



Artículo de investigación

Influencia de la estructura del tejido textil en las propiedades mecánicas a tensión de compuestos híbridos de fibras de carbono/vidrio

Influence of textile weave architecture on the tensile mechanical properties of carbon/glass fiber hybrid composites

Fernando Espinosa Rosas , Enrique Alcudia Zacarias , María del Carmen Acuña Olivos , Daniel Romero Vergara , Fernanda De Jesús-Ramírez , Sandra Yaraset Vara Salas , Luis Alberto Orihuela Martínez 

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior del Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México

Autor de correspondencia: Fernando Espinosa, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior del Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. Correo electrónico: m25ce021@cenidet.tecnm.mx. ORCID: 0009-0000-4206-1328.

Recibido: 16 de abril 2026

Aceptado: 28 de agosto del 2026

Publicado: 15 de septiembre del 2026

Resumen.- En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre la influencia de la estructura del tejido textil en las propiedades mecánicas a tensión de compuestos híbridos carbono/vidrio. Los tejidos seleccionados fueron el plano (plain), asargado (twill) y satén (satin), con fibra de carbono a 0° en la urdimbre y fibra de vidrio a 90° en la trama. Los laminados se fabricaron mediante infusión de resina, obteniendo un contenido total de fibras del 57 %. Las probetas se elaboraron conforme a la norma ASTM D3039 y los ensayos de tensión se realizaron en una máquina universal Shimadzu AG-Xplus 100 kN. Se evaluaron la resistencia última, el módulo de elasticidad y el porcentaje de elongación a la ruptura. Los resultados mostraron que la estructura del tejido influye en el desempeño mecánico de los compuestos híbridos. El tejido plano presentó el mejor comportamiento a tensión, con una resistencia última de 221 ± 33 MPa y un módulo de elasticidad de 11.7 ± 0.89 GPa. El análisis estadístico ANOVA de un factor indicó que no existieron diferencias significativas en el Módulo de Elasticidad entre los tejidos evaluados, sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas en el esfuerzo máximo, lo que confirma que el patrón de tejido influye en la resistencia del material compuesto. En conclusión, los compuestos híbridos carbono/vidrio representan una alternativa, ya que la incorporación de fibra de vidrio permite reducir costos sin eliminar las ventajas mecánicas aportadas por la fibra de carbono. Además, la estructura del tejido textil influye en la distribución de esfuerzos y en los mecanismos de daño.

Palabras clave: Material compuesto; Hibridación; Estructura textil.

Abstract.- This work presents an experimental study on the influence of textile weave architecture on the tensile mechanical properties of carbon/glass hybrid composites. The selected weaves were plain, twill, and satin, with carbon fiber oriented at 0° in the warp direction and glass fiber oriented at 90° in the weft direction. The laminates were manufactured by resin infusion, obtaining a total fiber content of 57 %. The specimens were prepared according to the ASTM D3039 standard, and the tensile tests were carried out using a Shimadzu AG-Xplus 100 kN universal testing machine. Ultimate tensile strength, elastic modulus, and elongation at break were evaluated. The results showed that the textile weave architecture influences the mechanical performance of the hybrid composites. The plain weave exhibited the best tensile behavior, with an ultimate tensile strength of 221 ± 33 MPa and an elastic modulus of 11.7 ± 0.89 GPa. A one-way ANOVA statistical analysis indicated that there were no significant differences in Young's modulus among the evaluated weaves; however, significant differences were found in the maximum stress, confirming that the weave pattern influences the ultimate tensile strength of the composite material. In conclusion, carbon/glass hybrid composites represent an alternative to conventional materials, since the incorporation of glass fiber allows the laminate cost to be reduced without eliminating the mechanical advantages provided by carbon fiber. Furthermore, the textile weave architecture influences stress distribution and damage mechanisms during failure.

Keywords: Composite material; Hybridization; Textile structure.



1. Introducción

Los materiales compuestos han tomado una gran importancia en diferentes tipos de industrias, debido a su ligereza y la posibilidad de adaptar sus propiedades mecánicas (alta resistencia, tenacidad, rigidez y buena resistencia a la compresión) en función de la orientación de sus fibras (1–13). Un tipo de material compuesto son las telas tejidas, a diferencia de las telas unidireccionales que son reforzados con fibras continuas, las telas tejidas integran fibras entrelazadas en orientaciones de 0 grados (urdimbre) y 90 grados (trama). Estos compuestos tejidos se pueden diseñar para obtener diferentes propiedades mecánicas mediante la hibridación de fibras (2,3,14–18). Los compuestos híbridos se obtienen combinando diferentes tipos de fibras, los cuales muestran propiedades mecánicas superiores a los laminados de una sola fibra.

Además, la hibridación permite reducir el costo de los materiales compuestos (1–3,14,15,19–22). La hibridación de la fibra de vidrio y fibra de carbono ha demostrado ser prometedora según estudios previos, esto con el fin de reunir las ventajas de ambas fibras y reducir sus cualidades menos deseadas (17,18,23–28). Una configuración que se puede realizar dentro de la hibridación es que una de las fibras sea de alto módulo de elasticidad y alta resistencia. Sin embargo, estas altas propiedades vienen acompañadas por un alto costo económico y una baja capacidad de elongación a la falla. Ejemplos de este tipo de fibras son la fibra de carbono o el boro. Por lo tanto, con el propósito de disminuir el impacto económico y aumentar la capacidad de elongación, se utiliza en la hibridación una segunda fibra que tiene menor costo económico, pero mayor capacidad de elongación a la falla, como lo son las fibras de vidrio o el Kevlar.

El material híbrido comparte las ventajas de ambas fibras. La fibra de alto módulo de elasticidad, alta resistencia y baja elongación a la falla, dentro de la hibridación, aumenta la capacidad de rigidez de una estructura y aumenta la capacidad de soportar mayor carga. Por otro lado, la fibra de alta elongación permite que el material híbrido sea más tolerante al daño y permite mantener un bajo costo económico.

Las propiedades mecánicas de un material compuesto híbrido pueden variar acorde a la cantidad presente de fibra de alto módulo de elasticidad, fibra de baja elongación y matriz. Una de las razones por las que se hace la hibridación carbono/vidrio es porque el carbono tiene una mala capacidad de resistencia al daño en comparación con las aleaciones de acero, por lo tanto, se opta por colocar fibra de vidrio, con el fin de mejorar la deformación última y las propiedades de impacto (24). Khatri et al (29) estudiaron la respuesta de la tracción de compuestos híbridos hechos de fibra de vidrio y carbono, los resultados experimentales mostraron un aumento en la capacidad de deformación del material híbrido en comparación con la fibra de carbono. Jingliang Gong et al (7) mencionan que los tejidos bidimensionales (2D), poseen una buena integridad estructural como a su vez una excelente resistencia al corte y al impacto, la forma del patrón de tejido puede ser liso (plano), sarga y satén, donde el tejido plano tiene un mayor número de entrelazamientos entre la urdimbre y la trama lo que genera un mecanismo de daño interno.

