

Compression Characterization of Carbon Fiber/Epoxy Plates Reinforced with Veils and Oval Stress Concentrators

Caracterización bajo compresión de placas de fibra de carbono/epoxi reforzadas con velos y con concentradores de esfuerzo ovalados

Claudia Sofia Rangel Lopez¹, Jesus Rodriguez Campos², Víctor Alfonso Ramírez Elías³

^{1,2}Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, CP. 36885, México.

³Grupo de Investigación MACO. Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, CP. 36885, México.
cs.rangellopez@ugto.mx¹, j.rodriguezc Campos@ugto.mx², va.ramirez@ugto.mx³

1. Resumen

Este proyecto presenta la caracterización mecánica bajo compresión de placas de fibra de carbono/epoxi reforzadas con velos y con agujeros de geometría ovalada. Se utilizó el método VARTM para la manufactura de las probetas. Los agujeros se generaron mediante maquinado en fresadora CNC. Los especímenes se sometieron al ensayo de compresión después del impacto (CAI, Compression After Impact). Los resultados muestran las fuerzas a las cuales se rompen las probetas, lo que resultó en el aumento de la tenacidad a la fractura al agregar refuerzos interlaminares.

Palabras clave: Velo, PPS, Material compuesto, VARTM, CAI, CFRP.

2. Introducción

Un material compuesto es la combinación de dos o más materiales que aportan sus propiedades para formar un nuevo material con propiedades mejoradas. Específicamente, lo conforman dos partes importantes que son la matriz y el refuerzo, donde la matriz es la que mantiene unidos a los refuerzos (un ejemplo de matriz son las resinas epóxicas), y el refuerzo se añade para mejorar las propiedades mecánicas como la resistencia, rigidez, etc.; por lo general los refuerzos se presentan en formas de fibras tejidas donde las propiedades dependen de la orientación y el número de estas. Estos materiales suponen muchas ventajas, entre las cuales se destaca la característica de ser muy ligeros sin comprometer su resistencia.

Los materiales compuestos laminados se forman mediante la superposición de capas de refuerzos (fibras) embebidas en una matriz polimérica. Este diseño permite optimizar la orientación de las fibras, el número de capas, la adición de refuerzos interlaminares u otras capas de diferentes materiales como la fibra de carbono, fibra de vidrio, kevlar, etc., esto con el fin de mejorar las propiedades mecánicas.

Como ya se mencionó, los materiales compuestos proporcionan ventajas mecánicas y estructurales, es por eso por lo que son ampliamente usados en los sectores aeroespacial, automotriz y deportivo. Su aplicación ha sido influenciada en gran medida por el sector de la aviación, ya que los materiales compuestos representan hasta un 50% de la estructura del fuselaje (Kassapoglou, 2015), reduciendo el peso de la aeronave, sin sacrificar sus propiedades mecánicas. Actualmente en el avión comercial Boeing 787, los materiales compuestos representan el 50% de todos los materiales utilizados en dicha aeronave (Boeing, 2018). En el sector automotriz se aplican principalmente en los autos de alta gama y autos eléctricos. El chasis de materiales compuestos puede reducir el peso del vehículo hasta un 60% y al mismo tiempo mejorar la seguridad en caso de choque debido a que la fibra de carbono es más rígida y resistente que el acero y el aluminio como señalan (El-Eswed et al., 2024), además esto representa ahorro de combustible, por ejemplo, al reemplazar un chasis de acero de 300 kg por uno de fibra de carbono de solo 100 kg, se logra una reducción de 200 kg. Aunque el costo por kilogramo de fibra de carbono es más alto (aproximadamente \$22.50 USD/kg frente a \$1.25 USD/kg del acero), el ahorro en peso por cada dólar invertido es de 9.38 kg/USD (Trading

Economics, s. f.), lo que se traduce en menor consumo energético, menor desgaste de componentes y mejor desempeño. El mercado global de materiales compuestos ha alcanzado los 95.6 mil millones en 2024 y con proyecciones de crecimiento anual del 7.8% hasta el 2030, según estudios recientes (Inspenet, 2024).

Los materiales compuestos comúnmente necesitan tener barrenos o agujeros para uniones mecánicas, lo cual supone una concentración de esfuerzo en esa región, lo que reduce su resistencia a la compresión (Perillo et al., 2018). Por otro lado, el proceso de manufactura de corte genera daño en la zona, lo que genera agrietamiento en la matriz e incrementa la probabilidad de delaminaciones. Esto afecta las aplicaciones para el sector aeroespacial donde las condiciones climáticas de vuelo generan daños en el material por delaminación. El estudio de mecanismos de falla en materiales compuestos laminados con concentradores de esfuerzos debe garantizar la integridad estructural y seguridad del elemento.

