

12º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Guayaquil, 10 a 13 de Noviembre de 2015

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE CURA EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO DE LAMINADOS REFORZADOS

Sánchez Cruz M.L.*, Muller de Alemida S.F.°, Morales Martín L.Y.†

*Universidad Militar Nueva Granada – Facultad de Ingeniería, Carrera 11, No. 101 80, Bogotá D.C., Colombia

° Instituto Tecnológico de Aeronautica – Faculdade de Engenharia Mecanica, Praca Marechal Eduardo Gomes, 50, Sao Jose dos Campos, Brasil

† Universidad Militar Nueva Granada – Facultad de Ingeniería, Carrera 11, No. 101 80 Bogotá D.C., Colombia

*e-mail: martha.sanchez@unimilitar.educo

RESUMEN

La utilización de materiales compuestos laminados es cada vez más difundida en la ingeniería moderna, principalmente en proyectos estructurales que requieren alta resistencia, durabilidad y bajo peso. Debido a que el curado de estos materiales se realiza a elevadas temperaturas, usualmente aparecen en los mismos esfuerzos internos, que afectan su desempeño. Este trabajo analiza de forma numérica y experimental la influencia de la temperatura de cura aplicada en la fabricación de laminados de resina epóxica y fibras de carbono, en su respuesta mecánica. El estudio se basa en determinar las deformaciones transversales que ocurren en placas cuadradas reforzadas diagonalmente, cuando se aplica una fuerza de compresión uniformemente distribuida a lo largo de todo el borde superior de las mismas, variando la temperatura de cura de los refuerzos entre 20°C y 180°C. Las deformaciones fueron determinadas mediante una técnica óptica llamada topogrametría. Los resultados experimentales fueron comparados con resultados numéricos obtenidos con un programa de elementos finitos, demostrando que al aumentar la temperatura de cura durante el proceso de fabricación, es posible aumentar la rigidez de las placas, lo cual se evidencia en una reducción de las deformaciones fuera del plano y en un aumento de la carga crítica de Euler.

PALABRAS CLAVE: Materiales, compuestos, laminados, desempeño mecánico.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de elaboración de compuestos poliméricos es usual que aparezcan tensiones de cura en el material. Estas tensiones son el resultado del comportamiento anisotrópico de este tipo de material, el cual se pone en evidencia al comparar el coeficiente de dilatación térmica de las láminas que componen al compuesto. El valor de estas tensiones, así como su influencia en el desempeño mecánico de los mismos, pueden ser asociadas a las características de los materiales constituyentes (fibra y matriz), a la tipología del laminado (geometría, espesor de las láminas y orientación de las fibras) y a factores directamente relacionados con el proceso de curado en autoclave, específicamente, al gradiente térmico que se genera entre la temperatura de cura dentro de la misma y la temperatura de servicio.

Investigaciones realizadas en los últimos años indican que al colocar reforzadores para aumentar su rigidez, puede llegar a existir una diferencia substancial entre los valores de los coeficientes de expansión térmica del laminado y de los refuerzos colocados, siendo un factor importante la metodología utilizada en el proceso de pegado de los mismos. Almeida y Hansen [1-3] propusieron la idea de aprovechar las tensiones de curado que surgen durante la manufactura de compuestos laminados para mejorar el desempeño mecánico de laminados reforzados en toda su sección perimetral, demostrando analíticamente que las tensiones de cura pueden aumentar el valor de la carga crítica de pandeo en régimen lineal. Estos estudios teóricos sirvieron de motivación para el presente trabajo, en el cual se evalúa de forma experimental el efecto de las tensiones de cura en el desempeño mecánico de placas reforzadas diagonalmente.

Para el desarrollo de este trabajo fueron estudiadas diez placas reforzadas diagonalmente. Las placas fueron elaboradas con la técnica de pre-impregnación [4], a partir de la utilización de un tejido base formado por cuatro láminas con orientación $[(0,90)]_s$, sobre el cual se colocaron reforzadores formados por cuatro láminas orientadas a 45° y cuatro láminas orientadas a -45° . Para provocar las tensiones térmicas durante el curado se crearon dos casos de estudio variando la metodología empleada en el proceso de pegado y curado de los refuerzos [3]. Para cada uno de los casos de estudio fue determinado el valor de la carga crítica de pandeo en régimen lineal, la configuración de los tres primeros modos de pandeo lineal y las deformaciones fuera del plano para valores de carga superiores a la carga crítica de Euler. Para el desarrollo del procedimiento experimental se utilizó una técnica óptica llamada topogrametría, la cual permite la determinación de las deformaciones transversales y su utilización en el análisis del laminado [5].

