EVOLUCIÓN DEL DAÑO EN MATERIALES COMPUESTOS POR EFECTO DEL *SLAMMING* EN EMBARCACIONES RÁPIDAS

J.C. Suárez[*], I. Diez de Ulzurrun[*], C. Poveda[*], F.M. Rubio[**], L.M. Vos[**] y F. López[**]

*** ETS Ingenieros Navales, Dpto. de Arquitectura y Construcción Navales, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Arco de la Victoria, s/n, 28040 Madrid**

**** Escuela Politécnica Superior, Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad Carlos III, Avda. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid**

Resumen. El fenómeno de *slamming* se refiere a los impactos cíclicos de baja frecuencia que tienen lugar cuando el casco de una embarcación en movimiento choca contra la superficie libre del agua. Las embarcaciones rápidas fabricadas en materiales compuestos son especialmente sensibles a este fenómeno pues los impactos generan un daño en el material que va creciendo hasta producir el deterioro local del casco. Para estudiar la evolución del daño se ha diseñado un equipo de ensayo que permita reproducir en el laboratorio las condiciones en servicio de la embarcación, a la vez que acelerar los ensayos. Se han fabricado una serie de laminados representativos de este tipo de embarcaciones y se han ensayado con y sin defectos previamente introducidos, para poder estudiar por separado los fenómenos de generación y propagación del daño. La evolución del daño se ha seguido paso a paso mediante inspecciones por ultrasonidos en inmersión. La cuantificación se ha realizado utilizando técnicas de análisis de imagen sobre los registros obtenidos por C-Scan. Los resultados muestran las diferentes escalas temporales de los fenómenos de generación y propagación, así como la imposibilidad de acelerar los ensayos por encima de un cierto valor de frecuencia de impacto, ya que se produce un cambio drástico en el régimen de comportamiento del material.

Abstract. The term slamming refers to the low frecuency impacts of the hull of a moving ship against the water free surface. Fast ships manufacturated in marine composites are very sensitive to these loads becauses the impacts are able to cause damage to the material till a local macroscopic delamination trigger the catastrophic failure of the structure. A new test equipment has been developed to determine the slamming damage evolution, reproducing the in-service loads but accelerating the test protocols. A number of test coupons, representative of such a cathegory of fast ships, have been prepared and tested with and without previously inserted artificial deffects, in order to assess independently both the damage generation and propagation steps. Damage evolution has been surveyed –using C-scan ultrasounds– at different number of impacts accumulated on the material. Image analysis has been used to quantify damage levels in the test specimen, starting from the C-scan records. Results clearly show the differences in time scale for the generation and propagation steps, and also the neccesity to keep the impact frecuency during the testing below a certain threshold, otherwise a sharp change in the behaviour of the material invalidate the results.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de *slamming* está relacionado con las cargas cíclicas de impacto que tienen lugar cuando el casco de una embarcación choca contra la superficie libre del agua [1]. Este fenómeno se da en cualquier tipo de embarcación, pero su importancia es especialmente relevante en buques rápidos, tales como lanchas patrulleras, catamaranes de baja área de flotación (*swath*) o veleros de regata, y en especial en condiciones severas de mar.

El estado de carga afecta a todo el casco, si bien su acción se centra principalmente en la estructura del fondo del tercio de proa y en la quilla. Tras el impacto, se produce un pulso de presión elevado que alcanza típicamente valores de 2.000 kN/m^2 entre los 0,05 y 0,1 s, decayendo después de 0,2 s (ver Fig. 1) [2].

La presión máxima alcanzada en la zona de impacto y la frecuencia con que se producen dichos impactos depende, fundamentalmente, de tres variables:

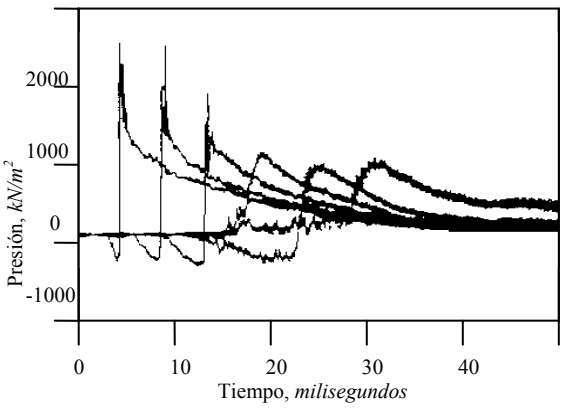


Fig. 1. Pulsos de presión en distintos puntos del casco por efecto de las cargas de *slamming*.

