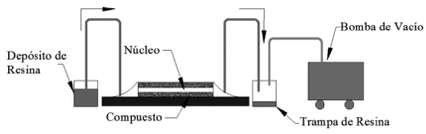
Análisis de características de materiales compuestos construidos sobre núcleos de ABS preparados por fabricación aditiva



Analysis of characteristics of composite materials built on ABS cores prepared by additive manufacturing

Manuel-Javier Rosel-Solís, Javier Molina-Salazar, José-Omar Dávalos-Ramírez, Alex-Bernardo Pimentel-Mendoza e Yuridia Vega

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Instituto de Ingeniería y Tecnología. Col. Partido Romero. Av. del Charro, 450 - 32310 Ciudad Juárez, Chihuahua (México)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8980 | Recibido: 25/09/2018 • Inicio Evaluación: 28/09/2018 • Aceptado: 24/01/2019

ABSTRACT

- Additive manufacturing represents an alternative that offers great advantages in small-scale production, high level of customization and ease of building complex geometries. However, rapid prototyping parts present mechanical limitations that prevent their use in applications that require greater resistance.
  In the present work an experimental analysis was carried out where the processes of Resin Infusion and Hand Lay-Up were compared, performing tests with specimens constructed according to the ASTM D790-17 standard, for laminated material of carbon fiber with plastic nuclei by prototyping fast and tested with two orientations of fibers "3k", (-45º +45º and 0º 90º).
  The tests and the statistical analysis of the data were made based on a factorial design, generating results that offer acceptable levels of stiffness and deflection without causing delamination failures, obtaining a combination that allows the manufacture of a piece without the need for a mold. The material constructed by Hand Lay-Up offered the best performance, by not failing by delamination.
- **Key Words:** additive manufacturing, composite materials, bending tests, fused deposition modeling, ABS, delamination.

RESUMEN

La fabricación aditiva representa una alternativa que ofrece grandes ventajas en la producción a baja escala, alto nivel de personalización y facilidad de construir geometrías complejas. Sin embargo, las partes por prototipado rápido presentan limitaciones mecánicas que impiden su utilización en aplicaciones que requieren mayor resistencia.

En el presente trabajo se realizó un análisis experimental donde se compararon los procesos de Infusión de Resina y Hand Lay-Up, realizando pruebas con probetas construidas según la norma ASTM D790-17, para material laminado de fibra de carbono con núcleos de plástico por prototipado rápido y se probó con dos orientaciones de fibras "3k", (-45º +45º y 0º 90º).

Los ensayos y el análisis estadístico de los datos se realizaron con base a un diseño factorial, generando resultados que ofrecen niveles aceptables de rigidez y deflexión sin causar fallos por delaminación, obteniendo una combinación que permite la fabricación de una pieza sin necesidad de molde. El material construido por Hand Lay-Up ofreció el mejor desempeño, al no fallar por delaminación.

Palabras Clave: fabricación aditiva, materiales compuestos, pruebas de flexión, modelado por deposición fundida, ABS, delaminación.

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva representa una alternativa que ofrece grandes ventajas en la producción a baja escala, con la opción de fabricar productos altamente personalizados, reduciendo el tiempo de desarrollo de nuevos productos [1]. El uso de la fabricación aditiva ha ido extendiéndose hacia aplicaciones dentro de la industria automotriz, electrónica, aeroespacial, y recientemente en el área médica, particularmente, en la fabricación de prótesis y prótesis humanas, en la que se requiere un grado de personalización alto, necesario para su adaptación al paciente, razón por la cual, la fabricación aditiva se considera la mejor alternativa [2-4].

Uno de los métodos de fabricación aditiva más utilizados, para la fabricación de prototipos rápidos, es el modelado por deposición fundida (FDM), que presenta como ventajas bajo costo de operación, menor desperdicio de material y tiempos de cambio de materiales y un fácil manejo [2]; sin embargo, los materiales utilizados presentan propiedades mecánicas que limitan su utilización, siendo necesario determinar criterios para su aplicación [3]. Además, dado que la fabricación por este principio se realiza depositando el material en capas, las partes fabricadas presentan un comportamiento anisotrópico, respondiendo de manera distinta al ser sometidos a esfuerzos en diferentes direcciones [4].