PARTE EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se desarrolló utilizando placas de carbono/epoxi cuadradas de 350 mm de lado, fabricadas con láminas pre-impregnadas unidireccionales. Se seleccionó este método de fabricación por ser de gran aplicación en estructuras que requieren un alto porcentaje de fibras y buena homogeneidad en la distribución de la resina que servirá como matriz del compuesto [4]. Las placas fueron construidas utilizando un tejido base con orientación $[(0,90)]_s$, sobre el cual se colocaron reforzadores diagonales de 35 mm de ancho. Para inducir tensiones térmicas de cura y poder evaluar su influencia en el desempeño mecánico del material, se crearon dos casos de estudio: un primer grupo integrado por cinco placas, en el cual todos los refuerzos fueron pegados a una temperatura ambiente de 22°C ; un segundo grupo conformado por cinco placas, en el cual se efectuó un curado en autoclave a 177°C y un posterior acondicionamiento a la temperatura ambiente. Para el desarrollo experimental y el análisis de resultados se optó por denominar a las placas fabricadas a temperatura de 22°C como placas de tipo *XB* y a las placas curadas a 177°C como placas de tipo *XC*. La nomenclatura utilizada en la identificación de las placas, así como la orientación de las láminas es presentada en la Tabla 1, en la cual *CF* hace referencia al tejido base, *CT* hace referencia a los reforzadores, y *S* hace referencia a la simetría del laminado. La configuración de las placas utilizadas es representada en la Fig. 1.

Tabla 1: Orientación de las láminas.

Laminado	Ángulo de Orientación
L1	$[(0,90)_{CF}]_S$
L2	$[45_4^{CT}/(0,90)_{CF}]_S$
L3	$[-45_4^{CT}/(0,90)_{CF}]_S$
L4	$[(45,-45)_2^{CT}/(0,90)_{CF}]_S$

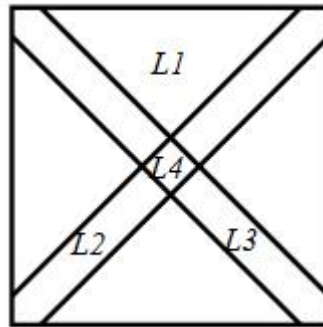


Fig. 1: Configuración de placas con refuerzos diagonales.

Las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes utilizados como tejido base y como refuerzo son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades mecánicas de los materiales constituyentes.

Propiedad	Refuerzo	Tejido Base
Módulo de elasticidad longitudinal [MPa]	130100	66600
Módulo de elasticidad transversal [MPa]	9400	66600
Coefficiente de Poisson	0.30	0.05
Módulo de cortante en el plano [MPa]	5800	4600
Módulo de cortante transversal [MPa]	5800	4600
Módulo de cortante transversal [MPa]	3360	3360
Coefficiente de expansión térmica longitudinal [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	-0.9×10^{-6}	1.79×10^{-6}
Coefficiente de expansión térmica transversal [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	27×10^{-6}	1.79×10^{-6}
Espesor de lámina [mm]	0.17	0.35
Densidad [g/cm^3]	1.56	1.56

Para la realización del trabajo experimental se utilizó una máquina universal de ensayos con una celda de carga de 30 kN. Para simular las condiciones de contorno de las placas, se diseñó un marco de acero el cual se acopló a la celda de carga de la máquina universal para aplicar una carga uniformemente distribuida en todo el borde superior de la placa. El esquema del sistema implementado es presentado en la Fig. 2.

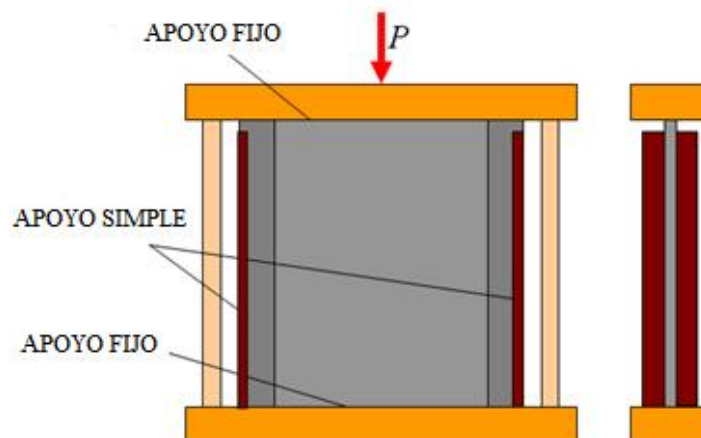


Fig. 2: Sistema diseñado para aplicación de carga de placas reforzadas.

