún más cuando se trata de embarcaciones planeadoras de alta velocidad las cuales durante su navegación soportan severos golpes verticales con el fondo de la nave que producen daños catastróficos. Los estudios, investigaciones, simulaciones matemáticas, reproducciones de los impactos entre otros siguen siendo una puerta abierta a comprender y mejorar las consecuencias que tiene sobre las estructuras de las naves, habiendo mucho todavía por hacer [2].

En el caso de las embarcaciones de GFRP, el fenómeno de slamming tiene la particularidad de que el golpe del mar se convierte en energía que se disipa en un material compuesto, produciendo distintos niveles de daño lo que lo vuelve un problema de impacto físico muy complejo de estudiar y llega a ser uno de los más importantes en el diseño de la nave afectando directamente su costo, su capacidad de carga su confort y su resistencia en forma considerables

La estructura de la embarcación al componerse de un laminado relaciona la disipación de la energía en las capas que lo componen tal como ocurre en los paneles de los buques planeadores. En los GFRP la energía que se disipa en el material luego del impacto no se distribuye en forma uniforme, sino que la ortotropía del material permite que las sollicitaciones impuestas hagan que tenga diferente comportamiento dentro del mismo. Las tensiones y deformaciones sobre el laminado no son uniformes y varían transversalmente saltando entre capas y dependiendo del tipo de compuesto haciendo que este tipo de daño se vuelva impredecible [3, 4].

El empleo de nuevos materiales preimpregnados “out of autoclave”–OoA para curados en horno en las estructuras de GFRP, requiere una especial consideración en el estudio de la disipación de la energía de impactos cíclicos como el del slamming discutido por [5] quien lo asocia con las variaciones de sus propiedades. Los impactos de naturaleza vertical durante los milisegundos que dura la deformación van dejando un daño residual en el laminado que se va acumulando en el material a nivel microestructural.

El fenómeno de slamming se puede estudiar bajo la perspectiva del impacto vertical que produce daño sobre el material de GFRP de los cascos de las embarcaciones, debido al tipo de daño observado en la reproducción del impacto cíclico de slamming [6]. El presente trabajo, es una continuación de la investigación sobre el daño producido por los impactos cíclicos, introduciendo mediante impactos verticales por caída de peso una energía similar a la acumulada en los ensayos de la referencia para observar el comportamiento del laminado en su evolución a nivel microestructural.

Numerosos tipos de ensayos de impacto vertical se realizan basados en el principio de la conservación de la energía, en el cual un equipo impactador es lanzado desde una altura sobre la muestra a estudiar. De acuerdo con las investigaciones esta técnica proporciona resultados muy completos sobre la observación de que toda la energía potencial se convierta en energía cinética, y para el caso de los materiales de GFRP estos disipan la energía recibida a través del laminado la cual dependiendo de su intensidad se traduce en daño de diferentes tipos [7]. Según las observaciones de daño por impacto y luego repetidas experimentalmente, al momento del impacto el panel comienza a flexionarse elásticamente generando tensiones y deformaciones internas producto de la respuesta a las deferentes energías que se transfieren desde el impactador [8]. Luego de que se ha superado el límite elástico o umbral de daño del material, ya el laminado no puede devolver toda la energía de impacto y comienzan a aparecer las primeras grietas intralaminares dependiendo de la orientación de las fibras. Estas por lo general se observan en una sección transversal, como marcas normales a la superficie del laminado, las cuales no siguen un mismo orden saltando de capa a capa. Si el impactador sigue actuando sobre el panel introduciendo más energía en el laminado, se pasa a la etapa en la cual aparecen las delaminaciones inter-capas las cuales se van orientando en forma de escalera uniando las grietas en la matriz. De allí en adelante el impactador romperá las fibras, lo cual no es el caso del fenómeno de slamming ya que es de baja energía y de impactos cíclicos asociados con la fatiga del material. En el caso del presente trabajo se analizan las delaminaciones obtenidas por impactos verticales desarrollando experimentación que permite observar en forma cualitativa la resistencia del material y ser evaluado

mediante una formulación desarrollada de acuerdo con los datos obtenidos en laboratorio.

La energía absorbida se considera como un parámetro representativo del comportamiento de los materiales compuestos al ser sometidos a cargas de impacto y es una variable importante para cuantificar y comparar resultados. La representación de la energía aplicada durante el impacto para un material compuesto biaxial con relación de equis energías entre la energía de impacto y la energía absorbida se comprueba que por debajo de la curva de equis energías la probeta no es capaz de absorber toda la energía acumulándose el exceso en el impactador [9, 10]. Para el caso de los impactos verticales de slamming que son de baja energía, la acumulación del daño es lo importante.

Para estudiar el comportamiento energético durante el impacto, el empleo de acelerómetros con sistema de adquisición de datos informáticos ha dado buenos resultados para cuantificar energía devuelta. Otros investigadores emplearon este sistema para desarrollar los comportamientos de las fuerzas actuantes y los desplazamientos en materiales de GFRP [11, 12].

Para integrar toda la información obtenida experimentalmente y poder utilizarla en el diseño de nuevas embarcaciones, es necesario proponer modelos de daño que permitan caracterizar el comportamiento del material [13]. La resistencia al daño impuesto por impacto de un GFRP confirma que la evaluación de la resistencia residual es un complemento importante en la investigación de una secuencia de impactos a diferentes alturas, y permite obtener una relación exponencial entre las energías para obtener una tendencia en el cambio de la flexibilidad. Esto se puede realizar mediante un experimento cualitativo que permita evaluar mediante la observación del daño el comportamiento del material laminado.

El empleo de los materiales viscoelásticos ha sido una opción para tratar de amortiguar el ruido y el impacto en superficies de estructuras [14, 15]. Ellos aprovechan que los materiales compuestos tienen relaciones de rigidez elevada pero poca amortiguación combinando los altos niveles de disipación de energía con una rigidez estructural mínima. No es útil en el caso de las embarcaciones planeadoras este tipo de compuesto por el elevado

espesor del laminado, ya que una modificación debe considerar la disminución del volumen y peso a la estructura del casco con el propósito de que la energía cinética impuesta se transforme en menor daño interno [16]. Propone una solución con la introducción de material viscoelástico dentro de las vigas cajón de las uniones de refuerzos en el casco de las embarcaciones.

El empleo de los viscoelásticos en los GFRP tiene el amortiguamiento supeditado a la orientación de las fibras de acuerdo con numerosos estudios con impacto de caída de peso por gravedad que muestran su tolerancia al daño quien concluye que, aunque no existen análisis teóricos, la naturaleza viscoelástica de la matriz es un factor importante para absorber la energía de impacto de la misma manera que para absorber energía vibratoria considerando al impacto como una forma extrema de vibración.

La amortiguación de un compuesto de fibras modificado con capas viscoelásticas, en cuanto a la flexión y la cizalla transversal se determina usando asunciones y ecuaciones que sugieren que la disipación se produce en la resina a un valor intermedio entre el material viscoelástico y la matriz [16]. Ocurre en los GRFP que los micro daños tienden a unirse para formar una grieta macroscópicas llamadas grietas transversales o intralaminares producto de la tensión cuasiestática y la tensión de fatiga para modelos viscoelástico como la degradación de su fuerza por fatiga estática y dinámica y que debe ser atenuada. En el caso de laminados que deben ser estancos como lo son los cascos de las embarcaciones planeadoras, la amortiguación en el avance de las grietas por efecto de la inserción de la capa viscoelástica, permite mantener la estanqueidad hasta que se presenten las primeras microgrietas en la zona protegida.