Una estrategia para retardar la propagación de grietas y delaminaciones consiste en incorporar refuerzos interlaminares, conocidos comúnmente como velos entre las capas del laminado. Estos refuerzos ayudan a distribuir homogéneamente el esfuerzo en el laminado (Rivera Castañeda, 2021), disminuyendo así la concentración de esfuerzo en esa zona.

La geometría de los concentradores de esfuerzo (barrenos) más usada es la geometría circular ya que es la más común, la más fácil de manufacturar y la más estandarizada, sin embargo, como ya se mencionó al introducir estos concentradores en el material, se reduce la resistencia a la compresión. Un proyecto de posgrado en la Universidad de Guanajuato del autor Rivera Castañeda (2021) demostró que el barreno en forma de elipse en probetas de fibra de carbono/epoxi reduce a 16 kN su resistencia a la compresión. Cabe mencionar que las probetas de fibra de carbono/epoxi sin concentradores de esfuerzo soportan cargas a compresión de 19 kN y las probetas con concentradores circulares soportaron alrededor de 14 kN, por lo que se concluyó que la geometría ovalada aumento la resistencia a la compresión.

En este proyecto de Verano de la Ciencia, se fabricaron placas de fibra de carbono/epoxi reforzadas con velos y con concentradores de esfuerzo ovalados con el objetivo de estudiar y caracterizar el comportamiento mecánico de resistencia a la compresión de este tipo de laminados.

3. Metodología

La metodología que se empleó consistió en la fabricación de laminados compuestos de fibra de carbono/epoxi con refuerzos interlaminares (velos) y concentradores de esfuerzos de geometría ovalada, con el objetivo de evaluar su comportamiento mecánico bajo compresión.

3.1 Manufactura

Para la fabricación de las probetas de material compuesto se utilizaron materiales como tela de fibra de carbono del tipo de tejido plain weave 3k bidireccional 0°/90° como refuerzo principal, incorporándole un velo interlaminar de PPS Veil (polifenilsulfuro) con un peso por unidad de área de 10 g/m², con el objetivo de mejorar la resistencia a la delaminación. Como matriz polimérica se utilizó resina epóxica KFR-120 y endurecedor KFH-163, ambos productos del proveedor EPOXEMEX®.

Para llevar a cabo el proceso de fabricación mediante el método VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), se emplearon los siguientes materiales secundarios: malla ABS, peel ply, un molde de aluminio, una bomba de vacío con su respectiva trampa de resina, y una campana de desgasificación.

El corte de las probetas se realizó con una sierra de mesa equipada con disco de diamante, operando a una velocidad recomendada de entre 3,000 y 5,000 RPM, ideal para materiales compuestos como la fibra de carbono. El mecanizado posterior se efectuó utilizando un cortador de tungsteno de 3/8".

El proceso de manufactura de la placa (laminado) se llevó a cabo mediante el método VARTM. En primer lugar, se realizó el apilamiento de las capas que conforman el laminado y las capas auxiliares para la manufactura. Las fibras de carbono tejidas, el velo interlaminar, la malla ABS y el peel ply fueron cortados manualmente con dimensiones de 24 × 18 cm.

La configuración del laminado consistió en 8 capas de tela de fibra de carbono, incorporando el velo en la mitad de la configuración para mejorar la resistencia a la delaminación. Una vez colocadas las capas en el molde, se procedió a preparar el sistema de vacío para el proceso de infusión de resina. En la Figura 1 se muestra el esquema del apilamiento de materiales utilizado en la configuración de la preforma.

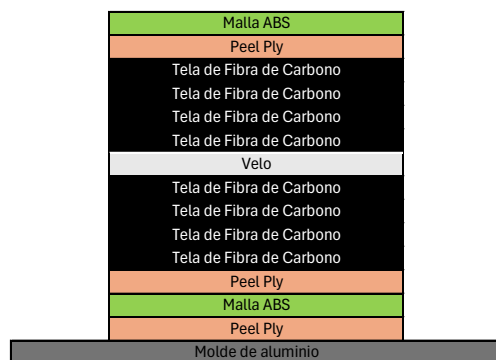


Figura 1. Apilamiento de los materiales para la preforma.
Fuente: Imagen propia.