- La velocidad de la embarcación, *v* (normal a la superficie del mar)
- El ángulo de ataque de la superficie del casco respecto a la superficie libre del agua (ver Fig. 2).
- Las dimensiones del panel y las condiciones de contorno (posición y distancia entre refuerzos)

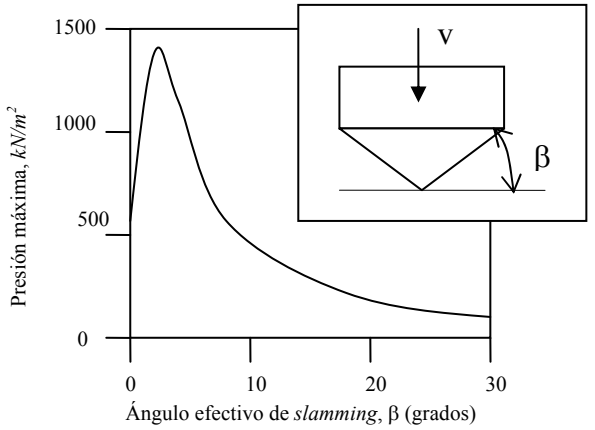


Fig. 2. Relación entre el pico de presión y el ángulo efectivo de *slamming*, β, para un casco en forma de "V".

El análisis dimensional sugiere [1] que el pico de presión durante el impacto de un casco en forma de "V" durante el *slamming* viene dado por (1):

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho v^2 \tag{1}$$

donde C_p es el coeficiente de presión de *slamming*, que es función del ángulo β según la ecuación (2) derivada por Wagner (1932) para valores de β inferiores a 25º:

$$C_p = 1 + \left(\frac{\pi \cot \beta}{2} \right)^2 \tag{2}$$

El efecto de las cargas de *slamming* sobre el material de que está fabricado el casco es un aspecto determinante desde el punto de vista de la seguridad y de la vida en servicio que cabe esperar de la embarcación. Cuando el material empleado para la construcción del casco es un material compuesto de matriz polimérica y refuerzo de fibras de vidrio, las tensiones transitorias que se generan en el laminado producen un daño en el material que va acumulándose hasta devenir en una discontinuidad microscópicamente significativa que, eventualmente, desemboca en el fallo catastrófico por delaminación de un área extensa [3].

Existen numerosos estudios acerca de la influencia del tipo de matriz y refuerzo sobre la tenacidad a fractura interlaminar, estática y dinámica, de materiales compuestos para aplicaciones navales [4-6] e incluso sobre la degradación de dichas propiedades en ambiente marino [7]. Sin embargo, los fenómenos de generación y propagación de daño por efecto de *slamming* en materiales compuestos no son aun suficientemente bien comprendidos. Esto es debido, en primer lugar, a la dificultad para obtener datos experimentales fiables. Obtenerlos de medidas a bordo de embarcaciones, en condiciones de servicio reales, requiere una instrumentación extensiva utilizando acelerómetros, sensores de presión y galgas para la determinación de las tensiones en distintos lugares del casco. Además, para poder estudiar la generación y evolución del daño en el material se precisan campañas de toma de datos muy prolongadas y, en todo caso, siempre se depende de las condiciones de mar en que se realicen las medidas.

Se han intentado realizar ensayos de laboratorio para poder reproducir las condiciones de *slamming* de una manera controlada y repetitiva. Los ensayos se han realizado con modelos a escala y dejando caer desde distintas alturas el casco, con una cierta inclinación, sobre la superficie del agua [8]. Este procedimiento resulta útil para simular sucesos individulizados, y establecer las condiciones a partir de las cuales se puede empezar a detectar un daño apreciable en el casco, pero no es adecuado para estudiar el proceso de generación y evolución del daño por efecto de sucesos múltiples de impacto.