La propuesta de inserción de capas viscoelásticas va definitivamente a amortiguar esta propagación de daño debido a las energías que se quedan en el panel luego del impacto y que producen daño desde el punto de vista de la micromecánica analítica. La confección de una lámina con material viscoelástico debe hacerse de tal forma que no influya significativamente en el espesor del laminado del casco de la embarcación y permita aligerar el peso de la nave para beneficio de su potencia y desplazamiento de manera esencial. Para observar los resultados de esto, se propone

comparar los resultados de la reproducción de los impactos verticales de slamming con impactos verticales de caída de peso a bajas energías para paneles de GFRP sin modificar y modificados con capa viscoelástica.

Ya se han desarrollado trabajos para reproducir daño a los paneles de GFRP [17], con impactos de baja energía para eventos de fatiga y medir la capacidad de la lámina viscoelástica para proteger las capas inferiores del laminado, con la diferencia de que estos experimentos no permiten modelar en 3D las delaminaciones como se presenta en el actual trabajo.

METODO EXPERIMENTAL

Se ha construido un equipo de impacto vertical por caída de peso (Drop-weight impact machine) para poder evaluar el comportamiento mecánico de estos materiales frente a sollicitaciones como las cargas de impacto. En la Figura 1 podemos ver la descripción de la configuración de la máquina. El impactador cae debido a la fuerza de la gravedad deslizando a lo largo de dos guías, logrando disminuir el efecto de fricción y consiguiendo un impacto controlado sobre la probeta situada en la base de la máquina. El equipo presenta un sistema antirebote con un lector

láser incorporado poder para controlar el número de impactos. En estos ensayos se ha controlado para tener un solo impacto. Además, tiene instalado un sensor de aceleración o gravitómetro que envía la información a un sistema de adquisición de datos. La información que recoge la máquina construida permite adquirir los datos de aceleración versus el tiempo, desde que comienza el ensayo y hasta su finalización.

La estructura de la máquina se asienta sobre un gran marco al que se encuentran unidos la base, guías, el equipo impactador y el sensor láser. La base está formada por un bastidor en donde se encuentra empotrado el panel que va a recibir el impacto. Las dimensiones del bastidor son 250 x 250 mm y a los lados se sitúan las platinas de sujeción. El equipo impactador está formado por una barra en cuya parte inferior se encuentra el impactador rematado por una esfera de acero de 12,5 mm y además a la barra es posible añadirla el peso que necesitemos para el impacto. El mecanismo de sujeción fue diseñado para sujetar y liberar el equipo impactador. Además, se cuenta con un sistema antirebote para asegurarse que solo se produce un único impacto. Se utilizó un motor eléctrico para poder levantar el equipo del impactador a la altura requerida y conseguir la velocidad de impacto deseada. El sensor láser se encuentra situado en la parte inferior de la máquina y se utiliza para medir la velocidad en el instante del impacto.

Para calcular la energía absorbida por el material (E_a) se utilizan los datos adquiridos por el gravitómetro durante el ensayo. De esta forma podemos evaluar el umbral de daño del panel impactado y establecer los niveles de energía a los cuales pierde su capacidad de devolver energía. El software instalado permite corregir los errores de la aceleración por el cambio de masa, la corrección que realiza es debido a la naturaleza de los datos que registra el acelerómetro los cuales corresponden a múltiples adimensionales de la aceleración de la gravedad y los obtiene como la media aritmética de las lecturas entre intervalos de frecuencia. Durante los ensayos se observó efectivamente que la aceleración registrada durante la caída libre no concuerda con el tiempo y la distancia de la altura desde que se libera el impactador hasta que se produce el contacto con el panel.

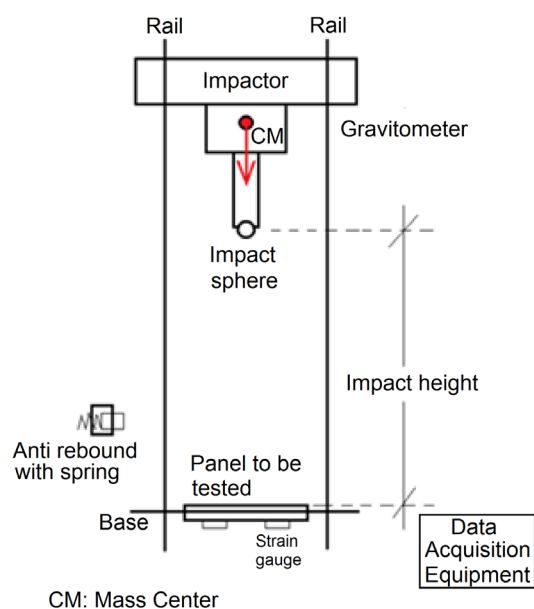


Figura 1. Configuración de la máquina de impacto por caída de peso.

A partir de los datos obtenidos del número adimensional de gravedad (G) en cada instante de

tiempo (t) es posible calcular la fuerza (F) que va dañando el panel. Para ello utilizamos la expresión de la ecuación (1) que tiene en cuenta la influencia del peso del equipo impactador (W) y la aceleración del cuerpo en su caída vertical (g) afectado por la fricción sobre las guías, durante el movimiento.

$$F(t) = W * G(t) \quad (1)$$

Para poder hallar el desplazamiento (x) del impactador en cada instante (t) mientras se deforma el panel utilizamos la ecuación (2) integrando a lo largo del tiempo (Δt).

$$X(t) = \sum_0^t \left(\frac{3}{2} * g(t) * \Delta t^2 \right) \quad (2)$$

La energía cinética total (K) dada por el impactador en cada instante (t) durante la deformación es posible obtenerla utilizando la ecuación (3).

$$K(t) = \sum_0^t \left[\frac{1}{2} * W(t) * g(t) * \Delta t^2 \right] \quad (3)$$

Y la energía total de impacto recibida por el panel se obtiene utilizando la ecuación (4), donde se observa la relación que existe con la fuerza que produce la deformación del panel (F) a lo largo del tiempo (Δt).

$$E(t) = \sum_0^t \left[\frac{3}{2} * F(t) * X(t) \right] \quad (4)$$

Para calcular la energía absorbida (E_a) por el panel utilizamos la ecuación (5), teniendo en cuenta como se ve afectada la energía inicial de impacto (E_0) a medida que el panel va devolviendo energía como una diferencia entre (E) y (K), es decir entre la energía total y la que se transforma en energía cinética.

$$E_a = E_0 - (|E(t)| - |K(t)|) \quad (5)$$

Los parámetros adimensionales para reemplazo de la información en las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) se muestran en la Tabla 1 siendo representados por M = masa, L = longitud, T = tiempo, con el propósito de establecer la concordancia en el empleo de las mismas.

Para el ensayo de impacto por slamming se confeccionaron paneles de GFRP de material

Tabla 1. Parámetros adimensionales de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

Ecuación	Magnitud	Análisis Adimensional
(1)	F(t)	$MLT^{-2} * 1 = MLT^{-2}$
(2)	X(t)	$LT^{-2} * L^2 = L$
(3)	K(t)	$MLT^{-2} * LT^{-2} * T^2 = ML^2T^{-2}$
(4)	E(t)	$M * LT^{-2} * L = ML^2T^{-2}$

preimpregnado OoA (Out-of-Autoclave curing). Antes de comenzar a trabajar con el material, dado que se encontraba refrigerado a $-18^\circ C$, fue necesario sacarlo y dejarlo dentro una bolsa herméticamente cerrada durante 24 horas para que no absorbiera humedad hasta llegar a la temperatura ambiente. El material utilizado se conoce como Gurit WE-91 triaxial y está formado por un tejido de 1 mm de espesor que a su vez está constituido por 3 capas de láminas orientadas en 3 direcciones ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$). Las propiedades mecánicas del laminado empleado se detallan en la Tabla 2, en la cual se detalla el tipo de propiedad, su valor físico, la unidad de medida empleada y el método de control que tiene el fabricante.