Para aprovechar la flexibilidad de la fabricación aditiva para la construcción de partes geométricas complejas se ha buscado mejorar los materiales plásticos utilizados, combinándolos con materiales compuestos a base de fibras de carbono, los cuales pueden ofrecer niveles de rigidez y resistencia similares al acero, pero con un peso cuatro veces menor [8-9]. En investigaciones realizadas recientemente, se demostró que es factible producir piezas que combinen las ventajas de los materiales a base de fibra de carbono con las partes fabricadas por prototipado rápido sin la necesidad de la utilización de un molde, dado que la función que tienen los núcleos construidos por fabricación aditiva es la de aportar la geometría del producto a fabricar, sirviendo como base, para ser reforzada con los materiales compuestos. Sin embargo, en los ensayos se presentan problemas de delaminación para las pruebas con núcleos de ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) [6–11]PVC for core and polyester resin. The principal difference between the two manufacturing techniques is the weight of the ship that will influence

the production phase, the use phase and lastly the disposal phase. For Life Cycle Assessment for the impact assessment a commercial software has been used, GaBi software with Ecoinvent database. A specific evaluation of resistance of the ship with towing tank tests has been conducted, and an evaluation of the consumption, knowing the engine installed on board. This evaluation is possible thanks to the definition of three different profiles of usage of the yacht (low usage – 200 h/y, medium usage - 350 h/y and high usage – 500 h/y. Al resolver el problema de delaminación, se abriría la posibilidad de obtener una alternativa en la fabricación de prótesis deportivas para extremidades inferiores, combinando las ventajas de la personalización que ofrece la fabricación aditiva, con la resistencia de los materiales compuestos [12].

El presente estudio contempla un análisis en el que se realizaron pruebas de flexión bajo la norma ASTM D790-17 Propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados y materiales de aislamiento [7], en el que se comparan los procesos de fabricación de Hand Lay-Up y el de Infusión de Resina. Se utilizaron fibras de carbono bidireccionales o tejidas "3k" (3000 filamentos por hilo), en dos diferentes orientaciones. Para el análisis estadístico de los resultados se formuló un diseño factorial, para encontrar la combinación de factores que ofrecieran los niveles de resistencia a la flexión y deflexión más altos, sin provocar fallo por delaminación, consistente en la separación de las capas del material compuesto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.DISEÑO DE NÚCLEOS

Inicialmente, se diseñaron los núcleos individuales de ABS cuyas dimensiones son para pruebas con el proceso de Hand Lay-Up, y núcleos en hojas de dimensiones para el proceso de Infusión de Resina, mostrados en la Fig. (1), construidos en una impresora tridimensional Stratasys Fortus 250 MC. El espesor de los núcleos de prueba se consideró con base en el grosor de dos capas de ABS, bajo el supuesto de que, a menor grosor, los esfuerzos cortantes en las superficies del núcleo son menores logrando que los efectos de tensión y compresión en las superficies del núcleo del material laminado no provoquen falla por delaminación [13].

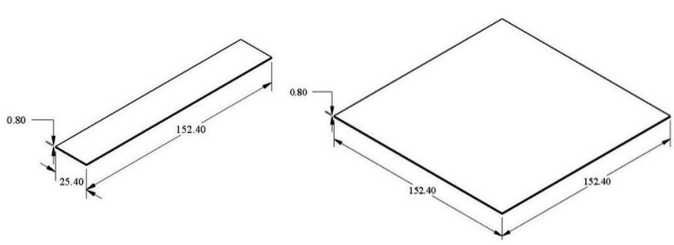


Fig. 1: Núcleos de ABS para probetas (mm)

2.2. MATERIALES

Los materiales usados para la construcción de las probetas y para su análisis de flexión, están formados por fibras bidireccionales o tejidas "3k", que tiene un gramaje de Se utilizó también, la resina epóxica EZ-Lam 30, como matriz termoestable del material compuesto, con una resistencia a la tensión de 386.10 MPa y módulo de flexión de 424.02 MPa, mezclada en una proporción, con base al peso, de 100 partes de resina por 44 partes de catalizador. Los datos y proporción de mezcla fueron obtenidos de la hoja técnica de la resina [14].

2.3. MÉTODOS

2.3.1. Caracterización de probetas para proceso de Hand Lay-Up

Las probetas de prueba fabricadas con el proceso Hand Lay-Up, mostrado en la Fig. (2), se hicieron de manera individual. Inicialmente, se cortaron 30 tiras de fibra de carbono con orientación 0° 90° y en igual cantidad con orientación -45° +45°, con dimensiones de Se preparó una superficie plana aplicando cera desmoldante a base de poliéster para una fácil liberación de las probetas. Se mezclaron 125 g de resina epóxica con 55 g de catalizador, y se aplicaron capa por capa con brocha en una secuencia de laminado de 3 capas de compuesto, un núcleo y 3 capas de compuesto, para obtener 5 probetas de cada orientación 0° 90° y 5 más con orientación -45° +45°. El tiempo de curado fue de 48 horas a temperatura ambiente (22-24 °C), que se considera suficiente según lo especificado en la hoja técnica de la resina [14].