Se han desarrollado diversos modelos de dañado en un intento de comprender las relaciones entre las escalas micro-meso-macroscópicas, pero hasta el momento actual el proceso completo no es bien entendido. Alguno de los modelos se basa en el planteamiento de energía disipada, propuesto por *Mast* y colaboradores [9]. La ventaja que presenta es que no requiere la determinación de parámetros empíricos del material, que lo convertirían en válido para un estrecho abanico de materiales. En su contra está el hecho de ser aplicable sólo a condiciones de carga estáticas o quasi-estáticas y también el excluir efectos dependientes de la velocidad de deformación, tales como la respuesta viscoelástica de la matriz. No obstante, la mayoría de los modelos de dañado para materiales compuestos se basan en una aproximación fenomenológica, donde es necesario estimar mediante una serie de experimentos pertinentes un cierto número de parámetros específicos para el material compuesto objeto de estudio [10]. Siguen existiendo problemas para incorporar el comportamiento viscoelástico de la matriz.

La determinación de los parámetros del modelo requiere la realización de ensayos largos y costosos, en condiciones controladas y representativas de las condiciones en servicio. En el presente trabajo, se propone una metodología para la realización de ensayos acelerados de *slamming* sobre probetas de dimensiones reducidas. Se propone el diseño de un dispositivo de

ensayo específico a tal fin, una metodología para la determinación del daño mediante ensayos no destructivos y su cuantificación mediante análisis de imagen. Asimismo, se presentan los resultados de ensayos correspondientes a la fase de generación [11] y propagación [12] del daño y se estudian las condiciones a partir de las cuales no es posible acelerar más los ensayos sin cambiar el régimen de fallo del material.

2. MATERIALES, EQUIPOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Se han preparado ocho paneles de material compuesto monolítico, constituido por tejido de fibra de vidrio E (TRB 600-140, *Saint-Gobain Vetrotex*) con un grameje de 800 gr/m^2, y matriz de resina vinilester (EPOVIA RF-101 MV, *Cray Valley*) mezclada con catalizador (C-210, *Plastiform*) para acelerar el proceso de curado.

Los paneles, con unas dimensiones de 270 x 270 mm, se laminan sobre una plancha metálica a la que previamente se ha aplicado un agente desmoldeante (Cera desmoldeante F.C.A., *Plastiform*). Tras alcanzar un espesor de 23 capas, representativo de ciertas zonas del casco, se aplica una última capa de acabado superficial (Gel coat CRONOGEL BL-01 activado, *Plastiform*). Se introducen los laminados en una estufa para asegurar una temperatura de curado uniforme de 50 ºC que se mantiene durante dos horas, y se aplica una presión ligera con pesos para facilitar el flujo de la resina y ayudar a que se rellenen completamente todos los intersticios.

Tras el desmoldeo y recanteado final se obtienen paneles de 240 x 240 x 16 mm. A cuatro de los ocho paneles se les introdujo un disco de teflón de 20 mm de diámetro entre la tercera y cuarta lámina contando desde la superficie exterior, para simular un daño macroscópico de partida (delaminación) y poder estudiar su evolución desligándola del proceso de generación del daño.

Todos los paneles fueron sometidos a una inspección mediante ultrasonidos por barrido en inmersión, utilizando la técnica de la placa reflectante y obteniendo una representación C-scan, con asignación de un código de colores en función de los distintos niveles de porosidad en el laminado. De esta manera se puede controlar el estado inicial de cada laminado. Asimismo, se determinó el contenido inicial en poros –en pequeños fragmentos obtenidos de cada laminado por corte– mediante el procedimiento destructivo de calcinación de la matriz según norma CASA I+D-E-124. Se realizaron también ensayos para obtener el módulo elástico de los laminados, según norma CASA I+D-E-253.