Las dimensiones de los paneles cortadas fueron de 270 x 270 mm correspondientes a la dimensión del bastidor del equipo de ensayo. En primer lugar, se prepararon los paneles sin modificar, utilizando nueve capas en total y compactadas de la siguiente forma $0^\circ/-45^\circ/90^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ$, siendo la primera capa la que estará en contacto con el impactador y la última capa llevará adherida la galga extensiométrica. A continuación, se prepararon los paneles modificados introduciendo una lámina viscoelástica. En este caso se colocaron un total de 10 capas secuenciadas de la siguiente forma $0^\circ/-45^\circ/90^\circ/viscoelástica/90^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ$. En este caso también la primera capa está en contacto con el impactador y la última lleva incorporada la galga extensiométrica. La medición de micro deformaciones se realiza para verificar la concordancia de los ensayos, es decir, observar que a mayor impacto efectivamente haya mayor deformación previniendo algún error en la lectura del acelerómetro o de posicionamiento del carro de impacto.

Las láminas viscoelásticas empleadas para la fabricación usaron impresión 3D mediante la superposición de capas. El equipo empleado es de

Tabla 2. Parámetros de los ensayos de impacto por caída de peso.

Propiedades	Valores	Unidad	Método
Tipo de fibra	1200 gr/m ² de armado triaxial con resina tipo E, con 50 g/m ² de vellón		
Porcentaje de resina	43	%	–
Presión de curado	1	Bar	–
Temperatura de curado	90	°C	–
Tiempo de curado	120	min	–
Temperatura de transición vítrea	110-125	°C	ISO 671 (DMA)
Espesor del laminado curado	1.01	mm	ASTM D3171 Método II
Volumen de fibra a 0° de la dirección de tensión	45.2	%	ASTM D3171 Método II
Esfuerzo de tensión a 0° (normalizado al 60%)	656	Mpa	ISO 527-4
Módulo de tensión a 0° (normalizado al 60%)	24	GPa	ISO 527-4
Volumen de fibra a 0° de la dirección de compresión	44.5	%	ASTM D3171 Método II
Esfuerzo de compresión a 0° (normalizado al 60%)	537	MPa	SACMA SRM1-94
Volumen de fibra a 0° del módulo de compresión	46.4	5	ASTM D3171 Método II
Módulo de compresión a 0° (normalizado al 60%)	31	GPa	SACMA SRM1-94
Volumen de fibra a 0° de la dirección del ensay ILSS	45.4	%	ASTM D3171 Método II
Resistencia ILSS a 0°	41	MPa	ISO 14130

tipo inyección de polímeros con deposición fundida. Las láminas viscoelásticas listas se observan en la Figura 2.

El proceso de infusión es al vacío solamente, ya que el preimpregando de GFRP ya tiene untada la resina y esta se cura al horno. Ambos se laminaron sobre un útil de teflón para ser sellados al vacío, y bolsa de polietileno. Interiormente se le incluyó la tela respiradora en la parte de arriba, el pelable por ambos lados y tela impermeable final para que el flujo de resina no tape la válvula respiradora que se colocó para mantener el vacío con una bomba. Los paneles modificados y sin modificar, se curaron al horno en bolsa de vacío por ser del tipo OoA, a

una temperatura de 120 °C durante un tiempo de 120 min. Se laminaron de igual forma los paneles con las capas viscoelásticas quedando finalmente curados con el mismo procedimiento.

Los ensayos de impacto se realizaron para diferentes niveles de energía variando la altura y el peso impactador tal y como aparece en la Tabla 3. En todos los casos actuó el sistema antirebote para detener el equipo del impactador y realizar un único impacto. Los ensayos de impacto de baja energía de hasta 30 J son comparables a los niveles de presión de slamming presentados en [6] para el tipo de embarcación referenciada. Además, se realizaron ensayos de impacto vertical con niveles de gran energía destructiva a 130 J para comparar también la resistencia de la capa viscoelástica a impactos severos.

Para poder estudiar las delaminaciones intralaminas e interlaminas que se generan en los diferentes paneles, se siguió el procedimiento de trabajo que aparece en la Figura 3. Las delaminaciones intralaminas son aquellas que separan las capas por cizalla y están asociadas a los modelos de teoría cohesiva. En cambio, las delaminaciones interlaminas corresponden a las microgrietas de aparecen en la matriz en cada capa del laminado. Se utilizó la técnica de ensayos no destructivos

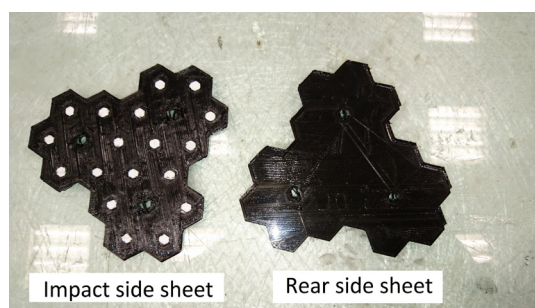


Figura 2. Detalle de la lámina viscoelástica ambas caras.

Tabla 3. Parámetros de los ensayos de impacto por caída de peso.

Valor nominal de Energía (J)	Altura del impacto (m)	Peso aplicado (kg)	Microdeformaciones obtenidas ($\mu\text{m/m}$)	# de rebotes	# de impactos realizados
Paneles no modificados					
10	0,18	5.549	502	1	1
20	0,37	5.549	749	1	1
30	0,55	5.549	1130	1	1
40	0,73	5.549	1401	1	1
50	0,36	13.829	1710	1	1
60	0,44	13.829	1828	1	1
130	0,97	13.829	3250	1	2
Paneles modificados con capa viscoelástica					
20	0,37	5.549	252	1	1
30	0,55	5.549	480	1	1
40	0,73	5.549	655	1	1
60	0,44	13.829	991	1	1
80	0,60	13.829	1040	1	1
120	0,85	13.829	1273	1	1
130	0,97	13.829	1338	1	3

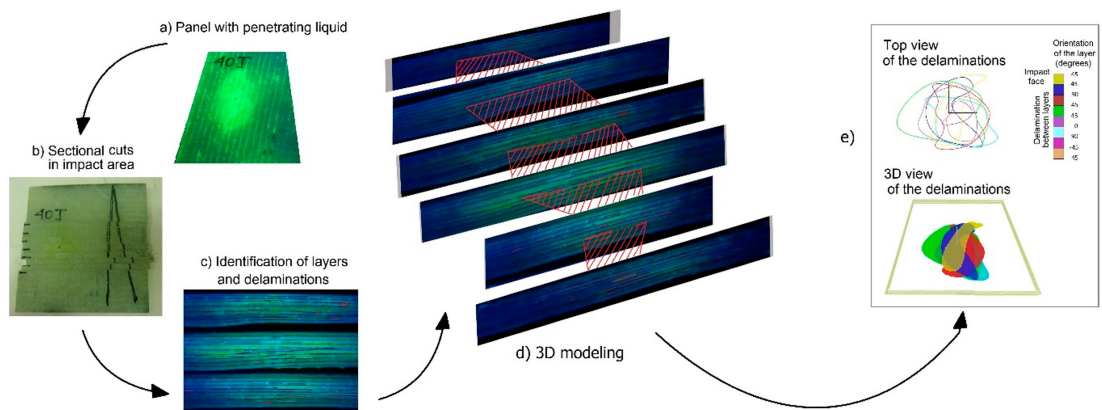


Figura 3. Procedimiento para la evaluación con el ensayo de líquidos penetrantes y posterior modelado en 3 D.