La determinación de los desplazamientos fuera del plano se realizó por medio de una técnica óptica llamada topogrametría [5]. Esta técnica utiliza el procesamiento digital de imágenes para medir las coordenadas espaciales de las placas estudiadas. Para esto se utiliza un proyector convencional que refleja un patrón de franjas en la superficie de las placas, las cuales previamente fueron pintadas de blanco, para aumentar la resolución de las medidas a realizar. Una vez obtenidos los patrones de franjas, estos son captados por dos cámaras digitales acopladas a un computador que utiliza un software que permite dividir las imágenes en mapas de fases horizontales y verticales, los cuales son procesados con un algoritmo basado en regresión por mínimos cuadrados. De esta forma se extraen las coordenadas espaciales en cualquier punto de la imagen resultante. La secuencia del procedimiento óptico es resumida en la Fig. 3.

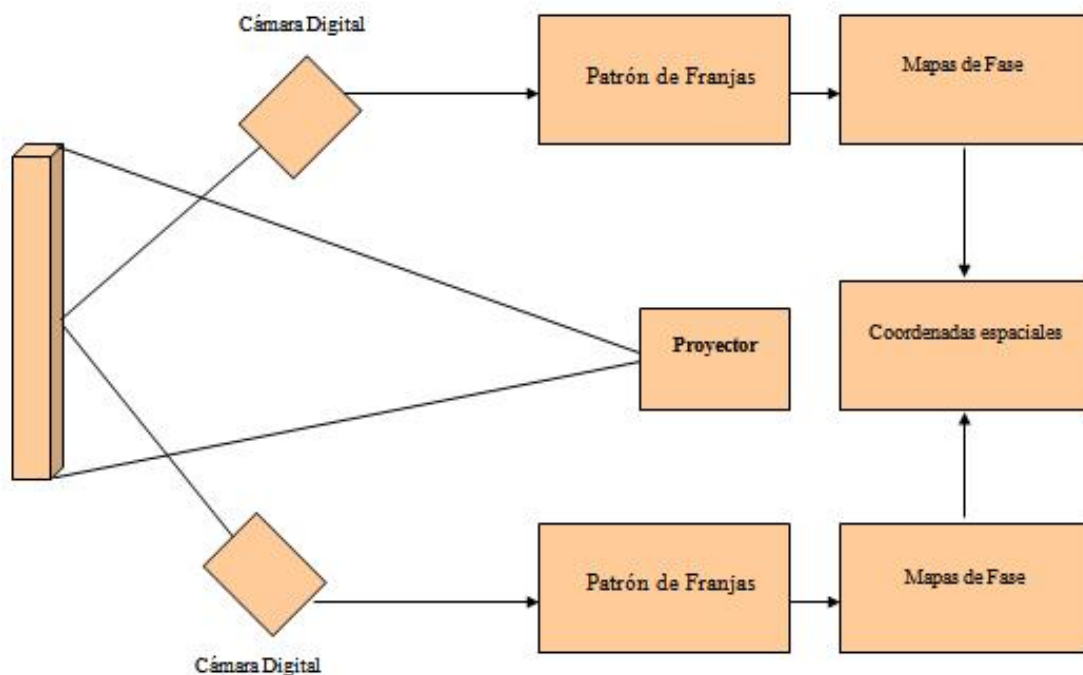


Fig. 3: Procedimiento óptico para la obtención de desplazamientos transversales.

Para el desarrollo de los ensayos se optó por la aplicación de desplazamientos, los cuales fueron aplicados en forma consecutiva a intervalos de 0.2 mm a una velocidad de 1 mm/min. Esto permitió la captura de imágenes para cada intervalo y su adecuado procesamiento para obtener los desplazamientos de acuerdo a la metodología de ensayo. Para el análisis numérico se desarrolló un modelo con ayuda del software comercial ABAQUS®. Este modelo se basa en la aplicación de un algoritmo que realiza un análisis dinámico de tipo explícito, utilizando elementos tipo S4R, que son elementos de cáscara fina, cuatro nodos y doble curvatura. Para estimar el efecto de las tensiones térmicas residuales, fueron elaborados modelos con y sin tensiones de cura. Las condiciones de contorno simuladas son presentadas en la Fig. 4, en la cual U representa las restricciones en los desplazamientos y U_R las restricciones en las rotaciones, mientras que los subíndices están relacionados a los cuatro bordes de la placa.