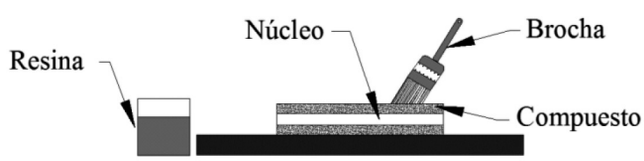


Fig. 2: Proceso de Hand Lay-Up

2.3.2. Caracterización de probetas para proceso de Infusión de Resina

Para la fabricación de las probetas por el proceso de Infusión de Resina, presentado en la Fig. (3), se cortaron 6 hojas de fibra de carbono a dimensiones de con orientación 0° 90° y en igual número y dimensiones con orientación -45° +45°. Se aplicó cera desmoldante a base de poliéster sobre la superficie de trabajo y se prepararon 125 g de resina epóxica por 55 g de catalizador. Se colocaron las hojas de fibra sobre la superficie en secuencia de 3 hojas, un núcleo y 3 hojas; se cubrieron con tela para infusión (peel ply) y malla para infusión, también se colocó tubo en espiral, dos conectores y tubo de 8mm para la distribución de la resina y se cubrió con bolsa de nylon. Una vez que se comprobó el sellado, se introdujo la resina por medio de vacío. El tiempo de curado fue de 48 horas a temperatura ambiente (22-24 °C).

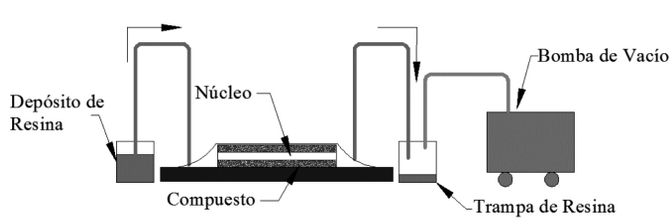


Fig. 3: Proceso de infusión de resina

2.3.3. Rectificado de probetas

Las probetas fabricadas por Hand Lay-Up se pulieron con papel abrasivo de grado 180, 300 y 800, a velocidades de 300 a 500 mm/rev, para retirar el excedente de material compuesto de los 4 bordes de las probetas, alcanzar las medidas finales y mejorar el acabado superficial. Con las hojas obtenidas por Infusión de Resina, se utilizó una sierra circular con disco de diamante para cortar cada espécimen y se pulieron los bordes utilizando papel abrasivo en grados y velocidades ya mencionadas. Con estos procesos no se

daña la estructura del material compuesto y se obtienen acabados superficiales aceptables [15]. Las medidas finales de las probetas se muestran en la Tabla (1).

Para calcular las proporciones de resina ( ) y fibra ( ) de las probetas terminadas se utilizaron las Ec. (1) y (2), donde es la masa de la probeta, es la masa de la fibra (8.20 g), la masa del núcleo (3.98 g).

$$P_R = \frac{M_P - M_N - M_F}{M_P - M_N} \quad (1)$$

$$P_F = 1 - P_R \quad (2)$$

2.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Se realizaron ensayos de flexión en 3 puntos en una máquina universal de esfuerzos marca Shimadzu AG-IC de piso, con una celda de carga de 100 kN a una velocidad de prueba de 1 mm/min, ajustando el espacio entre los puntos de soporte a 50 mm, según la norma ASTM D790-17. La deflexión máxima para las pruebas se ajustó a 15 mm y se probó cada espécimen hasta que se produjo la falla, considerando para el análisis la máxima carga y deflexión registradas antes de la falla. Los datos para la carga aplicada y la deflexión fueron recolectados para cada probeta durante la prueba, utilizando el programa Trapezium, instalado en un equipo de cómputo conectado a la máquina de ensayos. Con los datos recolectados se construyeron los gráficos de carga contra deflexión, mostrados en las Fig. (4) y (5). Para evitar sesgo en los resultados, las pruebas se realizaron de manera aleatoria.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ENSAYOS DE FLEXIÓN

Después de realizar los ensayos de flexión, se registraron los valores de fuerza de flexión soportada, deflexión y el modo en que cada probeta falló al llevarla hasta su esfuerzo último de flexión, obteniéndose los siguientes resultados:

En la Fig. (4) se muestran las gráficas de carga-deflexión de las probetas con orientación de fibras 0° 90°, donde se observa que los resultados de fuerza soportada utilizando en proceso de Hand Lay-Up fueron mayores a los obtenidos por Infusión de Resina.