Teniendo esta configuración se procedió a realizar el sellado al vacío donde se utilizó vacuum bagging para mantener el vacío, donde se mantuvo una presión de -25 inHg. El sellado al vacío de la placa se dejó reposar por 24 horas, esto para asegurar la integridad del sistema.



Figura 2. Configuración del sistema de vacío.
Fuente: Fotografía de elaboración propia.

La resina epóxica se mezcló con el endurecedor donde la relación de la mezcla según el fabricante (%W/W 29% de resina epóxica), y posteriormente se desgasificó por 15 min para eliminar burbujas de aire. La mezcla fue introducida en el sistema mediante infusión por vacío, asegurando una impregnación uniforme y libre de burbujas. Una vez completada la infusión de la resina, el conjunto fue colocado en un horno precalentado a 80 °C, se dejó durante 8 horas a temperatura constante.

Después del curado se cortaron las probetas con dimensiones de 8.2 x 5.5 cm debido a que así lo exige la norma ASTM D707 para pruebas a compresión en materiales compuestos.

Posteriormente se mecanizaron concentradores de esfuerzo ovalados (10 x 15 mm) en el centro de cada probeta utilizando una fresadora CNC (Control Numérico Computarizado) con un cortador de carburo de tungsteno de 3/8", ya que como la fibra de carbono es abrasiva se necesita que la herramienta de corte sea resistente al desgaste, además a diámetros pequeños y a velocidades de corte relativamente altas se evita que ocurra delaminación en la zona donde se genera el barreno (Sultan et al., 2021). Los parámetros de corte se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de corte.

Revoluciones (RPM)	Avance (in/min)	Velocidad de corte (mm/rev)
3100	1/2	0.04

Fuente: Adaptado de (Rivera Castañeda, 2021).

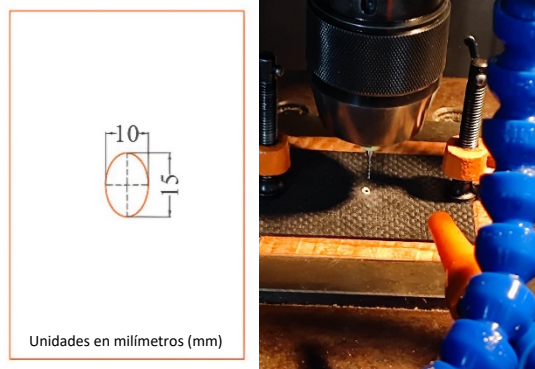


Figura 3. Mecanizado de los concentradores de esfuerzo ovalados.
Fuente: Elaboración propia.

3.2 Ensayo de compresión después del impacto

Se realizó el ensayo de compresión después del impacto (CAI). Las probetas obtenidas fueron sometidas a pruebas de compresión en una maquina INSTRON 8872®, con una velocidad de carga de 0.5 mm/s. Con esto se registraron los valores de carga máximos de las probetas y se observó el modo de falla en la configuración. Los especímenes se colocaron en una fijación CAI para hacer el ensayo estandarizado por la norma BSS 7260 como se muestra en la Figura 4.

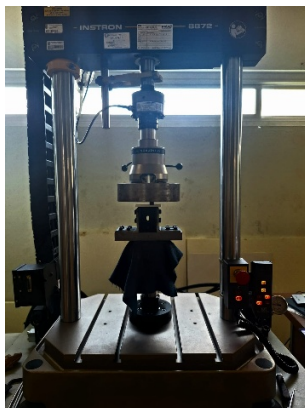


Figura 4. Ensayo de compresión después del impacto.
Fuente: Fotografía de elaboración propia.

4. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos del ensayo de compresión después del impacto (CAI) de las probetas de fibra de carbono/epoxi con refuerzo interlaminar (velo PPS) y concentrador de esfuerzo ovalado. Para ello, se compararon con los resultados obtenidos del estudio de Rivera Castañeda (2021), quien evaluó especímenes con las mismas condiciones de prueba, las mismas dimensiones y el mismo concentrador de esfuerzo pero sin el refuerzo interlaminar. En la Figura 5 se comparan los resultados de ambos estudios. Primero, en la Tabla 2 se muestran las cargas máximas a las cuales se fracturaron los especímenes del presente proyecto.

Tabla 2. Carga máxima soportada por las probetas en Newtons (N).