de líquidos penetrantes fluorescentes para poder establecer perfectamente la zona de impacto. De los paneles de 250 x 250 mm se extrajeron de la zona de impacto probetas de 60 x 60 mm y se perforaron con una broca de taladro de 0,5 mm. El uso de esta medida de broca no afecta las observaciones porque el levantamiento 3D de las delaminaciones se realizan sobre una sección de área

de las muestras cortadas de 60 x 9 mm y el daño corresponde a 1,3% de la sección. Seguidamente estas probetas fueron sumergidas de nuevo en el líquido penetrante para que pudiera penetrar mejor el líquido a través de las delaminaciones interlaminares e intralaminares como se observa en a). En b) se observa que a cada una de las probetas se realizaron cortes seccionales en las zonas del

impacto marcando con una diagonal para mantener la secuencia de las secciones transversales. Con la ayuda del software Rhinoceros como se ve en c), se identificaron las diferentes capas y se modelizaron en 3D las delaminaciones de acuerdo a las marcas fosforescentes que indicaban que la tinta había marcado separación entre capas para cada una de las secciones. Realizado esto, se colocaron las secciones en cada una de las distancias obtenidas por los cortes en b) y se modelaron las delaminaciones por capas uniendo las delaminaciones secciones. Esto permitió como se ve en c), identificar en las probetas de 60 x 60 mm el conjunto total de delaminaciones para hacer comparaciones visuales.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Paneles sin modificar

Los paneles fabricados fueron inspeccionados mediante la técnica de ultrasonidos y no se encontró un número superior de defectos que los generados en el proceso de curado. Por lo tanto, fueron utilizados para los ensayos.

En la Figura 4 se observa la generación de daño en la cara de impacto y en la cara contraria al impacto para las diferentes energías aplicadas. Las manchas generadas en el impacto debido a las delaminaciones ocasionadas presentan direcciones preferentes según la urdimbre del laminado.

En la Figura 5, se observan los resultados del ensayo tras dos impactos consecutivos a 130 J o de alta energía. Se aprecia que el primer impacto es completamente destructivo perforando el material,

aunque sin llegar a traspasarlo. En la cara posterior se produce un daño considerable provocando la delaminación en la dirección de la urdimbre. Después del segundo impacto se consigue una penetración completa del impactador. La delaminación es muy grande y se produce rotura de la matriz en los alrededores del impacto.

La caracterización con líquidos penetrantes de los paneles ensayados con un solo impacto reveló delaminaciones bajo la luz ultravioleta.

En la Figura 6 se observa con detalle secciones transversales de la zona de impacto de paneles GFRP utilizando líquidos penetrantes fluorescentes, para

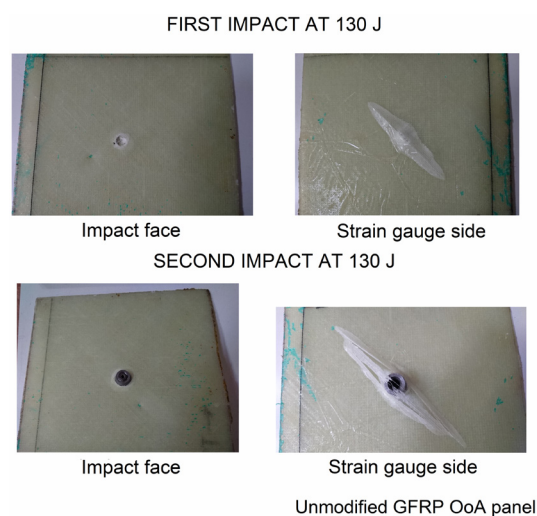


Figura 5. Panel sin modificación sometido a dos impactos consecutivos de 130 J.

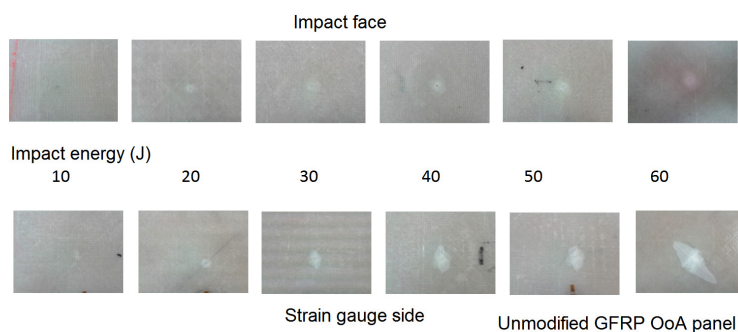


Figura 4. Ensayos de impacto por caída de peso por gravedad de 10 a 60 J de energía a paneles sin modificar.

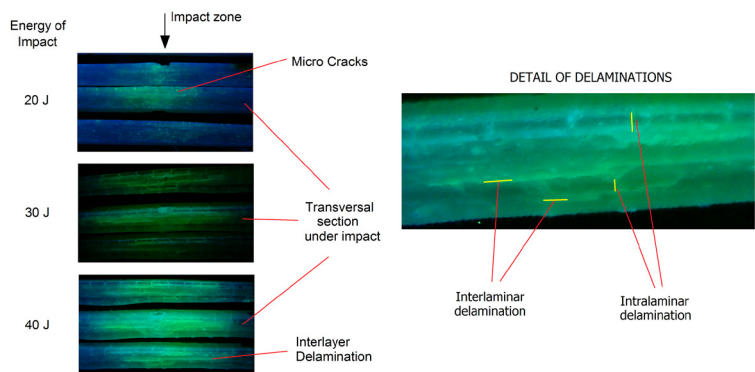


Figura 6. Detalle de la sección transversal del panel GFRP en la zona de impacto con liquido penetrante fluorescente.

impactos con energía de 20, 30 y 40 J respectivamente. En todas ellas es posible ver las delaminaciones interlaminares y también la presencia de microgrietas en la imagen obtenida después del impacto a 20 J.

En la Figura 7 podemos apreciar la gran semejanza que existe entre un panel impactado antes y después de haber sido modelizado sus delaminaciones en 3D.

A partir de los datos obtenidos por el gravitómetro se pudieron obtener las curvas de energía absorbida frente (vs) al tiempo. La curva presenta un máximo de energía absorbida correspondiente a la sucesiva rotura de capas del laminado para posteriormente

decrecer cuando el panel comienza a relajarse después del impacto. En la Figura 8 se observa la curva de la energía absorbida frente (vs) al tiempo para el impacto de 30 J.

En la Figura 9 se representa la comparativa entre la gráfica obtenida fuerza vs desplazamiento para un impacto a 30 J y la modelización de las capas del laminado en 3D. Se identifican los puntos en los cuales las capas se separan y producen cambios en la fuerza. En el caso de este ensayo la identificación de los puntos de mayor rotura resulta más difíciles de identificar debido a la aparición de delaminaciones escalonadas que unen la matriz con la adherencia de las capas. En la primera tela de preimpregnado fabricado con 3 capas, los daños corresponden exclusivamente a la matriz para la capa 1 y la 2. De la capa 2 a la 3, hay una delaminación importante pese a ser de la misma tela del grupo. Esta se une con la rotura de la matriz anterior dando una

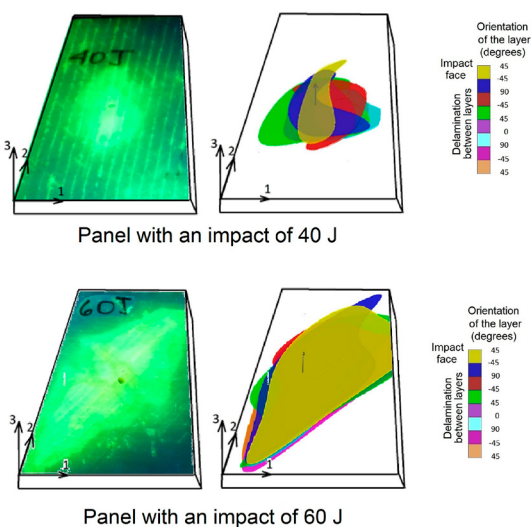


Figura 7. Comparativa entre panel impactado y panel con delaminaciones en 3D para 40 y 60 J.