En la Fig. (5) se muestran las gráficas de carga-deflexión para los procesos de Hand Lay-up e Infusión de Resina, con orientación de las fibras a -45° +45°, mostrándose resultados menores que los

Proceso	Orientación	Medidas finales (mm)			M_p (g)	P_R	P_F
		Largo	Ancho	Grosor			
Hand Lay-Up	0° 90°	152.4	25.4	3.42	15.99	0.317	0.683
	-45° +45°	152.4	25.4	3.42	16.02	0.319	0.681
Infusión de Resina	0° 90°	152.4	25.4	3.22	15.39	0.282	0.718
	-45° +45°	152.4	25.4	3.22	15.38	0.281	0.719

Tabla 1: Dimensiones finales de probetas para pruebas de flexión, según Norma ASTM D790-17

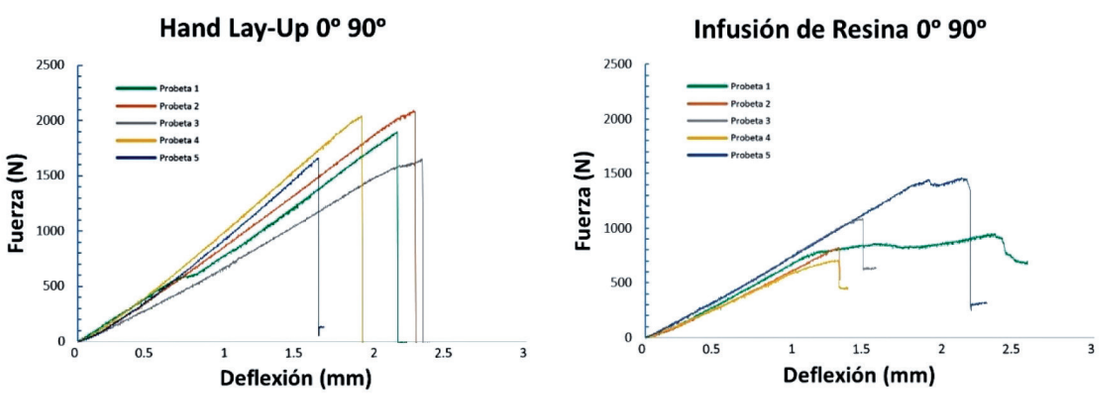


Fig. 4: Resultados de pruebas de flexión con orientación de fibras 0° 90°, para los procesos de: a) Hand Lay-Up (izquierda) y b) Infusión de Resina (derecha)

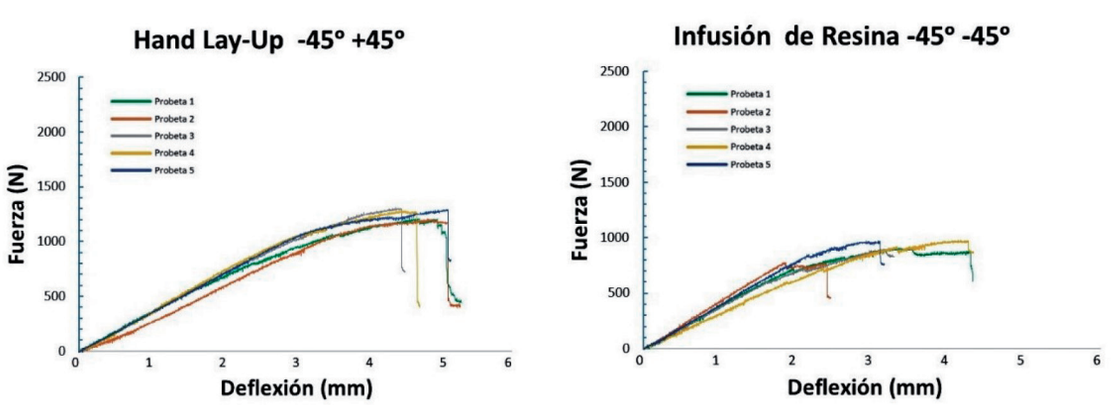


Fig. 5: Resultados de pruebas de flexión con orientación de fibras -45° +45°, para los procesos de: a) Hand Lay-Up (izquierda) y b) Infusión de Resina (derecha)

obtenidos con la orientación de fibras a a 0° 90°, para las cargas soportadas, con un promedio de deflexión mayor.

3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis de los resultados de las pruebas de flexión, se formuló un diseño factorial considerando 4 tratamientos, cada uno con cinco repeticiones, dando un total de 20 corridas. Se definió el número de repeticiones con base en el tamaño de muestra recomendado en la norma ASTM D790-17. Las variables de respuestas analizadas fueron, la fuerza de flexión en Newtons (N) y la deflexión en milímetros (mm), buscando identificar la combinación de factores que ofrezcan una mayor resistencia a la flexión sin causar delaminación.

Para probar el comportamiento del compuesto laminado, se utilizó como variable al proceso de fabricación, comparando los procesos de Hand Lay-Up e Infusión de Resina. Otro factor que se analizó fue la orientación de la fibra de carbono bidireccional, probándose dos orientaciones, a 0° 90° y -45° +45°.