Ha sido necesario construir un equipo para realizar el ensayo de impacto cíclico en condiciones que fueran representativas de las observadas en condiciones de servicio, ver Fig. 1, pero a frecuencias superiores a las observadas en condiciones reales –por debajo de 1 Hz– para poder acelerar los ensayos. Se partió de una máquina de fatiga por flexión alternativa y se acopló al eje del motor una leva que es la encargada de golpear contra el laminado a la frecuencia seleccionado en el controlador del equipo. Un cuidadoso diseño de la geometría de las levas permite reproducir los pulsos de presión de *slamming* medidos en embarcaciones reales. La ecuación de la curva cicloidal, ascendente y descendente, de la leva es:

$$\delta = L_i + L\left[\frac{\theta}{\beta} - \frac{1}{2\pi} sen\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right)\right] \quad \text{ascendente} \tag{3}$$

$$\delta = L_i - L\left[\frac{\theta}{\beta} - \frac{1}{2\pi} sen\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right)\right] \quad \text{descendente} \tag{4}$$

donde β es el valor del ángulo donde la altura es máxima (180º para nuestro caso), δ es la altura que alcanza la curva para cada ángulo θ a lo largo de todo su perímetro, L_i es la altura inicial de la leva en el punto de partida (0 para la sección ascendente y 5 para la descendente) y L es la máxima altura alcanzada. En la Fig. 3 se puede apreciar el recorrido efectuado por el punto de máxima altura en la leva.

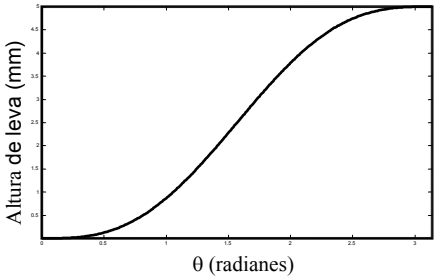


Fig. 3. Ascendente de la cicloide de la leva.

El laminado se coloca en un marco de ensayos que lo sujeta en todo su perímetro, intentando reproducir las condiciones de contorno correspondientes en la embarcación a la presencia de refuerzos longitudinales y transversales. El marco se puede acercar o alejar a la leva, variando de esta manera la energía asociada al impacto que es transmitida al panel de ensayo. La Fig. 4 muestra una imagen del equipo de ensayo.

La frecuencia de impacto se varió entre 4 y 9 Hz, y el número de ciclos que se contabilizaron fue de hasta 100.000 impactos. La Tabla 1 muestra las condiciones de todos los ensayos realizados.

Tras cada escalón de ciclos acumulados, los paneles eran retirados del marco de ensayo y vueltos a someter a una inspección por ultrasonidos para determinar la progresión del daño en el material. A continuación se volvían a someter a otro nuevo periodo de impactos y así hasta completar el número total de ciclos planeados. Los registros de C-scan eran sometidos a un proceso de

análisis de imagen (*Image Pro-plus*) para cuantificar el porcentaje y la evolución de los distintos colores de la imagen, que se corresponden con los distintos niveles de daño en el laminado.

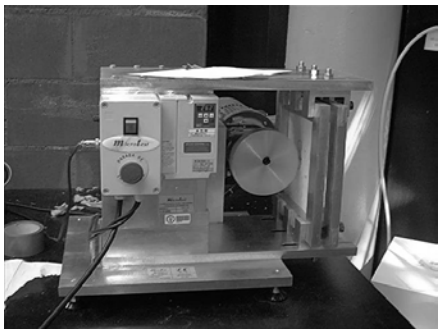


Fig. 4. Máquina de ensayo para impacto cíclico

	Ciclos	4 Hz	6 Hz	8 Hz	9 Hz
Sin defecto introducido	**10.000**	10_4/s	10_6/s	10_8/s	10_9/s
	30.000	30_4/s	30_6/s	30_8/s	30_9/s
	60.000	60_4/s	60_6/s	60_8/s	60_9/s
	100.000	100_4/s	100_6/s	100_8/s	100_9/s
Con defecto introducido	**10.000**	10_4/c	10_6/c	10_8/c	10_9/c
	20.000	20_4/c	20_6/c	20_8/c	20_9/c
	40.000	40_4/c	40_6/c	40_8/c	40_9/c
	70.000	70_4/c	70_6/c	70_8/c	70_9/c

Tabla 1. Condiciones de ensayo para los paneles con y sin defecto introducido.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El contenido inicial en poros de los laminados, con las condiciones de procesado descritas en el apartado anterior, resultó estar entre 0,5 y 2,0 % en volumen para los distintos laminados. El contenido medio de fibra de refuerzo determinado experimentalmente fue de un 40 %, siendo el volumen restante ocupado por la matriz. El módulo de elasticidad determinado experimentalmente fue de 17 MPa.