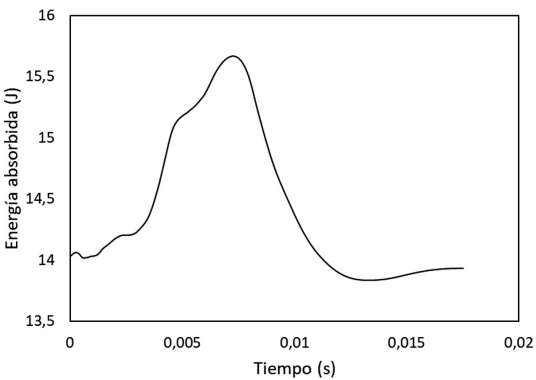
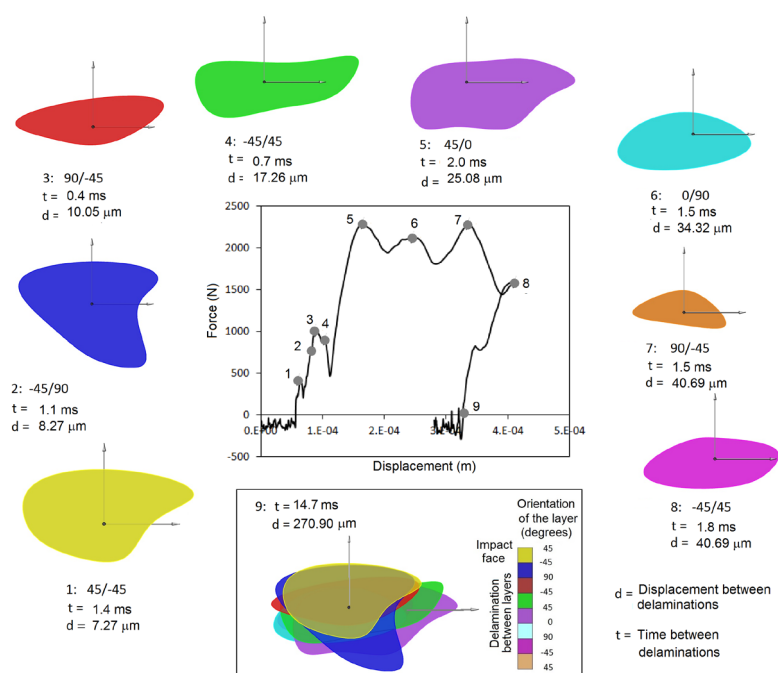


Figura 8. Curva de Energía absorbida vs tiempo para el impacto a 30 J.



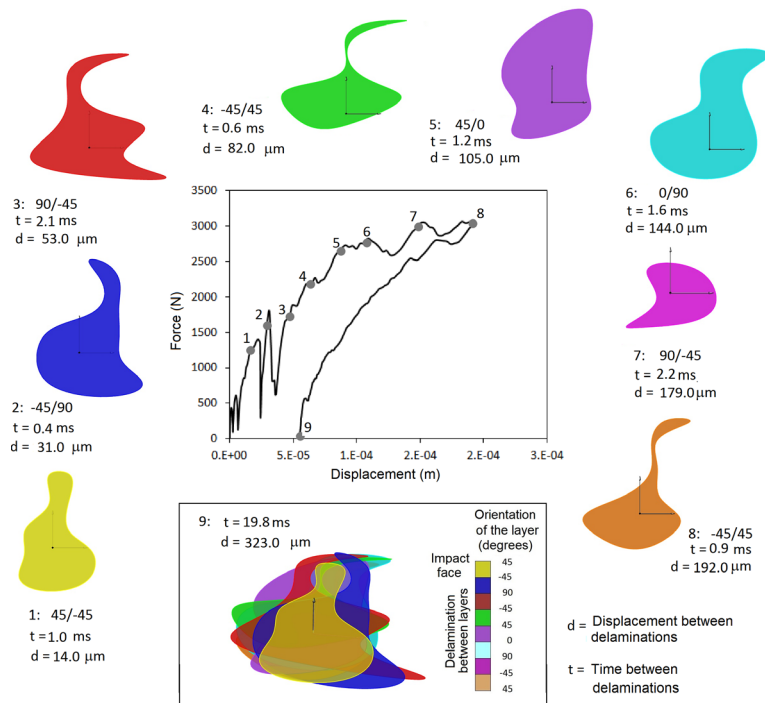


Figura 10. Comparativa entre fuerza vs desplazamiento y la modelización 3D de las capas del laminado para un impacto a 50 J.

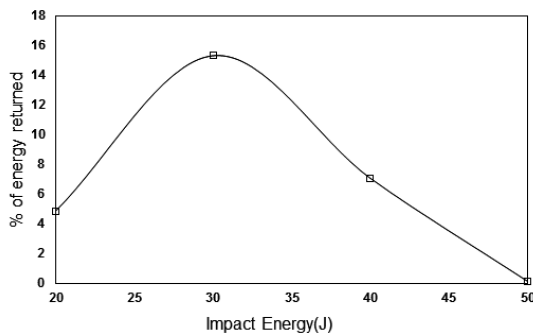


Figura 11. Porcentaje de la cantidad de energía devuelta después del impacto vs a la energía de impacto.

impactador, lo cual no se produjo. La altura del rebote fue disminuyendo en cada impacto debido al daño acumulado por el material. En la Figura 13 se observan los resultados de los 3 impactos sucesivos en los cuales se aprecia rotura en la cara del impacto y en la cara opuesta el daño ocasionado se orienta en la dirección del laminado de la capa exterior.

Con el ensayo de líquidos penetrantes fluorescentes realizado a paneles impactados con 40 y 80 J,

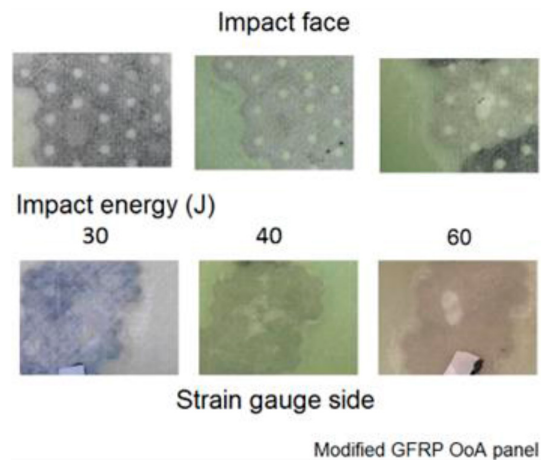


Figura 12. Ensayos de impacto a 30 y 60 J de energía sobre paneles modificados con capa viscoelástica.

fue posible observar las capas del laminado que están situadas por encima de la capa viscoelástica. Estas láminas aparecen rotas debido al golpe del impactador, llegando a deformar a la capa viscoelástica tal y como aparece en la Figura 14. En el panel impactado a 40 J también se puede

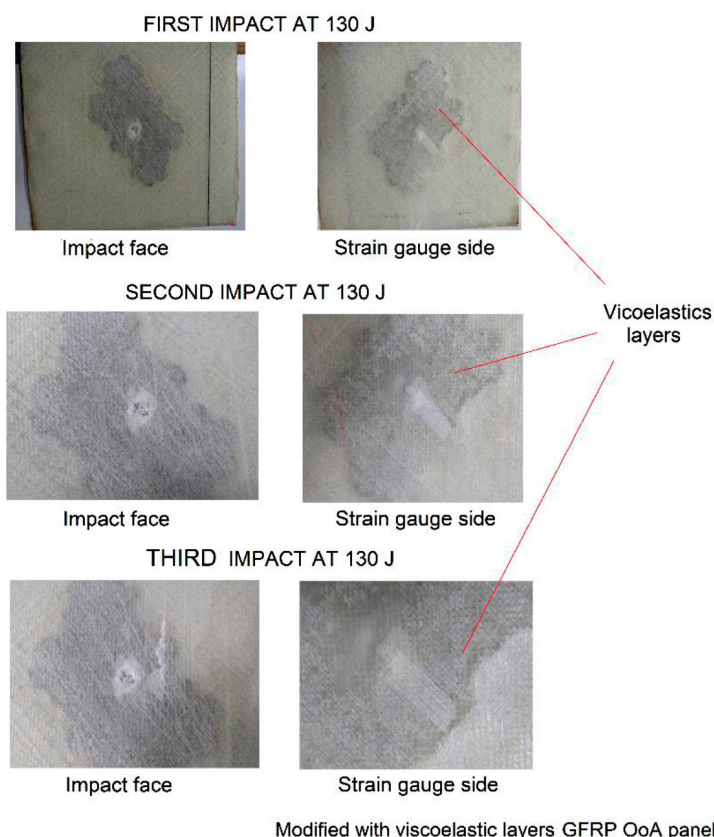


Figura 13. Panel modificado con tres impactos sucesivos a 130 J de energía.