Aruchamy et al (30) estudiaron el efecto de la carga en compuestos híbridos de algodón y bambú, donde concluyeron que el patrón plano híbrido mejoró las propiedades mecánicas. Donovan et al (31) evaluaron un compuesto de tejido plano híbrido con carbono en urdimbre y vidrio en trama, evidenciando una respuesta mecánica fuertemente dominada por la orientación de la fibra de carbono. Por otra parte, Tewani et al (2) compararon patrones de tejido y arquitecturas combinadas, observando variaciones significativas en módulo y resistencia.



Khaddour et al [4] analizaron laminados tejidos plano con carbono, vidrio y Kevlar, mostrando que el contenido de resina y la fracción de carbono modifican la rigidez, resistencia y ductilidad. Finalmente, Wu et al (1). Compararon la hibridación a nivel intercapa e intracapa en carbono/vidrio y reportaron incrementos de módulo y resistencia al aumentar el contenido de carbono.

En el presente trabajo, se estudió la influencia de la estructura del tejido textil en la respuesta mecánica a tensión de compuestos híbridos reforzados con fibras de carbono/vidrio. Los tejidos seleccionados fueron el plano (plain), asargado (twill) y satín (satin), con la colocación de la fibra de carbono a 0° (urdimbre) y la fibra de vidrio a 90° (trama). Por lo tanto, la presente investigación se centra en los cambios que se puedan registrar en la resistencia última (σ_u), módulo de elasticidad (E) y modo de falla a través de los efectos de la hibridación.

2. Procedimiento experimental

2.1 Materiales y configuración

El refuerzo de baja elongación (LE) seleccionado corresponde a una fibra de carbono unidireccional 12K con un peso de 200 g/m^2 , la cual se caracteriza por un alto módulo de elasticidad y alta resistencia mecánica. Por otro lado, el refuerzo de alta elongación (HE) está constituido por la fibra de vidrio 600 g/m^2 , la cual presenta una mayor capacidad de deformación antes de la falla. En cuanto a la matriz, se utilizó una resina epoxi Epolam 5015 y su respectivo endurecedor Epolam 5015. La combinación de resina y endurecedor permite tener una mezcla de muy baja viscosidad, una excelente capacidad de humectación de los refuerzos, y excelentes propiedades mecánicas. Además, con esta mezcla tiene un tiempo de trabajo de alrededor de 135 minutos. Los tres tipos de tejidos híbridos que se estudiaron fueron los patrones planos (1×1), asargado (4×4) y satín (5 harness), ver Figura 1. En el tejido plano (1×1), cada hilo de trama pasa alternadamente por encima y por debajo de cada hilo de urdimbre, generando un punto de entrelazamiento en cada cruce. Esta configuración produce la mayor frecuencia de entrelazamiento entre los tres patrones estudiados y, por tanto, flotaciones relativamente cortas.

En el tejido asargado (4×4), los hilos presentan flotaciones más largas. En esta configuración, cada hilo de trama pasa sobre 4 hilos de urdimbre y posteriormente por debajo de 4, generando un patrón que se repite periódicamente. En comparación con el tejido plano, este patrón reduce la frecuencia de los puntos de entrelazamiento. Por último, el tejido satín (5 harness) presenta un patrón periódico que se repite cada cinco hilos. El hilo de trama pasa sobre cuatro hilos de urdimbre y por debajo de uno. Debido a que los puntos de entrelazamiento se encuentran más separados, este patrón presenta una menor frecuencia de cruces que el tejido plano y flotaciones más largas.

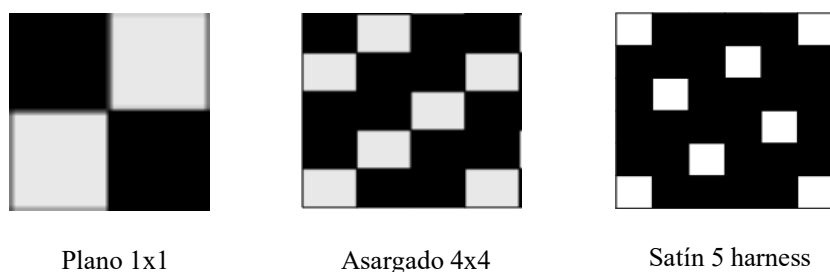


Figura 1. Esquemización de los tejidos plano, asargado y satín.



En la Figura 2 se muestran los tres tejidos híbridos construidos a través de un telar. Este dispositivo permite controlar de manera precisa la posición de las fibras (urdimbre y trama), manteniendo una tensión constante durante el tejido. Así, como la fabricación de diferentes tipos de tejidos, repetibilidad y versatilidad.



Tejido Plano

Tejido Asargado

Tejido Satín

Figura 2. Tejidos elaborados en telar de madera.

Los tejidos híbridos fueron fabricados utilizando fibra de carbono en la dirección de la urdimbre (posición vertical), mientras que la fibra de vidrio se colocó en la dirección de la trama (posición horizontal). Es importante señalar que, en los tres tipos de tejidos híbridos desarrollados, se mantuvo la misma orientación de fibras. El material compuesto se obtuvo mediante el proceso de manufactura de infusión de resina (32). Esta técnica se considera una alternativa eficiente frente a otros métodos tradicionales, debido a su capacidad para producir laminados con un adecuado control del contenido de resina. El proceso de manufactura consiste en un sistema cerrado en el cual se aplica el vacío, la succión que se genera le da acceso a la resina a través de la manguera de entrada, y durante su paso impregna las fibras hasta llegar a un punto de saturación de resina, posteriormente, ésta empieza a entrar a la trampa de resina a través de la manguera de salida, y con esto se puede concluir la infusión de resina en el laminado, cerrando las válvulas de paso en las mangueras de entrada y salida (32).