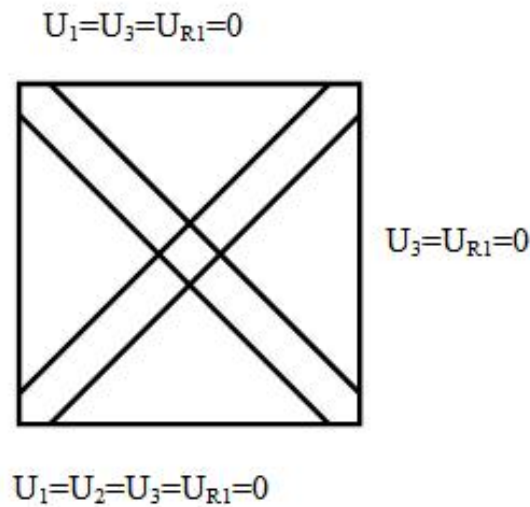


Fig. 4: Condiciones de contorno asumidas en el modelo numérico.

Para simular la fuerza de compresión, fue aplicada una línea de carga unitaria en todo el borde superior de la placa (ver Fig. 5). De esta forma es posible obtener el valor de la carga crítica de Euler para los tres primeros modos de pandeo lineal, multiplicando el valor propio obtenido por el ancho de la placa.

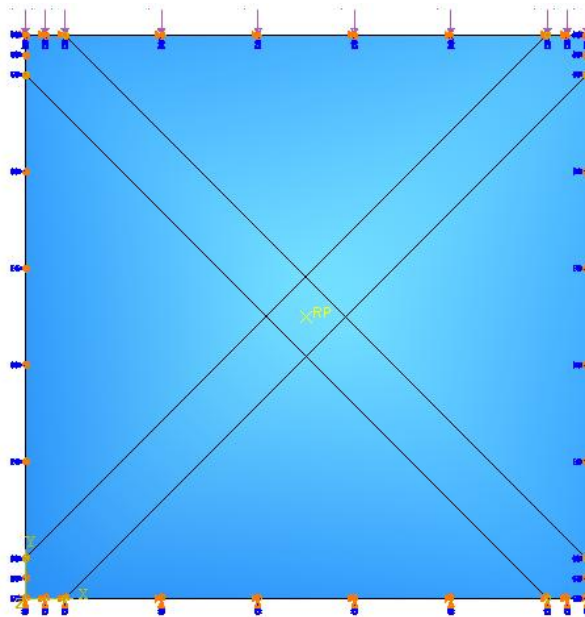


Fig. 5: Simulación de línea de carga unitaria en modelo numérico.

Para evaluar la carga crítica de Euler de las placas con tensiones de cura, fue inducido en el modelo numérico un campo de temperatura uniforme en la placa antes de colocar las restricciones de los apoyos. Este campo de temperatura genera tensiones iniciales que pueden ser consideradas en el estudio del pandeo en régimen lineal. Para determinar el efecto de la no linealidad geométrica fue elaborado un modelo numérico geoméricamente imperfecto con ayuda del *software* CATIA®. Este modelo permite reproducir las condiciones reales de ensayo y fue elaborado tomando como punto de partida las coordenadas de los vértices de la placa a partir de las imágenes obtenidas con el procedimiento óptico. El modelo imperfecto geoméricamente fue importado a ABAQUS® para su análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la determinación de la carga crítica de pandeo en el modelo numérico, se aplicó una línea de fuerza unitaria en todo el borde superior de la placa. Para placas sin refuerzo, con el modelo numérico se obtuvo un autovalor de 0.84, el cual equivale a una carga crítica igual a 300 N. Este valor resultó compatible con los valores obtenidos experimentalmente para este grupo de estudio, en los cuales se reportaron valores entre 270 a 370 N para placas curadas a temperatura ambiente. En el caso de placas curadas en autoclave, el modelo numérico reportó un valor propio igual a 2.56 lo cual corresponde a una carga crítica de Euler de 900 N, valor este compatible con los obtenidos experimentalmente, los cuales oscilaron ente 1000 – 1200 N. En la Tabla 3 se presentan los valores máximos y mínimos promedios obtenidos experimentalmente para la carga crítica de Euler, así como los resultados del modelo numérico para los dos grupos de placas analizados.