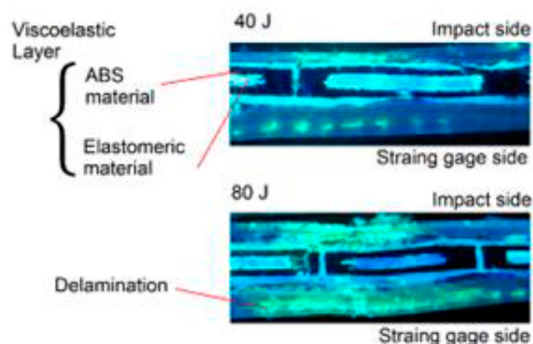


Figura 14. Comparación de la sección transversal del panel GFRP modificado en la zona de impacto con líquido penetrante fluorescente.

observar que las capas situadas por debajo de la capa viscoelástica presentan pocas delaminaciones, lo que implica una disminución brusca del daño.

La modelación en 3D nos permite de reproducir en qué forma se han delaminado las capas tras un impacto y los resultados se han relacionado con los valores Fuerza vs Desplazamiento del correspondiente ensayo de impacto. En la Figura 15 podemos observar que, para un impacto a 40 J, la acción de la capa viscoelástica se manifiesta de manera significativa ya que produce una disminución de la fuerza por la absorción de energía haciendo que el daño luego de la capa número cuatro sea menor que el de la capa 3 antes del viscoelástico. Con el impacto a 40 Joules se observa que la matriz presenta un daño considerablemente amplio en cuanto a microgrietas y roturas generalizadas. Como se observa en la Figura 14, los escalonamientos correspondientes a las delaminaciones entre capas se difuminan con las manchas de daño generalizado en la matriz. En la primera tela de 3 capas de preimpregnado se observa que en las capas 1 y 2 ha poco daño difuminado y en la capa 3 debido a la ortotropía del material presenta roturas verticales en la matriz. La unión del primer

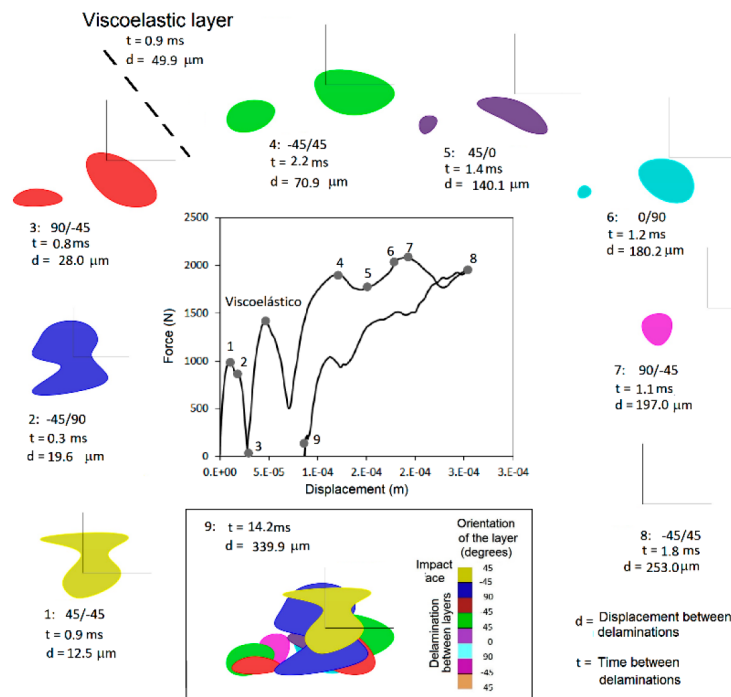


Figura 15. Delaminaciones producidas por un impacto a 40 J en un panel modificado con capa viscoelástica.

grupo de tela preimpregnada con la segunda, presenta una delaminación importante que se propaga hacia las siguientes capas del laminado. El viscoelástico presente entre las capas 3 y 4, eleva la fuerza de impacto, pero la disipa bajando la vertical de la curva. Este cambio en la fuerza es el efecto de la lámina, la cual permite observar que las fuerzas de respuesta del laminado vuelven a valores iniciales. Las capas 4, 5 y 6 de este grupo de telas tiene un daño total y la matriz se encuentra completamente rota. Esto corresponde a la capa 4, 5 y 6. Entre las segunda y tercera tela de preimpregnado, observamos que el daño disminuye y se presenta mayormente en forma de delaminaciones con roturas verticales de la matriz en forma escalonada. A este nivel de impacto, la capa 9 se ha roto en mayor sección por la flexión mayor durante la deformación. Por el nivel de daño en las capas centrales, se aprecia que ha habido buena adherencia entre telas de preimpregnado resistiendo muy bien la cohesión durante el curado. En la gráfica se muestran los tiempos y distancias de la deformación entre puntos importantes, como referencia de que se encuentran dentro de los rangos medidos por el acelerómetro y para tener un registro de los tiempos en los cuales los daños indicados se producen.

En el impacto a 80 J, la fuerza aplicada produce un mayor daño después de la capa 3, es decir donde se encuentra la capa viscoelástica puesto que se registran valores que indican que continua la delaminación. En la Figura 16 se puede ver como la capa viscoelástica absorbe la fuerza de impacto iniciando el proceso de delaminación desde un valor menor de fuerza lo que produce menos daño.

A partir de los ensayos realizados se calculó el porcentaje de energía devuelta para cada uno de los paneles después del impacto. Estos datos se muestran en la Figura 17 y se observa que el panel que ha sido impactado a 40 J va perdiendo su capacidad de devolver energía y se esta se consume en producir un mayor daño. En el ensayo realizado a 130 J el panel todavía es capaz de devolver energía que se transforma en rebote.

DISCUSIÓN

El impacto vertical de slamming genera daño a los cascos de las embarcaciones de GFRP a base de preimpregnado curados OoA en la forma como se reprodujo el golpe en los ensayos presentados. Esta evolución del daño para impactos a bajas energías

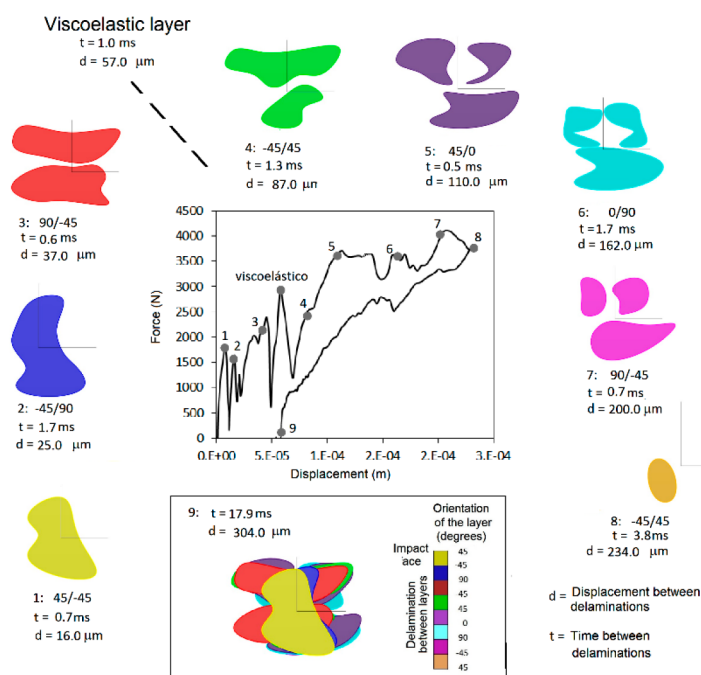


Figura 16. Delaminaciones del impacto a 80 J de un panel modificado con capa viscoelástica.