2.2 Ensayos a tensión

Se llevaron a cabo ensayos de tensión utilizando una máquina universal Shimadzu AG-Xplus 100 kN, con el objetivo de evaluar la influencia de los diferentes patrones de tejido en la respuesta mecánica de los materiales compuestos. Los especímenes fueron maquinados utilizando una fresadora, con dimensiones finales de 250 mm × 25 mm cada probeta. Se obtuvieron 3 especímenes para cada laminado de estudio. Con el fin de minimizar la concentración de tensiones en las zonas de sujeción y evitar fallas prematuras en las mordazas, se colocaron lengüetas elaboradas a partir de lijas de agua en ambos extremos de la probeta con una longitud de 50 mm.

Los ensayos se realizaron conforme a la norma ASTM D3039, manteniendo una velocidad de ensayo constante de 1 mm/min. Para la medición precisa de la deformación longitudinal, se utilizó un extensómetro Epsilon extensometer. La configuración experimental empleada se presenta de manera esquemática en la Figura 3. Con respecto a las propiedades mecánicas, la resistencia y el módulo de elasticidad se obtuvieron a través de las recomendaciones de la norma ASTM D3039.



Figura 3. Configuración de los ensayos de tensión.

3. Resultados experimentales y discusión

3.1 Manufactura

En la figura 4 se muestra la comparación del espesor, masa y ancho promedio de las probetas de los diferentes tejidos (plano, asargado y satín). Las barras corresponden a los valores promedios obtenidos para cada variable. En el ancho tuvo un valor promedio de 25 mm con una dispersión de ± 0.96 mm en el satín, ± 0.68 mm en el twill, y ± 0.90 mm en el plano. Por otro lado, en el espesor se obtuvo un valor promedio de 0.81 mm con una dispersión de ± 3.25 mm en el satín, ± 0.06 mm en el twill, y ± 0.31 mm en el plano. Por último, en la masa se obtuvo un valor promedio de 5.85 g con una dispersión de ± 0.21 g en el satín, ± 0.03 g en el twill, y ± 0.25 g en el plano.

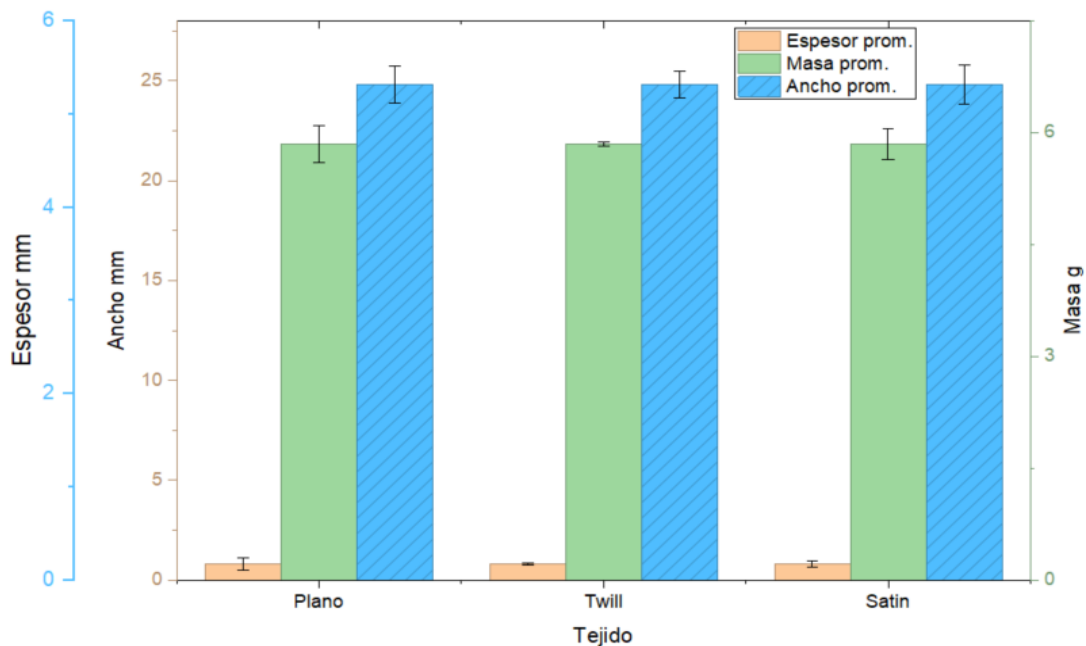


Figura 4. Comparación del espesor, masa y ancho promedio de las probetas según el tipo de tejido.



La cantidad de material dentro del compuesto se obtuvo considerando la masa de la fibra de vidrio, carbono y matriz presentes en cada tipo de tejido, los tres tejidos (plano, asargado y satín), fueron fabricados con la misma proporción de fibras de carbono y vidrio, la variación se centra en la cantidad de resina que está en función del proceso de infusión. En la Tabla 1 se muestra la fracción volumétrica de los materiales que conforman al material compuesto. La fibra de vidrio, con una densidad de 2.60 g/cm^3 , alcanzó una fracción volumétrica de 48.23% , la cual representa la mayor proporción dentro del compuesto. Por su parte, la fibra de carbono posee una densidad de 1.78 g/cm^3 , y corresponde al 8.67% del volumen total. Finalmente, la resina, con una densidad de 1.20 g/cm^3 , constituye el 43.09% del volumen del material.

Tabla 1. Fracción de volumen del material compuesto.

Material	Fracción de volumen (%)
Vidrio	8.67 ± 0.25
Carbono	48.23 ± 0.03
Resina	43.09 ± 0.21

3.2 Propiedades mecánicas

En la Figura 5 se presentan las curvas esfuerzo – deformación correspondiente a los tejidos plano, asargado y satín, respectivamente. Cada curva muestra el comportamiento promedio obtenido a partir de tres probetas ensayadas por cada tipo de tejido, incluyendo además la dispersión de los datos. Este último comportamiento se puede asociar a la naturaleza del proceso de manufactura, el cual involucra el tejido manual y la fabricación por infusión de resina. Se puede observar en las tres curvas un comportamiento aproximadamente lineal al inicio de la respuesta mecánica a la tensión del material compuesto. La pendiente inicial de cada curva corresponde al módulo de elasticidad del material, parámetro que fue determinado siguiendo las recomendaciones establecidas en la norma ASTM D3039 (33). Además, se puede observar que la falla del material compuesto se registra sin que aparezca un punto de resistencia de fluencia o cedencia, es decir, conforme aumenta el comportamiento esfuerzo-deformación, llega un momento en que el material alcanza su falla final sin demostrar una deformación plástica. Este último comportamiento, es una característica de los materiales frágiles, tales como, la fibra de vidrio y carbono. Por lo tanto, el tipo de falla que se registra en estos materiales frágiles es del tipo explosiva o catastrófica.