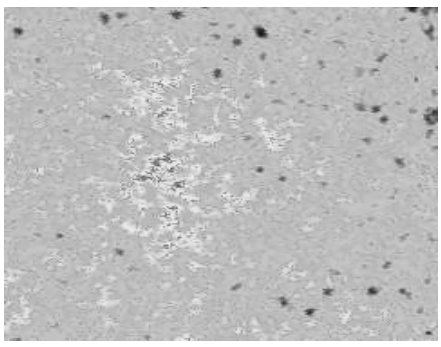


Fig. 5. a. Panel de ensayo con defecto preexistente: situación de partida. Ultrasonidos, C-scan.

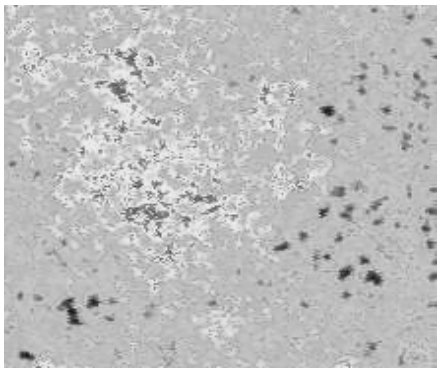


Fig. 5. b. Panel de ensayo con defecto preexistente: situación tras 10.000 ciclos de impacto. Ultrasonidos, C-scan.

La Fig. 5 muestra como ejemplo uno de los registros C-scan de la inspección por ultrasonidos de uno de lo paneles ensayados: la Fig. 5.a. muestra el estado inicial del laminado con el disco de teflón introducido; la Fig. 5.b. muestra la probeta tras recibir 10.000 ciclos de impacto.

Sobre los anteriores registros se realizó un análisis de imagen para poder apreciar la evolución del daño en el material. El programa de análisis de imagen segmenta toda la gama de colores agrupándola en hasta siete niveles, asimilables a siete grados distintos de dañado, y recuenta el número de píxeles de cada color refiriéndolo al número total de píxeles de la imagen. La Fig. 6 muestra un histograma con la evolución de uno de los niveles. Las medidas están normalizadas al valor del mismo nivel de daño en la situación de partida, para apreciar con más claridad si el valor está aumentando o disminuyendo.

Si observamos a la vez la evolución de todas las componentes o niveles de daño en un panel de ensayo, se puede apreciar como a medida que se van acumulando ciclos de impacto el peso relativo de las zonas con un nivel de daño más bajo va siendo cada vez menor mientras que crece el porcentaje de superficie ocupado por zonas con un nivel de daño más elevado, ver Fig. 7.

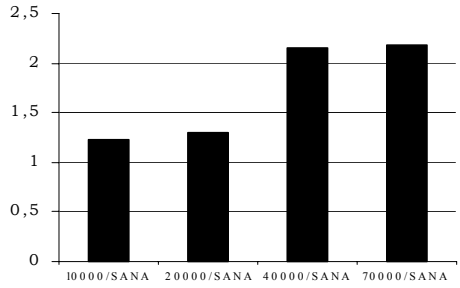


Fig. 6. Histograma que muestra la evolución de uno de los niveles de daño a medida que el material va acumulando ciclos.

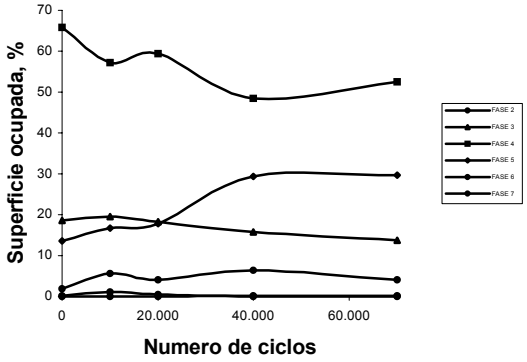


Fig. 7. Evolución del porcentaje del panel de ensayo afectado por cada nivel de daño en el material.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