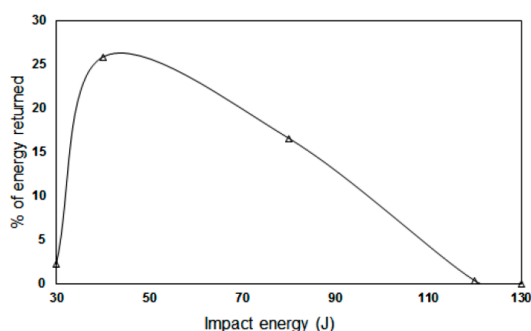


Figura 17. Porcentaje de energía devuelta por lo paneles modificados con capa viscoelástica.

se convertirá en daño a grandes energías luego de un evento de fatiga ya que el fenómeno mencionado es cíclico y su aparición de microgrietas evoluciona como en las reproducciones de la investigación antecedente [6].

La caracterización por tintas penetrantes fluorescentes permitió observar físicamente como el daño no se propaga de igual forma bajo las capas de la lámina viscoelástica, mezclándose este daño entre el golpe de

impacto y la tensión normal por la flexión del panel en la cara de tracción. En la Figura 18 se muestran dos secciones de corte en la zona del impacto ya caracterizadas de un panel sin modificar y uno modificado, impactados ambos a 40 J. En el panel sin modificar los daños interlaminares e intralaminares se enlazan produciendo roturas interiores en el laminado y separaciones importantes a la matriz. La influencia de la tensión en la cara de tracción se difumina y prevalece la fuerza del impactador que va rompiendo en forma vertical el compuesto.

En cambio, en el impacto del panel modificado viscoelásticamente se observa que el nivel de daño en la parte superior del laminado donde fue el golpe vertical de impacto tiene una diferencia de daño mucho mayor que la cara inferior donde las grietas interlaminares e intralaminares no pudieron llegar a enlazarse para formar los típicos escalones. La energía de impacto definitivamente fue absorbida por la lámina viscoelástica y esta concentró las tensiones convirtiéndose en mayor energía devuelta por el panel.

Considerando un impacto de más baja energía cercana al umbral de la máxima capacidad del panel de devolver energía, se muestra en la Figura 19, la

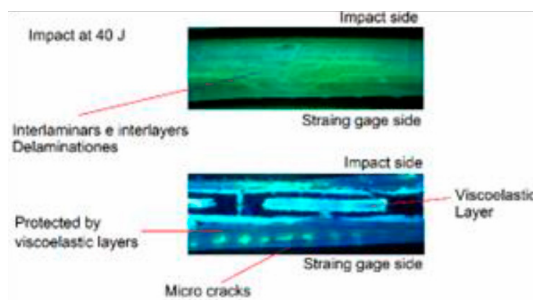


Figura 18. Comparación de la sección de impacto por caída de peso a 40 J caracterizado con tintas penetrantes fluorescentes.

curva de fuerza versus desplazamiento de un impacto a 30 J sin modificar y modificado. Las fuerzas que se generan a medida que se van rompiendo las capas resultan ser aproximadamente 35% mayores para el panel sin modificar, lo cual es el indicativo de que los daños se propaguen más al interior del laminado. Se puede observar claramente como la presencia de la lámina viscoelástica alrededor de los 5×10^{-5} m de desplazamiento del impactador hace que decaiga la fuerza bajando su valor total. La influencia de la dirección de las capas también está presente ya que hay similitud de variaciones en ambas curvas, pero de diferente magnitud.

En las probetas impactadas se puede observar bajo la luz fluorescente que sobre los 40 J los daños pasan a ser destructivos. Cabe destacar que en los paneles sin modificar no solamente tiene delaminaciones sino desgarramiento de las capas en la cara del impacto, mientras que en los paneles modificados viscoelásticamente no se presentan daños con

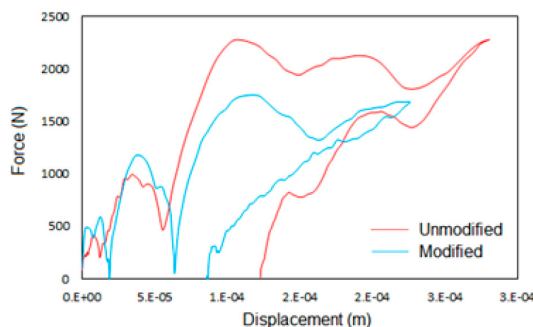


Figura 19. Comparación de la fuerza versus desplazamiento para impactos de 30 J a paneles modificados y sin modificar.

desgarramiento en las capas luego de la lámina indicada. Esto es un indicativo de la absorción de la energía que se transforma en menos daño y por ende en protección al laminado. Así mismo se observa claramente la influencia de la modificación en la curva no solo en los valores de tensión, sino en el tiempo que demora la deformación y la restitución del panel. Esto permite que las tensiones se distribuyan de mejor forma en la cara de tracción. El efecto de la lámina viscoelástica a un desplazamiento de 5×10^{-5} m es claramente observable como se ve en la Figura 20 en el cual el impacto de 80 J, el cual amortigua la fuerza de impacto llevándola a un nivel próximo al impacto de 50 J. Este efecto de amortiguamiento se convierte en energía devuelta que protege al panel modificado de la evolución de las microgrietas y que se convierta en delaminaciones escalonadas intercapas.

De acuerdo con estos resultados, al comparar el perfil de energías devueltas como lo es el caso de las curvas presentadas en la Figura 21, el pico de

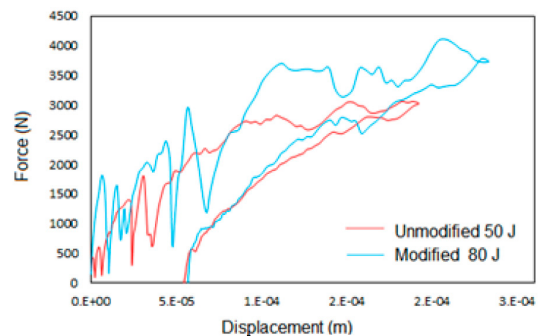


Figura 20. Comparación de la curva de fuerza versus desplazamiento para impactos de 50 J sin modificar y 80 J modificado.

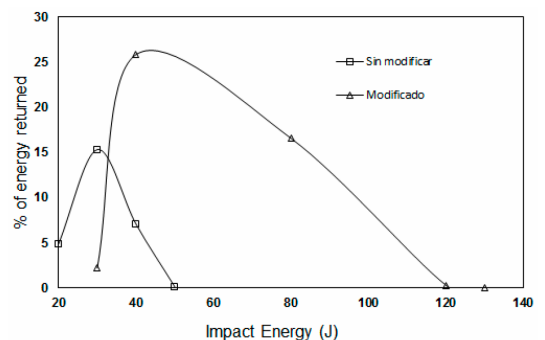


Figura 21. Comparación de energía devuelta tras impactos por caída de peso.

máxima energía que devuelve el panel es mayor en el modificado con alrededor a 20 J, y su pendiente de disminución de porcentaje de energía devuelta permite que esta haya hasta valores de gran energía como lo son 120 a 130 J. Esta capacidad del viscoelástico queda claramente comprobada con este resultado y está ligado directamente con la aparición y evolución de las microgrietas. La vida útil del material al estar relacionada con los impactos de slamming repetitivos durante la navegación, significa que en menor grado las microgrietas evolucionaran en las capas inferiores enlazándose hasta forma delaminaciones luego de una secuencia mayor de ciclos.