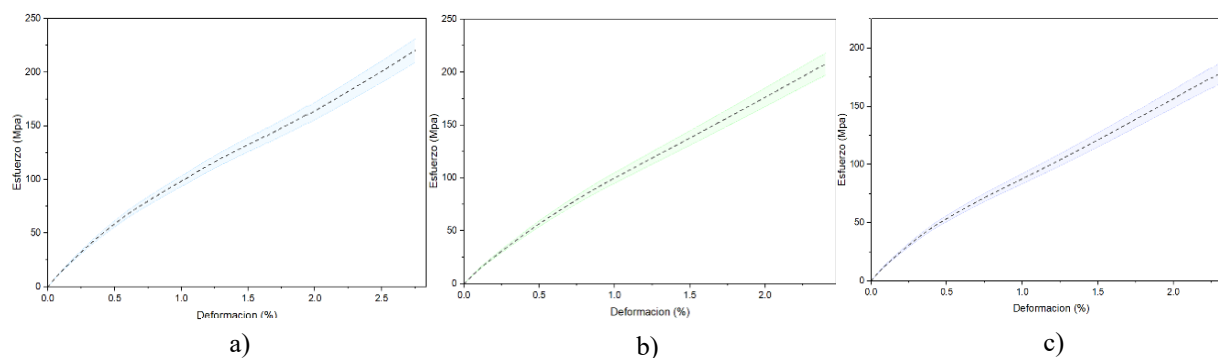


Figura 5. Gráficas de esfuerzo-deformación promedio de los ensayos a tensión, incluyendo su dispersión: a) tejido plano, b) tejido asargado, c) tejido satín.



El análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta estadística empleada para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de dos o más configuraciones experimentales. En este estudio, se realizó un ANOVA de un solo factor para evaluar la influencia del tipo de tejido sobre las propiedades mecánicas, específicamente el módulo de elasticidad y el esfuerzo máximo. Se utilizaron tres probetas por configuración ($n = 3$), tamaño de muestra que ha sido empleado previamente en investigaciones experimentales de materiales compuestos reforzados con fibras como lo menciona Huzaifa et al (34) y Jothibasur et al (35). Dado el tamaño de la muestra, los resultados del análisis se interpretan dentro del alcance de las condiciones experimentales evaluadas. En las tablas del ANOVA (Tabla 2 y Tabla 3), los Grados de Libertad indican la cantidad de información independiente utilizada para estimar la variación del modelo; la SC Ajust corresponde a la suma de cuadrados ajustada, es decir, la variabilidad atribuida a cada fuente de variación; la MC Ajust representa el cuadrado medio ajustado, obtenido al dividir la suma de cuadrados entre sus grados de libertad; el valor F indica la relación entre la variabilidad causada por el tipo de tejido y la variabilidad experimental o error; y el valor P permite determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas con respecto al nivel de significancia establecido.

En el Módulo de Elasticidad (Tabla 2), los resultados mostraron un valor F de 1.9 y un valor P de 0.229. En este caso los valores P y F fueron mayores que el nivel de significancia de 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula, lo que significa que no se encontraron diferencias estadísticas entre los tejidos para el Módulo de Elasticidad.

En el esfuerzo máximo (Tabla 3), los resultados mostraron diferencias estadísticas entre los tejidos, con un valor de F de 17.58 y P de 0.003, como el valor de P es menor que el nivel de significancia de 0.05, se rechaza la hipótesis nula, lo que nos lleva a tomar la hipótesis alterna que menciona que el tipo de tejido influye en el esfuerzo máximo del material compuesto.

Tabla 2. Análisis de varianza ANOVA para el Módulo de Elasticidad.

Fuente	Grados de libertad	SC Ajust	MC Ajust	Valor F	Valor P
Tejido	2	2.934	1.466	1.9	0.229
Error	6	4.632	0.771		
Total	8	7.566			

Tabla 3. Análisis de varianza ANOVA para el Esfuerzo Máximo.

Fuente	Grados de libertad	SC Ajust	MC Ajust	Valor F	Valor P
Tejido	2	4230.9	2115.4	17.58	0.003
Error	6	722	120.3		
Total	8	4952.9			



En la Tabla 4 se muestran las propiedades mecánicas obtenidas para los tres tipos de tejidos evaluados, específicamente la resistencia última(σ_u) y módulo de elasticidad (E), con el fin de comparar el desempeño mecánico de cada configuración textil. A partir de los resultados experimentales, se observa que el tejido plano alcanza los mayores valores de resistencia última, seguido por el tejido asargado, mientras que el tejido satín presenta los valores más bajos de resistencia antes de la falla.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de tejidos híbridos.

Tejido	E (GPa)	σ_u (MPa)
Plano	11.7 ± 0.89	221 ± 33.0
Asargado	11.1 ± 0.44	211 ± 31.4
Satín	10.7 ± 0.73	205 ± 35.4

3.3 Influencia del tejido textil

En la Figura 6 se presentan, en una sola gráfica, las curvas promedio esfuerzo–deformaciones correspondientes a los tres tipos de tejidos analizados, lo que permite realizar una comparación directa de la influencia del patrón textil en la respuesta mecánica del material compuesto. A partir de estas curvas, se identifica que el tipo de tejido textil juega un papel importante en el desempeño mecánico. Este tipo de comportamiento es similar con la investigación de Kaushlendra et al (4) donde sus resultados muestran que el tipo de patrón híbrido impacta en las propiedades mecánicas.

El módulo de elasticidad no presentó diferencias estadísticamente significativas entre las tres configuraciones evaluadas, ver Tabla 2. Los valores obtenidos fueron 11.7 ± 0.89 GPa para el tejido plano, 11.1 ± 0.44 GPa para el asargado y 10.7 ± 0.73 GPa para el satín. Esto sugiere que el módulo de elasticidad inicial del material no se ve afectado por el tipo de tejido, sino que está más relacionada con las propiedades propias de las fibras y la matriz, por lo tanto, los valores cercanos del módulo de elasticidad (E) pueden explicarse debido a que los tres tejidos presentan la misma cantidad de material y comparten la misma orientación de fibra de carbono y fibra de vidrio dentro del laminado.