De los resultados de los ensayos de impactos cíclicos realizados para todas las probetas ensayadas se pueden extraer algunas observaciones acerca de cómo evoluciona el daño en el material. En primer lugar, las zonas donde se produce el impacto de la leva no parecen corresponderse con los lugares donde la inspección ultrasónica muestra un nivel de daño más elevado. Tanto en el caso de paneles sin defecto de partida como en aquellos en los que se introdujo deliberadamente un disco de teflón para simular una discontinuidad preexistente, las zonas donde aparece el daño a medida que se acumulan ciclos de impacto perece seguir un patrón complejo. Para intentar relacionarlo con el estado de tensiones en el laminado, se realizó un modelo de elementos finitos –utilizando el programa MSC/ NASTRAN– y se obtuvieron distintas componentes de las tensiones para un evento único de impacto. No se intentó simular el proceso dinámico de impacto a una frecuencia determinada, sino únicamente la distribución de tensiones para un laminado de las mismas dimensiones y propiedades mecánicas cuando se le aplica una carga concentrada y se logra un desplazamiento máximo como el medido experimentalmente en el panel de ensayo.

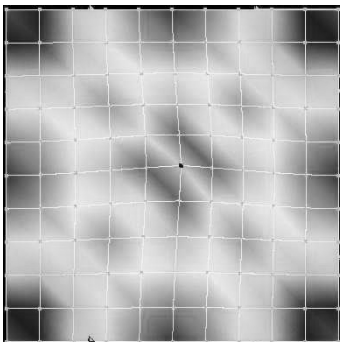


Fig. 8. Distribución de tensiones cortantes en un panel de ensayo calculadas por MEF.

La Fig. 8 muestra la distribución de tensiones cortantes. Se puede apreciar claramente como en la zona de aplicación de la carga las tensiones cortantes no son, efectivamente, tan elevadas como en las zonas circundantes. Aunque la distribución del daño en los paneles es más irregular que lo que muestra la imagen obtenida por elementos finitos, sí que se aprecia una tendencia a que el daño se concentre mayoritariamente en las zonas con un valor elevado de las tensiones cortantes.

Cuando se observan las gráficas de evolución de los distintos niveles de daño para todos los paneles –Fig. 7 y similares– se aprecia que en el caso de los laminados sin defecto introducido la evolución del daño es bastante regular hasta acumular 60.000 ciclos, valor a partir del cual el daño se incrementa exponencialmente. Para el caso de los paneles con defecto introducido desde el comienzo del ensayo el incremento brusco del daño se observa desde los 40.000 ciclos. Podemos concluir a partir de estos datos que la fase de generación de daño tiene una duración aproximada de 20.000 ciclos, mientras que la fase de propagación del defecto macroscópico hasta alcanzar un tamaño crítico necesita de unos 40.000 ciclos. Se ve de esta manera la importancia de controlar el nivel inicial de daño del material, evitando durante el procesado la introducción de daños macroscópicos que acorten sensiblemente la vida en servicio de la estructura.

Otra cuestión importante es la influencia de la frecuencia de los impactos sobre la evolución del daño en el material. Si consideramos el porcentaje de uno de los niveles de daño para un número de ciclos acumulados constante pero alcanzados a distintas frecuencias de impacto, ver Fig. 9, se observa de forma más o menos generalizada que para frecuencias iguales o superiores a 8 Hz se produce un escalón brusco.

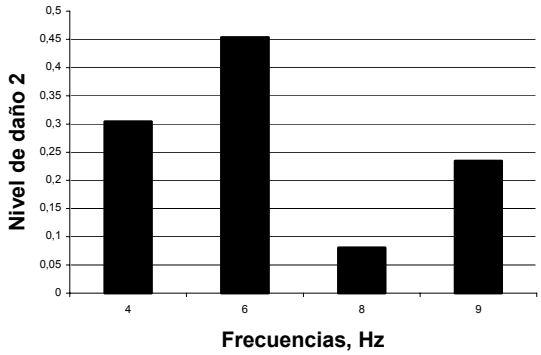


Fig. 9. Histograma con el nivel de daño 2 para cuatro paneles con 40.000 ciclos de impacto a distintas frecuencias.