El análisis se realizó considerando un 95% de nivel de confianza y un error del 5%, estableciéndose las siguientes hipótesis estadísticas:

Para la comparación del tipo de proceso y considerando la fuerza de flexión (*F*), como variable de respuesta, la hipótesis nula mostrada en la Ec. 3, propone que los promedios de las fuerzas de flexión (soportados por las probetas construidas por Hand Lay-Up e Infusión de Resina, son iguales. En la Ec. 4 se establece que los promedios de las fuerzas de flexión (soportados son diferentes.

$$H_0: \mu F_{Lay\text{-}Up} = \mu F_{Infusión} \quad (3)$$

$$H_1: \mu F_{Lay\text{-}Up} \neq \mu F_{Infusión} \quad (4)$$

Comparando la orientación de las fibras, la hipótesis nula mostrada en la Ec. (5), propone que los promedios de las fuerzas de flexión (soportados por las probetas construidas con orientación de fibras de 0° 90° y de -45° +45°, son iguales. En la Ec. (6) se establece que las fuerzas de flexión soportadas son diferentes, para cada orientación.

$$H_0: \mu F_{0° 90°} = \mu F_{-45° +45°} \quad (5)$$

$$H_1: \mu F_{0° 90°} \neq \mu F_{-45° +45°} \quad (6)$$

Dado que el valor P obtenido, para la variable proceso, es igual a 0.000 y es menor a 0.05, que representa el 5% de error, se rechazar la hipótesis nula (Ec. 3). Por lo que se puede afirmar que el proceso de manufactura utilizado tiene efecto significativo en la fuerza de flexión soportada. Para la variable que considera la orientación de las fibras, el valor P obtenido fue 0.001, y siendo menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (Ec. 5). Tomando esto en consideración, se puede decir que la orientación de las fibras tiene también un efecto significativo en la fuerza de flexión que puede soportar el material.

Haciendo la comparación del tipo de proceso analizando la deflexión (*D*), como variable de respuesta, la hipótesis nula mostrada en la Ec. (7), propone que los promedios de la deflexión (soportados por las probetas construidas por Lay-Up e Infusión de Resina, son iguales. En la Ec. (8) se establece que los promedios de las fuerzas de flexión (soportados son diferentes.

$$H_0: \mu D_{Lay\text{-}Up} = \mu D_{Infusión} \quad (7)$$

$$H_1: \mu D_{Lay\text{-}Up} \neq \mu D_{Infusión} \quad (8)$$

Comparando la orientación de las fibras, la hipótesis nula mostrada en la Ec. (9), propone que los promedios de las fuerzas de flexión (soportados por las probetas construidas con orientación de fibras de 0° 90° y de -45° +45°, son iguales. En la Ec. (10) se establece que las fuerzas de flexión soportadas son diferentes, para cada orientación.

$$H_0: \mu D_{0° 90°} = \mu D_{-45° +45°} \quad (9)$$

$$H_1: \mu D_{0° 90°} \neq \mu D_{-45° +45°} \quad (10)$$

Analizando los resultados para la deflexión, como el valor P obtenido, para la variable proceso es 0.002 y es menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (Ec. 7). Por lo que se puede afirmar que el proceso de manufactura utilizado tiene efecto significativo en la deflexión del material. Para la variable de orientación de las fibras, el valor P obtenido fue 0.000, y siendo también menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula (Ec. 9) por lo que se puede afirmar que la orientación de las fibras afecta significativamente la deflexión.

Para evaluar la calidad del modelo estadístico, se consideraron los coeficientes de determinación R^2 y $R^2_{Ajustado}$, que para interpretarlos se debe cumplir la expresión de la Ec. (11):

$$0.0 \leq R^2_{Ajustado} \leq R^2 \leq 100 \quad (11)$$

Estos coeficientes cuantifican el porcentaje de variabilidad de los datos, que puede ser explicado por el modelo; por ello, son deseables valores próximos a 100. Para que el modelo de predicción se confiable, se recomienda un coeficiente de determinación ajustado de al menos 70%. Al obtenerse valores para R^2 y $R^2_{Ajustado,}$ de 83.24% y 80.10%, respectivamente, en el análisis de la fuerza de flexión y para el análisis de deflexión de 87.91% y 85.65%, se