En términos de resistencia mecánica, se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las tres configuraciones evaluadas (Tabla 3). Estos resultados indican que el tipo de tejido influye significativamente en el esfuerzo máximo soportado por el material compuesto. El tejido plano alcanzó el mayor valor de esfuerzo (221 ± 33.0 MPa), seguido del tejido asargado (211 ± 31.4 MPa) y por último el tejido satín (205 ± 35.4 MPa), evidenciando una disminución aproximada del 4.5 % para el tejido asargado y del 7.2 % para el tejido satín con respecto al tejido plano. Esta tendencia se puede asociar al grado de entrelazamiento, esto se refiere a la cantidad de puntos en los que los hilos de urdimbre y trama se cruzan e intercalan de manera alternada a lo largo del tejido, ver Figura 7. Tewani et al (2) describe que un menor número de entrelazamientos reduce la resistencia debido a la transferencia ineficiente de esfuerzo entre fibras. En este sentido, el tejido plano, con el mayor grado de entrelazamiento, presenta la mayor resistencia. En contraste, el tejido satín, caracterizado por un menor grado de entrelazamiento, muestra una menor eficiencia en la transferencia de carga, lo que reduce su capacidad para soportar esfuerzos elevados. Por su parte, el tejido asargado presenta un comportamiento intermedio debido a un balance entre entrelazamiento y redistribución de esfuerzos.

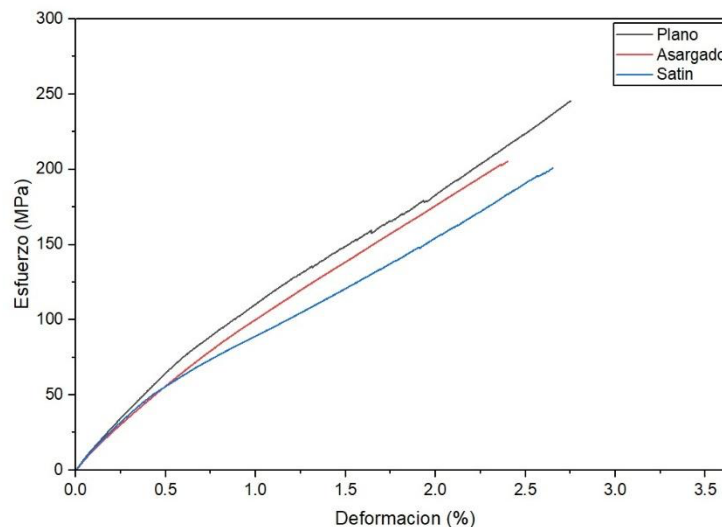


Figura 6. Gráfica de las curvas promedio de esfuerzo-deformación de los tres tejidos.

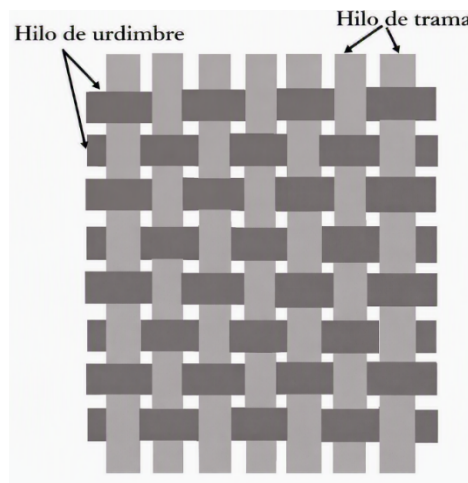


Figura 7. Entrelazamiento de fibras (20).

3.4 Modos de falla

En la Figura 8, 9 y 10 se muestran las fotografías de las zonas de falla de cada uno de los tejidos después de realizados los ensayos de tensión. Estas fotografías se obtuvieron a través de una cámara digital 4K de 48MP con un zoom de 1-150X. El entrelazamiento de las fibras contiene una configuración de 0° en la urdimbre (carbono) y 90° en la trama (vidrio). De acuerdo con la literatura, en los materiales compuestos de tejidos híbridos el daño suele iniciarse mediante la aparición de microgrietas en la matriz, seguido de la separación entre la matriz y las fibras. Posteriormente, el proceso de degradación progresa hacia la separación y la fractura de las fibras. En consecuencia, el patrón de tejido influye en el mecanismo de iniciación y propagación del daño, Chala et al. (36). Por lo tanto, el modo de falla se puede asociar al tipo de patrón que se utiliza en los diferentes tipos de tejidos.



El tejido plano (1x1), al presentar el mayor número de entrelazamientos, es decir, una mayor cantidad de puntos en los que los hilos de urdimbre y trama se cruzan e intercalan de manera alternada, favorece a una transferencia de carga más eficiente entre las fibras de carbono y vidrio. Esto permite que el esfuerzo se distribuya de mejor manera durante el ensayo de tensión, lo que se traduce en una mayor capacidad de resistencia hasta la falla como lo menciona Yentl et al (37). En la Figura 8 se muestra el tejido plano con este tipo de falla explosiva en la matriz y en las fibras, comportamiento que puede asociarse con el mayor nivel de entrelazamiento en este tipo de tejido.

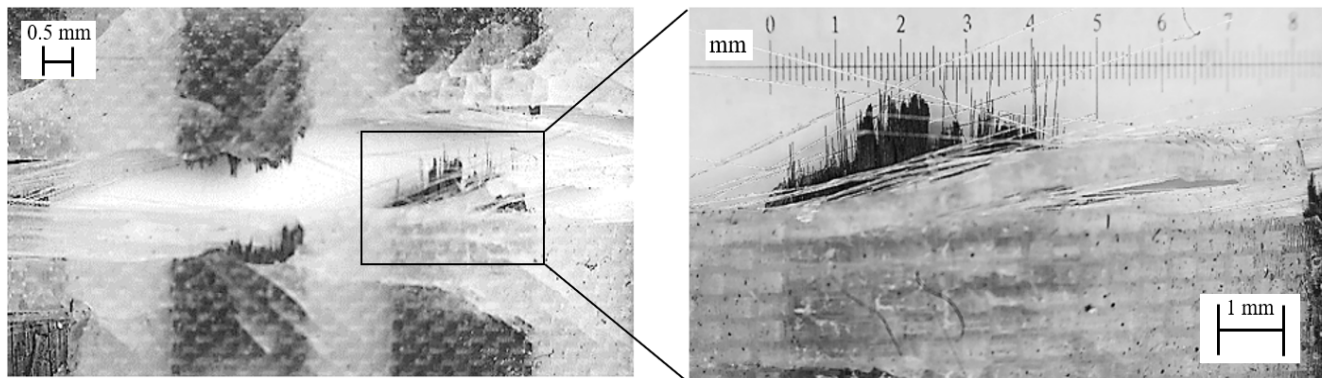


Figura 8. Fotografías del modo de falla del tejido plano después de los ensayos de tensión.

