

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE PLACAS COMPUESTAS BAJO EL EFECTO DE TENSIONES TÉRMICAS RESIDUALES

Martha Lissette Sánchez Cruz^{1*}, *Sergio Frascino Muller de Almeida*²

1: Ingeniero civil, Fundación Universitaria Agraria de Colombia. Bogotá, Colombia

2: Ingeniero mecánico, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Sao Paulo, Brasil.

* Contacto: sanchez.martha@uniagraria.edu.co

RESUMEN

Durante el proceso de elaboración de elementos compuestos son utilizados procesos tecnológicos que implican la utilización de temperaturas elevadas que contribuyen a generar un gradiente térmico en el material una vez que los mismos son enfriados a la temperatura de operación. Este gradiente térmico provoca la aparición de tensiones residuales que persisten en el material durante su vida útil provocando efectos que pueden ser beneficiosos o perjudiciales, afectando de forma significativa las propiedades elásticas y mecánicas del material. El objetivo principal de este trabajo es evaluar de forma experimental la influencia de las tensiones térmicas residuales en las propiedades elásticas de placas laminadas simétricas reforzadas, constituidas por una matriz de resina epóxica reforzada con fibras de carbono. Para el análisis se emplearon tres tipos de refuerzos: longitudinal, cuadrado y diagonal. Para el proceso de conformación del laminado se emplearon dos metodologías diferentes: la primera metodología consistió en pegar los refuerzos a temperatura ambiente, la segunda metodología fue realizar el co-curado de los mismos a una temperatura de 177°C, generando de esta forma dos grupos de estudio: un grupo experimental y un grupo de control. Para evaluar la influencia del proceso de curado se realizaron ensayos experimentales de flexibilidad, flexo-compresión y vibración libre. Todos los resultados obtenidos de forma experimental fueron comparados con los valores obtenidos con auxilio del software comercial ABAQUS®. A través de los resultados se comprueba la influencia de la tipología del refuerzo y del proceso de conformación utilizado en las propiedades elásticas de placas laminadas de carbono-epoxi.

Palabras Clave: *Materiales compuestos, Tensiones térmicas residuales, Propiedades mecánicas, Rigidez, Flexo compresión, Vibración libre.*

ABSTRACT

Thermal residual stresses appear in laminated composite materials when cured at high temperatures and later cooled down to the operating temperature. This stress state persists in the material and can significantly influence the elastic behavior and the strength of the laminate.

The objective of this work is to evaluate experimentally the effects of the thermal residual stresses on the elastic behavior of plates manufactured with symmetrical laminates. This study presents the analysis of square carbon/epoxy plates reinforced using three different geometries (square frame, longitudinal reinforcements and diagonal reinforcements). The reinforcements were bonded using two different procedures. In the first procedure, the reinforcements were bonded at room temperature, whereas in the second procedure they were co-cured with the plate at 177°C. The experimental tests evaluated the effects of the thermal residual stresses on the

stiffness, natural vibration frequencies, and buckling behavior. For the stiffness tests, topogrametry technique was used. This technique allowed high accuracy measurement of the transversal displacement due to a transverse static force applied to the plate. In the free vibration tests, the vibration natural frequencies were determined using a dynamic signal analyzer. The buckling and post-buckling tests were performed applying a compression force using a universal test machine INSTRON. The transverse displacements caused by the load were also measured by topogrametry. All the experimental results were compared with analytical results using commercial software ABAQUS[®]. The obtained results demonstrated the influence of the thermal residual stresses on the elastic behavior of the plate, as well as, the influence of the geometry of the reinforcements.

Keywords: *Composite materials, Thermal residual stresses, Mechanical properties, Stiffness, Buckling, Free vibration.*

1 INTRODUCCIÓN

En el proceso tecnológico de elaboración de compuestos laminados, pueden aparecer tensiones residuales en el material como resultado del proceso de cura empleado. Estas tensiones se asocian al carácter anisotrópico del coeficiente de expansión térmica y permanecen en el compuesto durante la vida de servicio, afectando de manera significativa las propiedades del mismo. Es por este motivo que resulta de vital importancia su consideración en el diseño de estructuras elaboradas con compuestos laminados [1].

El presente trabajo da continuidad a investigaciones que se basan en el aprovechamiento de las tensiones térmicas residuales para mejorar el desempeño de placas compuestas [2, 3], evaluando de forma experimental, la influencia de las mismas en la flexibilidad, en la frecuencia de vibración libre y pandeo de placas reforzadas. Los resultados obtenidos, validan los modelos numéricos obtenidos con auxilio del software comercial ABAQUS[®].

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Características básicas del compuesto

El estudio fue realizado utilizando placas de carbono/epoxi fabricadas con láminas pre-impregnadas unidireccionales. Estas placas son de 350 x 350 mm y son formadas por un tejido base con orientación [(0,90)]_s. Para comprobar el efecto de la tipología de refuerzo utilizada se diseñaron tres tipos de refuerzo: longitudinal, diagonal y perimetral. Se consideró un ancho constante igual a 35 mm para todas las tipologías empleadas. La orientación de las láminas es presentada en la Tabla 1, en la cual CT representa el tejido base y CF la orientación del refuerzo.