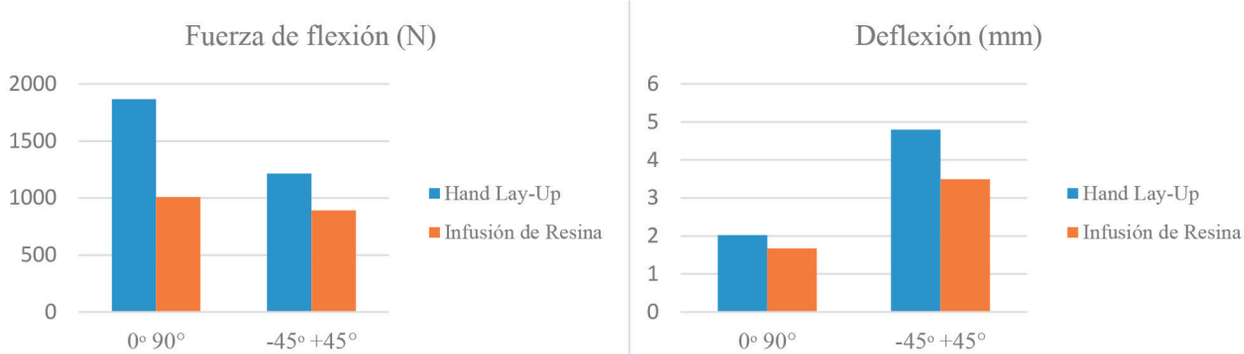


Fig. 6: Interacción de la fuerza de flexión y la deflexión

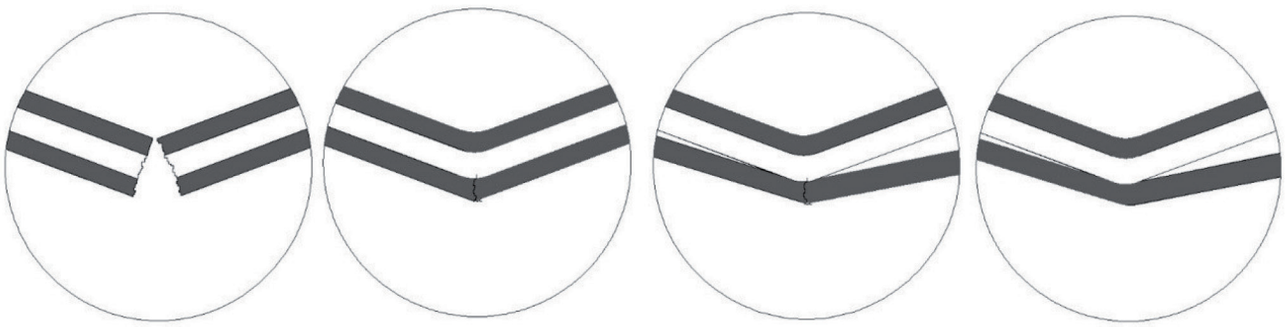


Fig. 7: Representación gráfica de modos de fallo, de izquierda a derecha: por fractura total, por fractura al lado opuesto del punto de aplicación de carga, fractura-delaminación y delaminación

cumple con la expresión de la Ec. 9 y, además, son superiores 70%. Esto confirma que los factores estudiados de proceso y orientación de fibra son responsables o explican un alto porcentaje de la variabilidad de la fuerza de flexión y la deflexión. Por consiguiente, los efectos atribuibles a otros factores no estudiados, que se hayan mantenido fijos o con pequeñas variaciones, sumado al error experimental, fueros muy pequeños, comparados con la influencia que tuvieron los factores de estudio, en las variables de respuesta.

La Fig. (6) muestra a la izquierda, la interacción de factores para la fuerza de flexión, donde se aprecia que el proceso Hand Lay-Up, es con el que se obtienen las mayores cargas de flexión máxima en combinación con la orientación de fibras de 0° 90°. En la gráfica de interacción de factores para la deflexión, se identifica que el proceso Hand Lay-Up, en combinación con la orientación de fibras -45° +45° es la que presenta el máximo promedio de deflexión.

Los ensayos realizados a las probetas construidas con el proceso de Hand Lay-Up y una orientación de fibras de 0° 90° (Fig. 4a), presentaron un comportamiento lineal en relación a la carga aplicada y su deflexión, que indica un comportamiento elástico. Se observó fractura total en dos de los especímenes de prueba, se presentó fractura al lado opuesto del punto de aplicación de la carga (Fig. 7), ocasionada por la tensión en las capas. Se obtuvo un promedio de 1867.5 N $\pm$ 249.7 N de carga soportada por 2.02 mm $\pm$ 0.35 mm de deflexión.

Las pruebas bajo el proceso de Infusión de Resina (Fig. 4b), tuvieron promedios de carga soportada y deflexión mas bajos que los obtenidos por Hand Lay-Up, de 1008.75 N $\pm$ 364.5 N y 1.67 mm $\pm$ 0.620 mm, respectivamente. El modo de falla predominante fue la delaminación; la probeta 2 presentó fractura en el lado opuesto a la aplicación de la carga, sin embargo también presentó separación entre las capas de material compuesto y el núcleo de plástico al momento de la falla (Fig. 7). La probeta 5 alcanzó a soportar la mayor carga, 1465.63 N, mucho menor a las probadas con el proceso anterior con una deflexión de 2.09 mm.