Por otro lado, el tejido asargado (4x4) exhibe un comportamiento menor en la resistencia mecánica con respecto al tejido plano, esto se puede asociar a que tiene un menor número de entrelazamientos. En la Figura 9 se observa que el tejido asargado tuvo un modo de falla menos catastrófico, pero se puede apreciar el efecto explosivo entre la matriz y las fibras de carbono y vidrio.

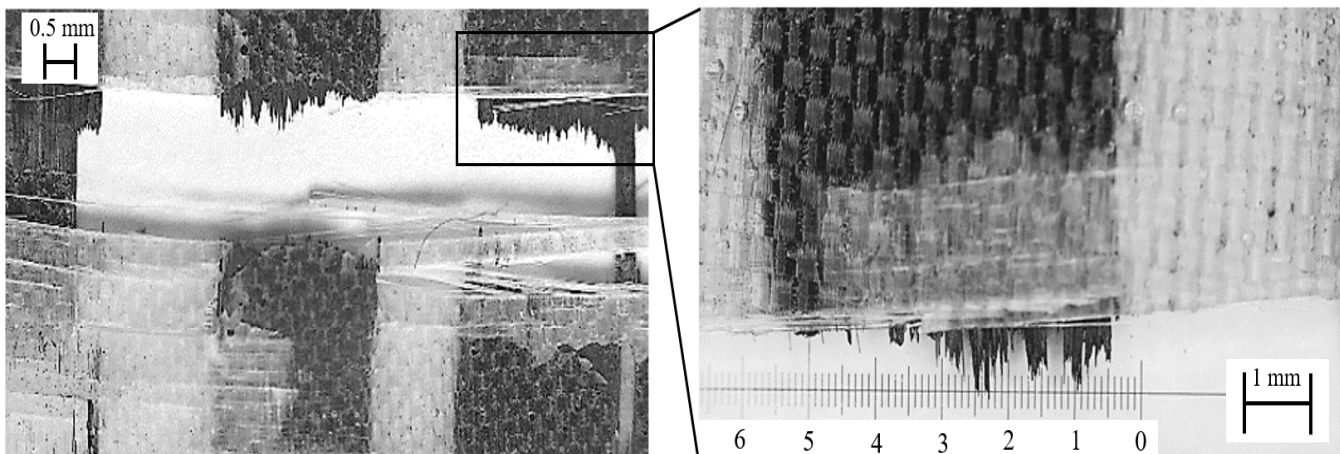


Figura 9. Fotografías del modo de falla del tejido asargado después de los ensayos de tensión.

Por último, el tejido satén (5 harness), caracterizado por tener el menor número de entrelazamientos de los tres tejidos, presenta una menor capacidad en la transferencia de carga, lo que resulta en una menor resistencia última en comparación con los otros tejidos. En la Figura 10 se observa al tejido satén con un modo de falla no explosivo. Este comportamiento puede atribuirse a su menor nivel de entrelazamiento, lo cual favorece una falla más temprana de la fibra de carbono. El comportamiento de falla de los tejidos asargado y satén se puede explicar por su menor nivel de entrelazamiento entre las fibras de carbono y



vidrio. Esta menor cantidad de puntos de cruce limita la transferencia de carga entre ambos refuerzos, por lo que la fibra de carbono puede fallar de manera más temprana antes de que el esfuerzo sea redistribuido a la fibra de vidrio. Este comportamiento coincide con lo reportado por Weili Wu et al (1), quienes señalan que el patrón del tejido influye directamente en la distribución de esfuerzos y en el modo de falla de los compuestos tejidos.

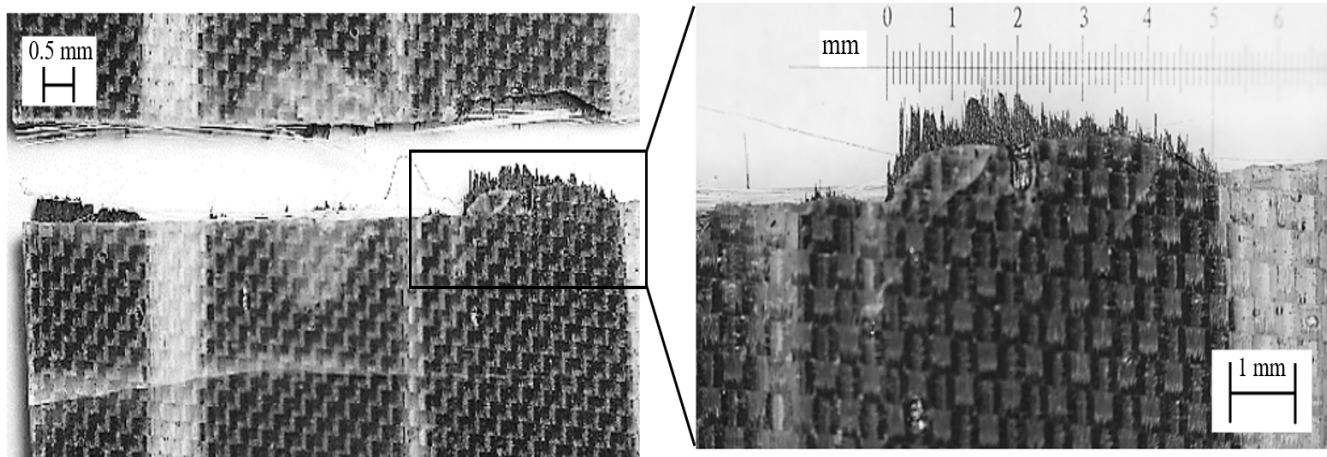


Figura 10. Fotografías del modo de falla del tejido satín después de los ensayos de tensión.