Tabla 1. Orientación de las láminas.

Laminado	Ángulo de Orientación
L1	$[(0,90)^{CF}]_S$
L2	$[(0,90)_2^{CT}/(0,90)^{CF}]_S$
L3	$[90_4^{CT}/(0,90)^{CF}]_S$
L4	$[0_4^{CT}/(0,90)_2^{CF}]_S$
L5	$[45_4^{CT}/(0,90)^{CF}]_S$
L6	$[(45,-45)_2^{CT}/(0,90)^{CF}]_S$
L7	$[-45_4^{CT}/(0,90)^{CF}]_S$

Para evaluar el efecto de las tensiones térmicas residuales, se utilizaron dos procesos diferentes para adherir los refuerzos a la placa. Con la primera técnica, los refuerzos fueron pegados a 22°C, mientras que la segunda técnica consistió en pegar los refuerzos en autoclave a una temperatura de 177°C, induciendo de esta forma, el apareamiento de un gradiente entre el coeficiente de expansión térmica de la placa base y de los refuerzos empleados. La tipología de los refuerzos empleados es representada en la Figura 1.

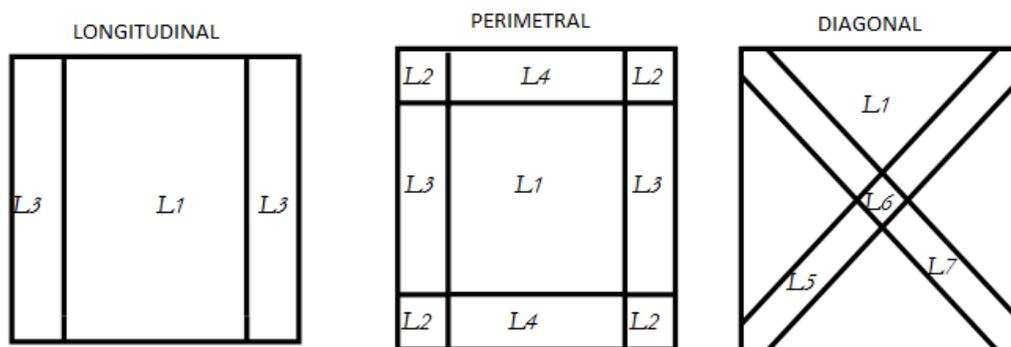


Figura 1. Geometría de las placas reforzadas.

2.2 Procedimiento experimental

La metodología adoptada para los estudios de rigidez y de flexo-compresión consistió en la implementación de una técnica de procesamiento digital de imágenes llamada de Topogrametría. Esta técnica consiste en la utilización de un proyector que refleja imágenes de franjas sobre la superficie de interés. Estas imágenes son captadas por dos cámaras digitales y separadas en mapas de fases horizontales y verticales a partir de las cuales se obtienen las coordenadas x, y, z. El sistema óptico se acopla a un ordenador que utiliza el software TPLA40012[®] [4]. Este software posee un algoritmo interno, basado en el método de mínimos cuadrados, para la determinación de las tres coordenadas.

Para el ensayo de flexibilidad fue elaborado un dispositivo metálico en el cual la placa es simplemente apoyada en sus cuatro vértices. Los ensayos fueron realizados aplicando una fuerza estática de 5 N y 10 N para cada grupo de placa estudiado. Para el análisis del pandeo se utilizó una máquina de ensayos con célula de carga de 30 kN. La placa fue montada en un dispositivo fabricado por una empresa de la industria aeronáutica. Ambos dispositivos fueron acoplados al equipo de topogrametría. Esto posibilitó la captura de imágenes para su posterior procesamiento.

Los ensayos fueron realizados en un local con temperatura promedio de 26°C. La Figura 2 representa el montaje experimental para los estudios de flexibilidad y flexo compresión.



Figura 2. Ensayos de Flexibilidad y flexo compresión.

Para evaluar el efecto de las tensiones térmicas residuales en el comportamiento dinámico de las placas, específicamente en las frecuencias naturales de vibración libre, las placas fueron excitadas mediante una fuerza impulsiva. Esta excitación es inducida a través de un martillo modelo PCB 086C03. La respuesta a la excitación es captada por un acelerómetro. Las señales captadas por este acelerómetro son enviadas a un acondicionador de señales que las amplifica y las envía a un analizador de señales dinámicas. Este analizador procesa y calcula las frecuencias de vibración de la estructura.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los ensayos de flexibilidad se obtuvo de manera numérica y experimental el valor del desplazamiento transversal obtenido para una línea transversal que pasa por el centro de las placas con refuerzo perimetral y longitudinal. En el caso de las placas con refuerzo diagonal, el punto de aplicación de la carga fue desplazado 100 mm para evitar aplicar la carga directamente sobre el reforzador, los resultados son presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de ensayo de flexibilidad.