En las pruebas realizadas a especímenes construidos por Hand Lay-Up, con una orientación de -45°+45° (Fig. 5a), se generaron resultados más consistentes entre las muestras, a diferencia de las construidas con orientación 0° 90°, con un promedio de carga soportada de 1214.45 N $\pm$ 137.45 N y una deflexión mayor a las anteriores, de 4.80 mm $\pm$ 0.360 mm. Esta combinación de proceso y orientación de fibras presentó un comportamiento elástico. La fuerza soportada resultó estadísticamente similar las probetas elaboradas por Infusión de Resina con orientación 0° 90°.

Por otro lado, con orientación de -45°+45°, pero utilizando el proceso de Infusión de Resina (Fig. 5b), los esfuerzos soportados disminuyeron a un promedio de 891.87 N $\pm$ 93.70 N, lo mismo con la deflexión, que tuvo promedio de 3.49 mm $\pm$ 1.003 mm. En todos los casos el material falló por delaminación coincidiendo con las muestras probadas con orientación a 0° 90°.

Los modos de falla en los materiales compuestos son difíciles de predecir pues intervienen varios mecanismos de falla que interactúan entre sí, tal como lo explican Arias y Vanegas [16], a los cuales puede atribuirse parte de la dispersión de los resultados. Sin embargo, en las pruebas realizadas, se encontró una clara diferencia en la aparición de las fallas entre los especímenes de prueba fabricados por los dos procesos bajo análisis, presentándose fallas por fractura con el proceso de Hand Lay-Up y fallas por delaminación sólo cuando se utilizó el proceso de Infusión de Resina.

Estos resultados coinciden con el estudio realizado por Williams [6], en los que utilizó el proceso de Vaccum Wet Lay-Up y reporta una adherencia deficiente, presentándose delaminación entre el compuesto y los núcleos de ABS. Esto puede atribuirse a que, al aplicar vacío, se obtiene una mayor compactación de las láminas, controlando la cantidad de resina aplicada de manera más uniforme sobre las fibras, dando como resultado un mayor contacto entre las capas y desalojando el exceso de resina, lo cual explica un grosor menor a las probetas por Hand Lay-Up (Tabla 1), como lo menciona Gu [17]. Por lo anterior, se observó que estas características de los procesos que utilizan vacío pueden no favorecer la adherencia del ABS con los materiales compuestos.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha mostrado una serie de pruebas, para evaluar el efecto que tiene la orientación de las fibras de carbono y el proceso de manufactura, en la resistencia a la flexión y en la deflexión del material laminado al ser sometido a fuerzas de flexión.

Los resultados han mostrado evidencias de, que tanto la orientación de fibras como el proceso de manufactura, inciden en el comportamiento del material compuesto con núcleos por prototipado rápido. El proceso de Hand Lay-Up ofreció los mejores resultados debido a que en las pruebas realizadas no presentó problemas de delaminación. Además, si se desea un material con mayor rigidez, se debe utilizar la orientación de fibras 0° 90°. Por otro lado, si se utiliza la orientación -45° +45°, el resultado que se obtiene es un material con una resistencia y rigidez menor, aunque con un comportamiento elástico. Con el proceso de Infusión de Resina con orientación a fibras 0° 90°, se obtuvieron valores de fuerza de flexión soportada similares a los obtenidos por Hand Lay-Up a -45° +45°, sin embargo, presentaron fallo por delaminación.

Con los resultados obtenidos se tiene evidencia de que el uso de núcleos de ABS reforzados con materiales compuestos a través del proceso Hand Lay-Up es adecuado para obtener materiales la-

minados que no presenten problemas de delaminación, además, dado que el núcleo central se construye por prototipado rápido, el proceso de manufactura puede prescindir de un molde, lo que lo hace más económico.

Como trabajo futuro, se sugiere realizar pruebas de flexión, que incluyan como factores de estudio el número de capas de fibra de carbono, y la combinación de las dos orientaciones utilizadas en este análisis, para estudiar el cambio que se pueda provocar en las fuerzas de flexión soportadas; esto con el objetivo de que los materiales laminados puedan alcanzar un nivel de resistencia para su uso potencial en la manufactura de prótesis de uso deportivo, tomando como referencia el análisis de resistencias realizado por Beck, a distintos modelos de prótesis deportivas comerciales [18] each prosthetic manufacturer recommends prostheses based on subjective stiffness categories rather than performance based metrics. The actual mechanical stiffness values of running-specific prostheses (i.e. kN/m. Con esto se lograría combinar las ventajas de personalización que ofrece la fabricación aditiva, con la resistencia de los materiales compuestos. Para poder utilizar el proceso de Infusión de Resina se sugiere realizar pruebas modificando el acabado superficial de los núcleos, que posiblemente ayude a obtener una mejor adherencia con el material compuesto.