4 Conclusiones

Los tejidos textiles plano (plain), asargado (twill) y satín (satin), con el nivel de hibridación de fibra de carbono a 0° (urdimbre) y la fibra de vidrio a 90° (trama), se caracterizaron mecánicamente a través de ensayos a tensión, con el propósito de determinar la influencia de la estructura de tejido textil sobre las propiedades mecánicas del material compuesto. Los resultados mostraron lo siguiente:

- El módulo de elasticidad (E) tuvo valores similares para los tres tejidos, lo que indica que esta propiedad del compuesto está más relacionada con las propiedades propias de las fibras y la matriz. Por lo tanto, los valores similares en E de cada tejido se deben a que los tres tejidos tienen la misma cantidad de fibra de carbono y vidrio. Este comportamiento fue respaldado por el análisis ANOVA, donde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el módulo de elasticidad.
- La resistencia última fue significativamente diferente para los tres tejidos. El tejido plano presentó el mayor valor de resistencia última, con 221 MPa, seguido por el tejido asargado con 211 MPa y finalmente por el tejido satín con 205 MPa. Esto representa una disminución aproximada de 4.5% para el tejido asargado y de 7.2% para el tejido satín con respecto al tejido plano. Estos comportamientos se pueden atribuir a la influencia del tipo de patrón de tejido textil, es decir, el grado de entrelazamiento influye directamente en las propiedades mecánicas últimas de los compuestos híbridos. En el caso del tejido plano, este presenta un mayor grado de entrelazamiento, permitiendo distribuir de mejor manera los esfuerzos dentro del compuesto. Los resultados del análisis ANOVA permiten confirmar que el tipo de tejido influye significativamente en la resistencia máxima que soporta el material compuesto.
- Los modos de falla observados estuvieron relacionados con el nivel de entrelazamiento de cada tejido. En el tejido plano (1x1), el mayor número de puntos de cruce entre urdimbre y trama favoreció una mejor redistribución de esfuerzos, lo que retrasó la falla de la fibra de carbono y generó un modo de falla más



explosivo. En el tejido asargado (4x4), el comportamiento fue intermedio, mientras que en el tejido satín (5 harness) se observó una falla menos explosiva, asociada con una transferencia de carga menos eficiente entre los refuerzos.

- La hibridación representa una alternativa viable para mejorar los tejidos textiles, ya que permiten combinar distintos tipos de fibras y mantener las ventajas de cada uno. En el caso de la incorporación de la fibra de vidrio, este refuerzo aporta con un alto nivel de elongación a la falla y una reducción en el costo de fabricación del compuesto, ya que esta fibra es más económica en comparación con otras fibras sintéticas. Con respecto a la incorporación de la fibra de carbono, este refuerzo aporta una alta resistencia y alto módulo de elasticidad. Por lo tanto, al final se tiene un compuesto híbrido equilibrado entre el desempeño mecánico y costo económico.

4. Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por permitir la realización de este trabajo de investigación, mediante su programa de becas a los posgrados de maestría. También, se extiende un agradecimiento al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y al Proyecto 24794.26-P del Tecnológico Nacional de México (TecNM).

5. Agradecimientos de autoría

Fernando Espinosa Rosas: Investigación; Escritura; Análisis formal. *Enrique Alcudia Zacarias*: Conceptualización; Metodología; Análisis de datos; Investigación. *María del Carmen Acuña Olivos*: Ideas; Análisis de datos. *Daniel Romero Vergara*: Revisión y edición. *Fernanda De Jesús-Ramírez*: Ideas; Análisis de datos. *Sandra Yaraset Vara Salas*: Revisión y edición; Análisis de datos. *Luis Alberto Orihuela Martínez*: Revisión y edición.

Referencias

- [1] W. Wu, "Tensile failure behaviors and theories of carbon/glass hybrid interlayer and intralayer composites," *Coatings*, vol. 13, no. 4, Art. no. 774, 2023, doi: 10.3390/coatings13040774.
- [2] H. Tewani, J. Cyvas, K. Perez, and P. Prabhakar, "Arxi-Textile composites: Role of weave architecture on mode-I fracture energy in woven composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 188, Art. no. 108499, 2025, doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108499.
- [3] K. C. Nagaraja, S. Rajanna, G. S. Prakash, P. G. Koppad, and M. Alipour, "Studying the effect of different carbon and glass fabric stacking sequence on mechanical properties of epoxy hybrid composite laminates," *Composites Communications*, vol. 21, Art. no. 100425, 2020, doi: 10.1016/j.coco.2020.100425.
- [4] K. Kumar, Y. K. Mishra, J. Kumar, V. R. Pannase, A. B. Dhumne, V. L. Bhambere, *et al.*, "Exploration of stacking effects of carbon/glass fabric in polymer hybrid composites: Analysis of mechanical properties," *Discover Applied Sciences*, vol. 6, Art. no. 636, 2024, doi: 10.1007/s42452-024-06348-5.



- [5] Y. Zhou, Z. Lu, and Z. Yang, “Progressive damage analysis and strength prediction of 2D plain weave composites,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 47, pp. 220–229, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.10.026.
- [6] P. Ma and Z. Gao, “A review on the impact tension behaviors of textile structural composites,” *Journal of Industrial Textiles*, vol. 44, no. 4, pp. 572–604, 2015, doi: 10.1177/1528083713503001.
- [7] J. Gong, N. Saeed, X. Huang, W. Tian, L. Li, and J. Song, “Influences of fiber volume content on the mechanical properties of 2D plain carbon-fiber woven composite materials,” *Polymers*, vol. 16, no. 1, Art. no. 108, 2024, doi: 10.3390/polym16010108.
- [8] K. R. Hart, P. X. L. Chia, L. E. Sheridan, E. D. Wetzel, N. R. Sottos, and S. R. White, “Mechanisms and characterization of impact damage in 2D and 3D woven fiber-reinforced composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 101, pp. 432–443, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.07.004.
- [9] D. P. C. Aiman, M. F. Yahya, and J. Salleh, “Impact properties of 2D and 3D woven composites: A review,” in *AIP Conference Proceedings*, 2016, doi: 10.1063/1.4965050.
- [10] F. Chen and J. M. Hodgkinson, “Impact behaviour of composites with different fibre architecture,” *Proc. Inst. Mech. Eng., Part G: J. Aerosp. Eng.*, vol. 223, no. 7, pp. 1009–1017, 2009, doi: 10.1243/09544100JAERO451.
- [11] M. Y. Khalid, A. Al Rashid, Z. U. Arif, N. Akram, H. Arshad, and F. P. G. Márquez, “Characterization of failure strain in fiber reinforced composites: Under on-axis and off-axis loading,” *Crystals*, vol. 11, no. 2, Art. no. 216, 2021, doi: 10.3390/cryst11020216.
- [12] C. Winkelmann, S. S. Kim, and V. La Saponara, “Design and development of hybrid composite bistable structures for energy absorption under quasi-static tensile loading,” *Composite Structures*, vol. 93, no. 1, pp. 171–178, 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2010.06.002.
- [13] T. Bergmann, S. Heimbs, and M. Maier, “Mechanical properties and energy absorption capability of woven fabric composites under $\pm 45^\circ$ off-axis tension,” *Composite Structures*, vol. 125, pp. 362–373, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.01.040.
- [14] W. Wu, Q. Wang, and W. Li, “Comparison of tensile and compressive properties of carbon/glass interlayer and intralayer hybrid composites,” *Materials*, vol. 11, no. 7, Art. no. 1105, 2018, doi: 10.3390/ma11071105.
- [15] G. Zhou, Q. Sun, Z. Meng, D. Li, Y. Peng, D. Zeng, *et al.*, “Experimental investigation on the effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors of carbon/epoxy woven composites,” *Composite Structures*, vol. 257, Art. no. 113366, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113366.
- [16] A. Rogani, P. Navarro, S. Marguet, J.-F. Ferrero, and C. Lanouette, “Tensile post-impact behaviour of thin carbon/epoxy and glass/epoxy hybrid woven laminates—Part I: Experimental study,” *Composite Structures*, vol. 230, Art. no. 111508, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111508.