Tabla 3. Determinación de la carga crítica de pandeo lineal (carga crítica de Euler).

Tipo de Placa	Carga máxima promedio (N)	Carga mínima promedio (N)	Modelo numérico (N)
XB	270	370	300
XC	1000	1200	900

El análisis de los tres primeros modos de pandeo lineal fue realizado variando la temperatura de cura entre 22°C y 177°C. Las formas modales obtenidas son presentadas en la Fig. 6. Los resultados obtenidos comprueban que el valor de la carga crítica de pandeo lineal de las placas con tensión residual de cura representa aproximadamente tres veces el valor de la carga crítica de placas sin tensión residual para la primera forma modal de pandeo. Para el segundo modo de pandeo la presencia de tensiones de cura aumenta el valor de la carga crítica en aproximadamente 2.5 veces y para el tercer modo de pandeo la relación observada es de dos veces el valor de la carga.

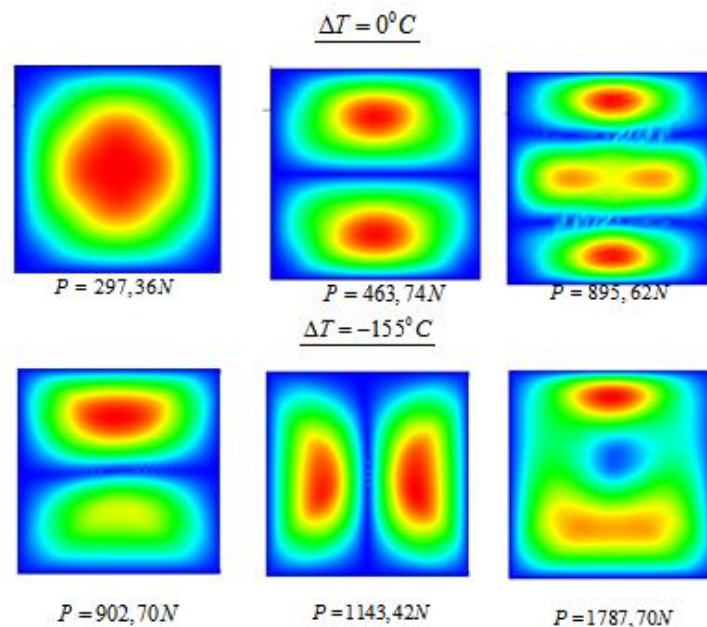


Fig. 6: Formas modales en ensayo de pandeo lineal.

Para determinar los máximos desplazamientos fuera del plano fue considerado el modelo elaborado en CATIA® a partir de las coordenadas x,y,z que se obtienen del procesamiento digital de las imágenes capturadas con el procedimiento óptico empleado. Los resultados del procedimiento experimental obtenidos para placas con y sin tensiones residuales de cura y los resultados del modelo numérico son presentados en las Figs. 7 y 8, para tres placas de cada grupo. En las figuras w son los desplazamientos transversales y P es la carga actuante.

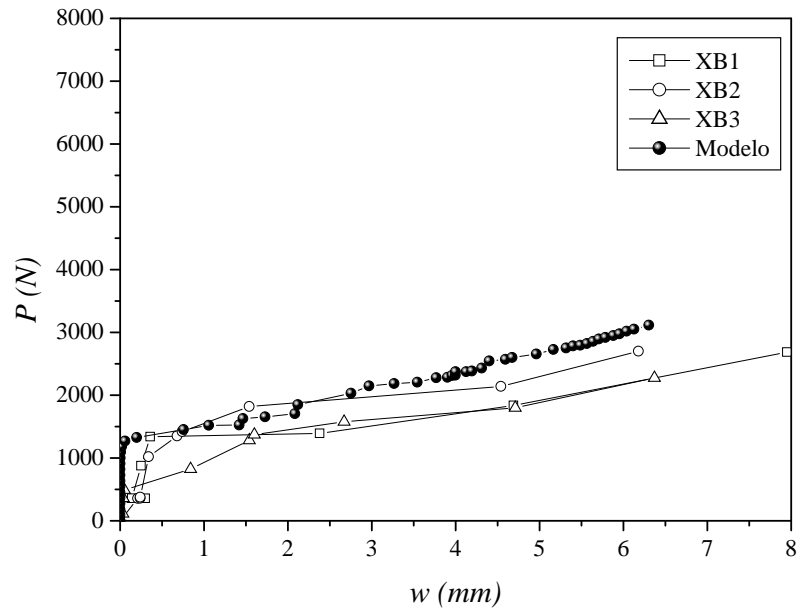


Fig. 7: Desplazamientos fuera del plano para placas sin tensiones térmicas de cura.