REFERENCIAS

[1] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, and F. Martina, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004

[2] Y. Tang and Y. F. Zhao, "A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance," Rapid Prototyp. J., vol. 22, no. 3, pp. 569–590, 2016. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004

[3] Z. Quan, A. Wu, M. Keefe, X. Qin, J. Yu, J. Suhr, J.-H. Byun, B.-S. Kim, and T.-W. Chou, "Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites: opportunities and challenges," Mater. Today, vol. 18, no. 9, pp. 503–512, Nov. 2015. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004

[4] A. R. Torrado, C. M. Shemelya, J. D. English, Y. Lin, R. B. Wicker, and D. A. Roberson, "Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing," Addit. Manuf., vol. 6, pp. 16–29, Apr. 2015. DOI: 10.1016/j.addma.2015.02.001

[5] D. Calestani, M. Villani, M. Culiolo, D. Delmonte, N. Coppedè, and A. Zappettini, "Smart composites materials: A new idea to add gas-sensing properties to commercial carbon-fibers by functionalization with ZnO nanowires," Sensors Actuators B Chem., vol. 245, pp. 166–170, Jun. 2017. DOI: 10.1016/j.addma.2015.02.001

[6] R. R. Williams, W. E. Howard, and S. M. Martin, "Composite sandwich structures with rapid prototyped cores," Rapid Prototyp. J., vol. 17, no. 2, pp. 92–97, Mar. 2011. DOI: 10.1108/13552541111113835

[7] ASTM D790-17, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org,". DOI 10.1520/D0790-17.

[8] F. Cucinotta, E. Guglielmino, and F. Sfravara, "Life cycle assessment in yacht industry: A case study of comparison between hand lay-up and vacuum infusion," J. Clean. Prod., vol. 142, Part, pp. 3822–3833, Jan. 2017.

[9] S. A. Hadigheh, R. J. Gravina, S. Setunge, and S. J. Kim, "Bond characterization of adhesively bonded joints made with the resin infusion (RI) process," Int. J. Adhes. Adhes., vol. 57, pp. 13–21, Mar. 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.080

[10] L. M. Collins, J. J. Dziak, K. C. Kugler, and J. B. Trail, "Factorial Experiments: Efficient Tools for Evaluation of Intervention Components," Am. J. Prev. Med., vol. 47, no. 4, pp. 498–504, 2014. DOI: /doi.org/10.1016/j.amepre.2014.06.021

[11] P. S. Ellen and M. P. Fitzgerald, "Factorial Experimental Design," in Wiley Encyclopedia of Management, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015, pp. 1–2. DOI: /doi.org/10.1016/j.amepre.2014.06.021

[12] L. Nolan, "Carbon fibre prostheses and running in amputees: A review," Foot Ankle Surg., vol. 14, no. 3, pp. 125–129, 2008. DOI: /doi.org/10.1016/j.amepre.2014.06.021

[13] E. Barbero, Introduction to Composite Materials Design, 3rd Editio. Boca Raton, 2018.DOI: /doi.org/10.1016/j.amepre.2014.06.021

[14] A. Composites, "No Title," EZ Lam-30 Physical and Technical Properties, 2014. [Online]. Available: https://crockercommerce.azureedge.net/0012-content/EZ-Lam-30-and-60_PDS.pdf.

[15] H. Mendoza-Nava, M. Talavera-Ortega, F. Estrada-De los Santos, S. Mendoza-Facio, and O. Jiménez-Arévalo, "Caracterización de materiales compuestos reforzados con fibra de carbono fabricados por el método de infusión para aplicaciones aeronáuticas," Memorias del XX Congr. Int. Anu. La SOMIM, pp. 383–845, 2014. Available: http://somim.org.mx/siam/librosomim2014/pdfs/A3/A3_252.pdf

[16] L. S. Arias Maya and L. Vanegas Useche, "Falla De Los Materiales Compuestos Laminados," Sci. Tech., vol. X, pp. 113–118, 2004.

[17] Y. Gu, X. Tan, Z. Yang, M. li, and Z. Zhang, "Hot compaction and mechanical properties of ramie fabric/epoxy composite fabricated using vacuum assisted resin infusion molding," Mater. Des., vol. 56, pp. 852–861, Apr. 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.077

[18] O. N. Beck, P. Taboga, and A. M. Grabowski, "Characterizing the Mechanical Properties of Running-Specific Prostheses," PLoS One, vol. 11, no. 12, p. e0168298, Dec. 2016. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168298

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, por el apoyo brindado para la utilización de sus instalaciones.

MATERIAL ADICIONAL

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8980-1.pdf