El motivo puede estar relacionado con la propagación de la onda de compresión dentro del material y también con la onda de tensión reflejada desde la cara posterior del laminado. Para ciertos valores de la frecuencia de ensayo es posible que la propagación de estas ondas quede perturbada de tal manera que el nivel de daño provocado no sea representativo de las condiciones

reales de servicio para la estructura. No hemos profundizado en este aspecto todavía, pero sí que se puede concluir que, por precaución, no se deben acelerar los ensayos de *slamming* por encima de los 6 Hz –para las condiciones y los materiales con que se han realizado estos ensayos.

5. CONCLUSIONES

1. El equipo diseñado es capaz de reproducir en el material las tensiones producidas por el *slamming* y, en consecuencia, generar unos niveles de daño en el material equiparables a los obtenidos en condiciones de servicio.

2. No se deben realizar los ensayos acelerados a frecuencias superiores a los 6 Hz, ya que los resultados obtenidos no son representativos del comportamiento del material en las condiciones de servicio reales.

3. La distribución del daño en los laminados ensayados no coincide estrictamente con la zona de impacto. Se observa una correlación entre la distribución de tensiones cortantes en el panel y la acumulación del daño en el material.

4. La evolución del daño no es proporcional al número de ciclos de impacto acumulados, debido a que la generación de discontinuidades en el material (microfisuras, delaminaciones,...) aumenta la flexibilidad del panel, de manera que impactos posteriores generan comparativamente menos daño en el material que los impactos iniciales. El proceso es altamente no-lineal.

5. La fase de generación de daño microscópico se extiende a velocidad constante durante 20.000 ciclos, momento a partir del cual se tiene una discontinuidad macroscópica que se propaga durante otros 40.000 ciclos de forma estable, hasta alcanzar un tamaño crítico que dispara el fallo catastrófico de panel de ensayo.

REFERENCIAS

[1] Bereznitski, A. Y Postnov, V., "Hydroelastic model for bottom slamming", Proceedings of the 8th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS' 2001), China (2001).

[2] Chalmers, D.W., "Design of ship's structures", HMSO, Londres (1993).

[3] Shenoi, R.A. y Wellicome, J.F. (ed.), "Response of sandwich structures to slamming and impact loads" en "Composite Materials in Maritime Structures", Cambridge University Press, Reino Unido (1993).

[4] Compston, P., Jar, P-Y. y Davies, P., "Matriz effect on the static and dynamic interlaminar fracture toughness of glass-fibre marine composites", Composites Part B: Engineering, 29B (4), 505-516 (1998).

[5] Juska, T., Mayes, S. Y Seemann, W., "Mechanical properties and impact resistance of fabric reinforced vinyl ester", Proceedings of the Fouth International Conference on Marine Applications of Composite Materials, pp. D1-D16, Composites Education Association, Melbourne, Florida, EEUU (1992).

[6] Stroh, L.D., "The effects of resin and reinforcement variations on the impact resistance of a GRP boat hull laminate", Proceedings of the Fouth International Conference on Marine Applications of Composite Materials, pp. E1-E19, Composites Education Association, Melbourne, Florida, EEUU (1992).

[7] Siegmann, A., Sagi-Mana, D., Narkis, M., Joseph, R. y Dodiuk, H., "The effect of marine environment on a vinyl ester resin and its highly filled particulate quartz composites", Journal of Applied Polymer Science, 69 (11), 2229-2234, (1998).

[8] Hayman, B., Haug, T. y Valsgard, S., "Slamming drop test on a GRP sándwich hull model", Proceedings of the Second Conference on Sandwich Constructions, Vol. II, pp. 583-604, Engineering Materials Advisory Services, Gran Bretaña, (1992).

[9] Mast, P.W., Nash, G.E. Michopoulos, J., Thomas, R.W., Badaliance, R. y Wolock, I., "Characterization of strain-induced damage in composites based on dissipated energy density, Parts I, II y III", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 22, 71-96, 97-114, 115-136, (1995).

[10] Dyka, C.T., Badaliance, R.,"Damage in marine composites caused by shock loadings", Composites Science and Technology, 58 (9), 1433-1442, (1998).

[11] Vos, L.M., "Generación de daño en materiales compuestos por efecto de cargas cíclicas de impacto", Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III, Madrid, (2002).

[12] Rubio, F.M., "Propagación del daño macroscópico en materiales compuestos por efecto de cargas cíclicas de impacto", Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III, Madrid, (2002).