La introducción de una capa viscoelástica en el panel de GFRP de una embarcación, protege el casco de los impactos destructivos de slamming, y de acuerdo a su intensidad y frecuencia prolongará la vida útil del laminado evitando la disminución de su resistencia residual al convertirse en un fenómeno de altos ciclos.

CONCLUSIONES

La metodología aplicada mediante la observación de daño por caída de peso, asociada a la tendencia de la curva fuerza versus desplazamiento, tienen relación directa con el fallo interno dentro del laminado del material compuesto a partir de una perspectiva de la micromecánica. Esto permite predecir observar la aparición de las mesogrietas, la microfisuración en la matriz, la desunión de las fibras, la retirada de la fibra, y la delaminación. El equipo empleado fue adecuado para realizar ensayos de impactos de slamming verticales de baja energía en la cual las microgrietas se van alineando en forma interlaminar, para al convertirse en impactos de mediano nivel de energía producir daño intralaminar.

Al insertar una lámina viscoelástica en los paneles de GFRP (OoA pre-impregnado) es posible mitigar efectivamente el daño por golpeo. La combinación de polímeros en la lámina tiene una alta capacidad de deformación formando pequeñas células hexagonales, con paredes de un segundo polímero más rígido, efectivamente amortigua los impactos. El avance del daño es parcialmente aislado por la lámina protectora protegiendo las capas de material compuesto por debajo de la zona

afectada. La caracterización por tintas penetrantes fluorescentes permitió observar físicamente como el daño no se propaga de igual forma bajo las capas de la lámina viscoelástica, mezclándose este daño entre el golpe de impacto y la tensión normal por la flexión del panel en la cara de tracción. Se observó que el nivel de daño en la parte superior del laminado donde fue el golpe vertical de impacto tiene una diferencia de daño mucho mayor que la cara inferior donde las grietas interlaminares e intralaminares no pudieron llegar a enlazarse para formar los típicos escalones.

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

La propuesta sobre la modificación viscoelástica y los resultados obtenidos, abren un gran campo para continuar la investigación en esta línea con el propósito de optimizar las prestaciones transmitidas al material circundante, así como su participación como parte de un todo en el material compuesto. Al insertar una lámina viscoelástica en los paneles de GFRP es posible mitigar efectivamente el daño por impactos. La combinación de polímeros con alta capacidad de deformación formando pequeñas células hexagonales, con paredes de un segundo polímero más rígido, amortigua los impactos. Las deformaciones están 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, protegiendo así la estructura del casco y aumentando la vida útil del barco. Es importante considerar de acuerdo con lo observado en las gráficas 3D, que resulta importante colocar adhesivos que impidan la delaminación de la capa viscoelástica durante el proceso de curado. La energía superficial de los polímeros es un factor importante para la adhesión. En el caso de los materiales empleados en la lámina viscoelástica de la presente investigación, estos resultaron compatibles con los GFRP.

REFERENCIAS

- [1] H. Wagner. "Über Stoß- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten". ZAMM. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik. Vol. 12 Issue 4, pp. 193-215.1932. DOI:10.1002/zamm.19320120402.
- [2] G.K. Kapsenberg. "Slamming of ships: Where are we now?". Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. 369 Issue 1947, pp. 2892-2919. 2011. DOI: 10.1098/rsta.2011.0118.
- [3] P. Tamayo-Meza, A.S. Ovchinsky, J.M. Sandoval-Pineda, L.A. Flores-Herrera y R. de G. González Huerta. "Estudio de la dinámica de los procesos de fractura y de delaminación en materiales reforzados con fibras". Revista Facultad de Ingeniería Universidad Antioquía. N° 70, pp. 119-131.2014.
- [4] A. Turon, J. Costa, P.P. Camanho and C.G. Dávila. "Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue". Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007. Vol. 38 Issue 11, pp. 2270-2282. 2007. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.11.009.
- [5] V.P.W. Shim and L.M. Yang. "Characterization of the residual mechanical properties of woven fabric reinforced composites after low-velocity impact". International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 47 Issue 4-5, pp. 647-665. 2005. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2005.01.014.
- [6] J.C. Suárez, P. Townsend, E. Sanz, I.D.D. Ulzurum and P. Pinilla. "The Effect of Slamming Impact on Out-of-Autoclave Cured Prepregs of GFRP Composite Panels for Hulls". Procedia Engineering. Vol. 167, pp. 252-264. 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.695.
- [7] C. Lopes, O. Seresta, Y. Coquet, Z. Gürdala, P.P. Camanhob and B.Thuise. "Low-velocity impact damage on disperse stacking sequence laminates. Part I: experiments". Composite Science Technology. Vol. 69 Issue 7-8, pp. 926-936. 2009. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.02.009.
- [8] A. Ahmed and L.J. Sluys. "A numerical study on interacting damage mechanisms in FRP laminated composite plates". Heron. Vol. 58 Issue 1. 2013.
- [9] S. Abrate. "Impact on laminated composite materials". Applied Mechanics Reviews. Vol. 44 Issue 4, pp. 155-190. 1991. DOI: 10.1115/1.3119500.
- [10] C.S. Lopes, P.P. Camanho, Z. Gürdal, P. Maimí and E. V. González. "Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations". Composites Science and Technology. Vol. 69 Issue 7-8, pp. 937-947. 2009. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.02.015.
- [11] S. Elavenil and G.M.S. Knight. "Impact response of plates under drop weight impact testing". Journal of Science and Technology. Vol 7 Issue 1, pp. 1-11. 2012. DOI: 10.3329/diujst.v7i1.9580.
- [12] M. Grasso, F. Penta, G.P. Pucillo, F. Ricci and V. Rosiello. "Low velocity impact response of composite panels for aeronautical applications". 2015 Lecture Notes in Engineering and Computer Science, pp. 1138-1143. Londres, UK. 2015.
- [13] P.F. Liu and J. Y. Zheng. "Recent developments on damage modeling and finite element analysis for composite laminates: A review". Materials and Design. Vol. 31 Issue 8, pp. 3825-3834. 2010. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.03.031.
- [14] J.R. Maly and C.D. Johnson. "Cocured viscoelastic composites". Symposium Smart Structures and Materials, pp. 365-376. San Diego, USA.1996. DOI:10.1117/12.239104.
- [15] J.I.R. Blake, R.A. Shenoi, J. House and T. Turton. "Strength modelling in stiffened FRP structures with viscoelastic inserts for ocean structures". Ocean Engineering. Vol. 29 Issue 8, pp. 849-869. 2009. DOI: 10.1016/S0029-8018(01)00057-9.
- [16] K. Lavanya, P.V. Krishna, M.M.M. Sarcara and H.R. Sankar. "Analysis of the damping characteristics of glass fibre reinforced composite with different orientations and viscoelastic layers". International Conference on Mechanical and Civil Engineering. Vol.1 Issue 1, pp. 88-92. 2013.
- [17] P. Townsend, J.C. Suárez Bermejo, P. Pinilla and N. Muñoz "Is the Viscoelastic Sheet for Slamming Impact Ready to Be Used on Glass Fiber Reinforced Plastic Planning Hull?". Applied Sciences. Vol. 10 N° 18. 2020. DOI:10.3390/app10186557.