- [17] R. Murugan, R. Ramesh, K. Padmanabhan, R. Jeyaraam, and S. Krishna, “Experimental investigation on static mechanical properties of glass/carbon hybrid woven fabric composite laminates,” in *Advanced Materials Research*, vol. 903, pp. 96–101, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.903.96.
- [18] A. Venkat Ramanan and G. Rajamurugan, “Mechanical properties of hybrid composites with alternately woven carbon/glass fibers on stainless steel wire mesh,” *Results in Engineering*, vol. 27, Art. no. 106066, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106066.
- [19] S. Al Khaddour and M. B. Ibrahim, “Experimental investigation on tensile properties of carbon fabric-glass fabric-kevlar fabric-epoxy hybrid composite laminates,” *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, vol. 31, no. 3, pp. 145–151, 2021, doi: 10.18280/rcma.310305.
- [20] I. R. Chowdhury and J. Summerscales, “Woven fabrics for composite reinforcement: A review,” *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 7, Art. no. 280, 2024, doi: 10.3390/jcs8070280.
- [21] H. Özdemir, B. M. İçten, and A. Doğan, “Experimental investigation of the tensile and impact properties of twill and twill derivative woven fabric reinforced composites,” *Tekstil ve Konfeksiyon*, vol. 28, no. 4, pp. 258–272, 2018, doi: 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.482873.
- [22] J. Zhang, K. Chaisombat, S. He, and C. H. Wang, “Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures,” *Materials & Design*, vol. 36, pp. 75–80, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.11.006.
- [23] H. A. Haery, R. Zahari, W. Kuntjoro, and Y. M. Taib, “Tensile strength of notched woven fabric hybrid glass, carbon/epoxy composite laminates,” *Journal of Industrial Textiles*, vol. 43, no. 3, pp. 383–395, 2014, doi: 10.1177/1528083712456055.
- [24] K. S. Pandya, C. Veerraju, and N. K. Naik, “Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading,” *Materials & Design*, vol. 32, no. 7, pp. 4094–4099, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.03.003.
- [25] K. Naito, “Static and fatigue tensile properties of carbon/glass hybrid fiber-reinforced epoxy composites,” *Scientific Reports*, vol. 12, Art. no. 6298, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10245-5.
- [26] D. K. Jesthi, A. Nayak, S. S. Mohanty, A. K. Rout, and R. K. Nayak, “Evaluation of mechanical properties of hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 377, Art. no. 012157, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/377/1/012157.
- [27] D. K. Jesthi and R. K. Nayak, “Improvement of mechanical properties of hybrid composites through interply rearrangement of glass and carbon woven fabrics for marine application,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 168, pp. 467–475, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.042.
- [28] W. Z. Zhao and W. Zhou, “Cluster analysis of acoustic emission signals and tensile properties of carbon/glass fiber-reinforced hybrid composites,” *Structural Health Monitoring*, vol. 18, nos. 5–6, pp. 1686–1697, 2019, doi: 10.1177/1475921719833467.



- [29] S. C. Khatri and M. J. Koczak, “Thick-section AS4-graphite/E-glass/PPS hybrid composites: Part I. Tensile behavior,” *Composites Science and Technology*, vol. 56, pp. 181–192, 1996, doi: 10.1016/0266-3538(95)00142-5.
- [30] K. Aruchamy, S. Pavayee Subramani, S. K. Palaniappan, B. Sethuraman, and G. Velu Kaliyannan, “Study on mechanical characteristics of woven cotton/bamboo hybrid reinforced composite laminates,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 718–726, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.11.013.
- [31] M. V. Donadon, B. G. Falzon, L. Iannucci, and J. M. Hodgkinson, “Intralaminar toughness characterisation of unbalanced hybrid plain weave laminates,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 6, pp. 1597–1611, 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2006.12.003.
- [32] “Tema A2a: Materiales. Materiales compuestos de matriz polimérica,” 2015.
- [33] ASTM International, “Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials,” ASTM D3039/D3039M-00e1, 2000.
- [34] M. Huzaifa, S. Zahoor, N. Akhtar, M. H. Abdullah, H. Sajjad, K. Salah Uddin, *et al.*, “Exploring mechanical properties of eco-friendly hybrid epoxy composites reinforced with sisal, hemp, and glass fibers,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 33, pp. 2785–2793, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.08.189.
- [35] S. Jothibas, S. Mohanamurugan, R. Vijay, D. Lenin Singaravelu, A. Vinod, and M. R. Sanjay, “Investigation on the mechanical behavior of areca sheath fibers/jute fibers/glass fabrics reinforced hybrid composite for light weight applications,” *Journal of Industrial Textiles*, vol. 49, no. 8, pp. 1036–1060, 2020, doi: 10.1177/1528083718804207.
- [36] C. A. Tefera, S. Duda, and S. Ślowski, “A systematic review of hybrid polymeric woven composites: Mechanical performance, numerical simulation, and future perspectives,” *Materials*, vol. 19, no. 9, Art. no. 1887, 2026, doi: 10.3390/ma19091887.
- [37] Y. Swolfs, L. Gorbatiikh, and I. Verpoest, “Fibre hybridisation in polymer composites: A review,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 67, pp. 181–200, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.08.027.



Derechos de Autor (c) 2026 Fernando Espinosa Rosas, Enrique Alcudia Zacarias, María del Carmen Acuña Olivos ,Daniel Romero Vergara, Fernanda De Jesús-Ramírez, Sandra Yaraset Vara Salas, Luis Alberto Orihuela Martínez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)