Espécimen	Espécimen	Espécimen
1	2	3
17,000	16,000	16,500

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente gráfica (Figura 5), se observa que la resistencia a la compresión de las probetas con refuerzo es menor que las que no lo tienen. Se sacrificó una resistencia a la compresión de 1,354 N al agregar el refuerzo interlaminar.

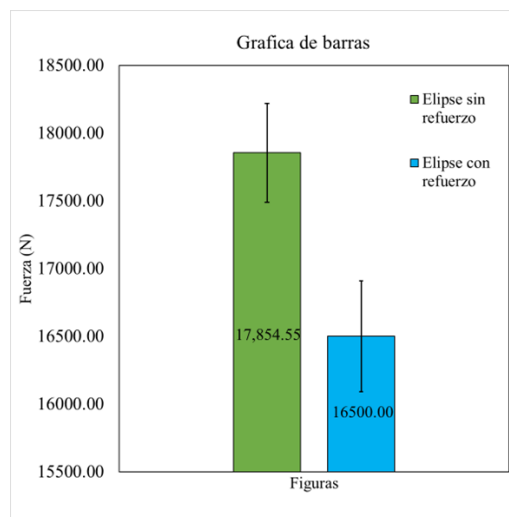


Figura 5. Resistencia a la compresión de los especímenes con concentradores de esfuerzo ovalados con y sin refuerzo.
 Fuente: Elaboración propia con base en Rivera Castañeda (2021).

A continuación, la Figura 6 muestra el comportamiento elástico de ambos tipos de especímenes durante el tiempo que duraron los ensayos. Para el espécimen con refuerzo se ajustaron los datos del ensayo CAI a una aproximación lineal. Se observa cómo se redujo la resistencia a la compresión, pero duró más tiempo hasta llegar a la fractura de la probeta. La resistencia de los especímenes sin refuerzo es mayor, pero se llegó a la fractura rápidamente. Aunque la pendiente inicial es similar, el comportamiento de las probetas con velo muestra mayor deformación antes de fracturarse.

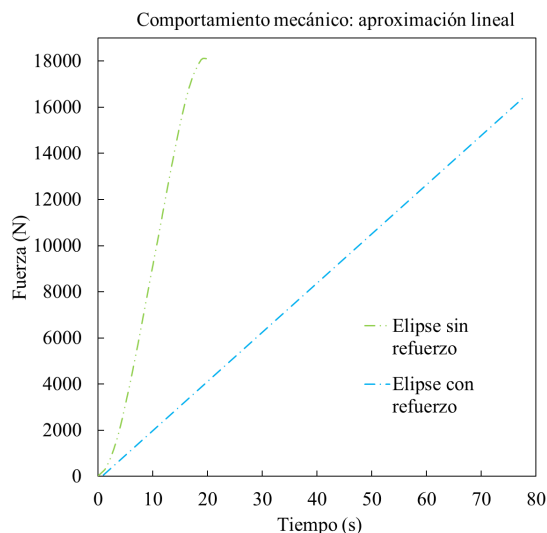


Figura 6. Resistencia a la compresión de los especímenes con concentradores de esfuerzo ovalados con y sin refuerzo.
Fuente: Elaboración propia con base en Rivera Castañeda (2021).

En la Figura 7 se pueden observar cómo se fracturaron los especímenes del presente proyecto, por debajo del punto medio del concentrador de esfuerzo. Esto indica un patrón de falla más controlado.



Figura 7. Especímenes con concentradores de esfuerzo ovalados con velos fracturados.
Fuente: Fotografía tomada por los autores.

Es importante mencionar que en el estudio de Rivera Castañeda (2021), él reportó que la fractura de las probetas fue aleatoria y sin un patrón repetible.

5. Conclusiones

En este proyecto se estudió el comportamiento mecánico a compresión de probetas laminadas de fibra de carbono/epoxi con concentradores de esfuerzo ovalados, reforzadas con velos, manufacturadas mediante el método de VARTM y ensayadas mediante la prueba de compresión después del impacto (CAI) con el propósito de caracterizar su comportamiento bajo compresión.