Tipo de placa	Desplazamiento transversal (mm)					
	Carga aplicada: 5 N			Carga aplicada: 10 N		
	$w_{mín}$	$w_{máx}$	Modelo	$w_{mín}$	$w_{máx}$	Modelo
Perimetral a 22°C	2.05	2.42	2.04	2.94	3.27	3.09
Perimetral a 177°C	0.69	0.97	1.03	1.44	1.74	1.97
Longitudinal a 22°C	1.90	2.10	2.20	3.70	3.95	3.74
Longitudinal a 177°C	1.74	2.01	2.08	3.22	3.65	3.50
Diagonal a 22°C	1.01	1.39	1.68	2.55	3.15	2.49
Diagonal a 177°C	0.97	1.17	0.92	2.07	2.28	1.94

Los estudios realizados comprueban que las tensiones térmicas residuales originadas durante el proceso de fabricación de las placas compuestas afectan la rigidez de las mismas. Las placas curadas en autoclave presentaron una ganancia en su rigidez. Este resultado es significativamente importante en las placas con refuerzo perimetral.

Para evaluar la influencia de las tensiones térmicas residuales en el valor de las frecuencias naturales de placas con refuerzo perimetral, las placas fueron excitadas y se obtuvieron las cuatro primeras frecuencias de vibración libre para todas las placas analizadas. Los resultados son presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Frecuencias naturales de vibración libre (Hz).

Placa	1°	2°	3°	4°
Perimetral a 22°C	38.14	87.64	88.42	105.33
Perimetral a 177°C	55.21	101.44	103.43	117.29
Longitudinal a 22°C	32.74	51.95	55.44	66.69
Longitudinal a 177°C	45.17	55.42	72.27	80.37
Diagonal a 22°C	30.42	75.18	74.34	78.25
Diagonal a 177°C	52.46	63.14	94.50	192.52

El estudio de la variación de las frecuencias naturales de vibración libre con la diferencia de temperatura en placas reforzadas permitió comprobar que independientemente del tipo de refuerzo utilizado los valores de la primera frecuencia natural de vibración libre aumentan significativamente cuando los refuerzos son curados a 177°C. Un comportamiento similar ocurre al observar los otros modos de vibración estudiados.

Para determinar la carga crítica de pandeo lineal en las placas fue aplicada una línea de fuerza unitaria en el borde superior de las mismas. Se determinaron tres autovalores para cada caso. A partir de los autovalores obtenidos se encontró la carga crítica para los tres primeros modos de pandeo. Los resultados de carga crítica son presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de carga crítica (N) en ensayos de flexo compresión.

Placa	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Perimetral a 22°C	442.5	577.02	916.86
Longitudinal a 22°C	332.14	396.48	640.74
Diagonal a 22°C	297.36	646.74	895.62

El estudio de la relación que existe entre la variación de la carga y la diferencia de temperatura en las placas reforzadas mostró que la carga varía sustancialmente con la diferencia de temperatura. Cuando se induce un gradiente de temperatura de 155 °C, se percibe un aumento de la carga de alrededor de tres veces en comparación con la carga obtenida en condiciones normales para las placas con refuerzo perimetral y de aproximadamente el doble para las otras tipologías de refuerzo. Los valores obtenidos para placas curadas a 177°C oscilaron entre 970 - 1200 N para

placas con refuerzo perimetral, entre 870 – 1000 N para placas con refuerzo longitudinal y entre 1000 – 1200 N cuando se emplearon refuerzo diagonal.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan resultados experimentales que comprueban el efecto de las tensiones térmicas residuales en las propiedades mecánicas de laminados compuestos. Independientemente del tipo de refuerzo empleado, el surgimiento de estas tensiones como resultado del proceso tecnológico utilizado para la fabricación del material, puede aumentar la rigidez del material, los valores de las frecuencias naturales de vibración libre y la carga crítica cuando está sometido a flexo compresión, lo cual puede ser de vital importancia en el diseño de estructuras elaboradas con laminados reforzados.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las agencias brasileñas CAPES y CNPq por el soporte financiero brindado durante el desarrollo de esta investigación.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. S.F.M. Almeida, J.S. Hansen, “Enhanced buckling loads of composite plates with tailored thermal residual stresses”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 64, pp. 772-780, 1997.
2. J.P. Favre, “Residual thermal stresses in fiber reinforced composite materials - a review”, *Journal of Mechanic Behaviour Materials*, Vol. 1, pp. 37-53, 1988.
3. S.F.M. Almeida, J.S. Hansen, “Buckling of composite of plates with damage and thermal residual stresses”. *IAAA Journal*, Vol. 40, pp. 340-345, 2002.
4. A.V. Fantin, “Medição de formas livres tridimensionais por topogrametria”, *Dissertação de maestria*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.