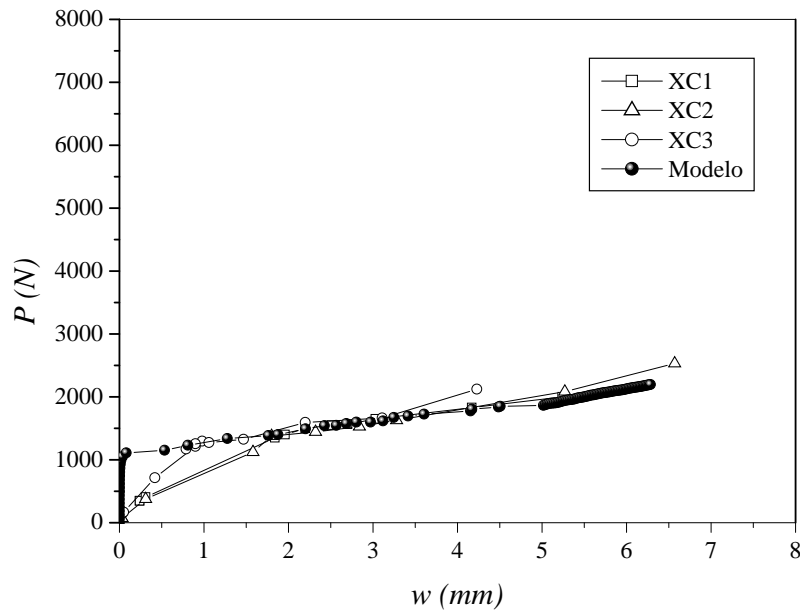


Fig. 8: Desplazamientos fuera del plano para placas con tensiones térmicas de cura.

CONCLUSIONES

En las placas analizadas, los resultados numéricos y experimentales muestran que la presencia de tensiones térmicas de cura pueden provocar un aumento en la rigidez de las mismas. Este aumento es mayor en la medida que aumenta la carga de compresión y se puede evidenciar al comparar los valores de la carga crítica de pandeo, así como el valor de los desplazamientos que ocurren fuera del plano de la placa. Los perfiles de variación de desplazamientos transversales en función de la carga de compresión muestran que, independientemente del procedimiento adoptado para el pegado de los refuerzos, cuando el valor de la carga aumenta, los desplazamientos aumentan de forma no lineal. Al comparar los resultados de los modelos numéricos con los resultados experimentales, se observó que los desplazamientos obtenidos de forma experimental para placas sin tensión residual son mayores a los desplazamientos determinados en el modelo numérico. Para el caso de placas en las cuales se indujeron tensiones de curado, los resultados experimentales se ajustan satisfactoriamente al modelo numérico.

REFERENCIAS

1. S.F.M. Almeida and J.S. Hansen, Enhanced buckling loads of composite plates with tailored thermal residual stresses, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 64, n. 4, pp. 772-780, 1997.
2. S.F.M. Almeida and J.S. Hansen, Natural frequencies of composites plates with tailored thermal residual stresses, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 36, n. 23, pp. 3517-3539, 1999.
3. S.F.M. Almeida and J.S. Hansen, Buckling of composite of plates with damage and thermal residual stresses. *IAAA Journal*, vol. 40, n. 2, pp. 340-345, 2002.
4. A. Besednjak, *Materiales Compuestos. Procesos de Fabricación de Embarcaciones*, UPC, España, 2005.
5. A.V. Fantin, *Medição de formas livres tridimensionais por topogrametría*, Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

NOMENCLATURA

<i>CF</i>	Tejido base que compone el laminado
<i>CT</i>	Laminado que compone el refuerzo
<i>P</i>	Carga de compresión (N)
<i>S</i>	Orientación simétrica de las láminas
<i>w</i>	Desplazamientos fuera del plano (mm)
<i>XB</i>	Placas con refuerzo diagonal curadas a temperatura ambiente
<i>XC</i>	Placas con refuerzo diagonal curadas en autoclave
<i>T</i>	Gradiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)