Los resultados del ensayo de compresión mostraron que se sacrificó ligeramente la resistencia máxima a la compresión en comparación con las probetas sin refuerzo del estudio de Rivera Castañeda (2021), pero hay mejora en su comportamiento en el modo de falla. La función del velo fue homogenizar los esfuerzos y retardar el tiempo de fractura; esto sugiere que el haber incorporado un refuerzo interlaminar (velo), mejora la confiabilidad estructural y mejora la tenacidad del laminado, como se puede apreciar en la Figura 6, ya que se prolonga el tiempo a la fractura y por ende un comportamiento más dúctil, donde el área bajo la curva es la capacidad del material de absorber energía antes de fracturarse (tenacidad), la cual es mayor con el velo. Otro resultado importante que se obtuvo al haber incluido el velo es que hay un patrón de fractura ya que las

probetas se rompieron en la misma zona, caso contrario lo que reportó Rivera Castañeda (2024), donde las grietas fueron aleatorias e irrepetibles entre cada probeta.

Existe cierta variabilidad en el modo de fractura en los materiales compuesto, ósea que no se sabe concretamente dónde ocurrirá, con este trabajo se observó que los refuerzos interlaminares, reducen esa variabilidad. En el ámbito aeroespacial y automotriz incrementar la confiabilidad de los componentes mecánicos y de todo un conjunto como lo es un avión, es muy importante.

Debido a que el proceso de manufactura de los materiales compuestos es costoso y la fibra de carbono en sí misma también, se tuvo la limitante de manufacturar muchos especímenes para esta investigación. Además, como la fibra de carbono es muy abrasiva, lo más recomendable es usar un cortador con incrustaciones de diamante para hacer la remoción de material. Pese a esto, no se tuvieron dificultades ni consecuencias negativas en la manufactura de las probetas que pudiesen influir en el ensayo.

Este estudio abre la puerta a futuras investigaciones donde se pueda variar la secuencia de apilamiento de las fibras con diferentes orientaciones, cambiar la densidad del velo PPS, mayor número de capas, otro tipo de telas (refuerzo) con el fin de extender el conocimiento en esta área de materiales compuestos ya que no existe una extensa literatura sobre laminados compuestos reforzados y barrenados.

Agradecimiento

Este trabajo fue realizado en el XXX Verano de la Ciencia, por lo que agradecemos a la Universidad de Guanajuato y al personal de la institución por el apoyo brindado para que fuese posible la realización del proyecto. Se agradece especialmente al Dr. Víctor Ramírez por su coordinación, capacitación y guía durante el proyecto. Se agradece también el apoyo del M.I. Isaac Rivera, por su acompañamiento para la realización de la manufactura de las probetas, así como su asesoramiento en cada parte de este estudio. Asimismo, agradecemos al Dr. Francisco Reveles por su apoyo en el maquinado de los concentradores de esfuerzo y para la realización de las pruebas de compresión.

Bibliografía/Referencias

- Boeing. (2018). *787 Dreamliner by design: Advanced composite use*. <https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>
- El-Eswed, M. H., Ababneh, A. O., & Kofahi, M. A. (2024). The effect of fiber orientation on the flexural behavior of hybrid composite laminates. *Journal of Engineering Research*, 12(3), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>
- Inspenet. (2024, abril 2). Materiales compuestos avanzados en 2025. *Inspenet*. <https://inspenet.com/articulo/materiales-compuestos-avanzados-en-2025/>
- Instron. (2021). *ASTM D7137 JIS K7089 Boeing® BSS 7260: BSS 7260 post-impact compressive strength of composite laminates*. <https://www.instron.us/en-us/testing-solutions/by-standard/others/boeing174-bss-7260>
- Kassapoglou, C. (2015). *Numerical modelling of failure in advanced composite materials*. Woodhead Publishing. <https://www.sciencedirect.com/book/9780081003329/numerical-modelling-of-failure-in-advanced-composite-materials>
- Perillo, G., Jørgensen, J. K., Cristiano, R., & Riccio, A. (2018). A numerical/experimental study on the impact and CAI behaviour of glass reinforced composite plates. *Applied Composite Materials*, 25(2), 425–447. <https://doi.org/10.1007/s10443-017-9628-2>
- Rivera Castañeda, I. A. (2021). *Estudio de resistencia a la compresión de materiales compuestos laminados reforzados con reducciones de área* [Tesis de licenciatura, Universidad de Guanajuato]. Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca.
- Sultan, M. T. H., Azmi, A. I., Majid, M. S. A., Jamir, M. R. M., & Saba, N. (2021). *Machining and machinability of fiber reinforced polymer composites*. Springer Nature Singapore.
- Trading Economics. (s. f.). *Steel*. <https://es.tradingeconomics.com/commodity/steel>