

Caracterización de materiales compuestos a base de fibras naturales de cabuya y caña de azúcar con resina epoxi: análisis comparativo de propiedades mecánicas

Characterization of natural fiber reinforced epoxy resins composites using cabuya and sugarcane: mechanical properties comparative analysis

Edwin Arroyo-Terán¹

 <https://orcid.org/0000-0002-3527-6176>

Rommel Imbaquingo-Navarrete¹

 <https://orcid.org/0000-0001-6476-7372>

Ramiro Rosero Añazco^{1*}

 <https://orcid.org/0000-0002-3094-0197>

Recibido 02 de mayo de 2023, aceptado 20 de noviembre de 2023

Received: May 02, 2023 Accepted: November 20, 2023

RESUMEN

En los últimos años la investigación de materiales compuestos ha logrado mayor interés en la indagación de nuevos materiales y en el desarrollo de aplicaciones ingenieriles. Esta investigación se centró en caracterizar materiales compuestos a base de resina epoxi reforzados con fibra de cabuya comparado con la misma resina reforzada con fibra de caña de azúcar mediante ensayos experimentales basados en normas ASTM para materiales compuestos y a través del método de elementos finitos FEM de tipo dinámico transitorio no lineal y explícito. Se determinó que el material M01 (fibra de cabuya con resina epoxi) y configuración C02 (matriz 60% - refuerzo 40%) presenta mejores propiedades mecánicas de acuerdo con los resultados experimentales y el análisis FEM, basado en un análisis estadístico se determina que las mejores características mecánicas se definen por el tipo de material y no por las configuraciones. El comportamiento de las fibras y adherencia entre la matriz y materiales de refuerzo se analizó mediante un estudio fractográfico de las probetas después de ensayarlas. El análisis comparativo de los resultados FEM respecto a los experimentales mostraron un error menor al 1% para el esfuerzo máximo de tracción y menor al 10% para el esfuerzo y la fuerza máxima aplicada en flexión, validando y garantizando su uso en aplicaciones CAE con un modelo matemático acorde a los criterios metodológicos apoyados en la fundamentación teórica.

Palabras claves: Materiales biocompuestos, fibras naturales, propiedades mecánicas, FEM.

ABSTRACT

In recent years, research on composite materials has increased interest in new materials and the development of engineering applications. This research is focused on characterizing natural fiber-reinforced epoxy resin composites using cabuya fiber compared to the sugarcane fiber reinforcement through experimental tests based on ASTM standards for composite materials and a nonlinear and explicit transient dynamic finite element method FEM. The results determined that material M01 (cabuya fiber and epoxy resin) and configuration C02 (matrix 60% - reinforcement 40%) improved mechanical properties according to the experimental and FEM results; the statistical analysis concluded that the best mechanical properties

¹ Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador.
E-mail: esarroyo@utn.edu.ec; rpimbaquingo@utn.edu.ec; raroero@utn.edu.ec

* Autor de correspondencia: raroero@utn.edu.ec

are focused on the type of material, not in the configurations. The behavior of the fibers and adhesions between the matrix and reinforcing materials were analyzed by a fractographic method of the samples after testing. The comparative tests determined that the FEM analysis has an error of less than 1% in the maximum tensile strength and less than 10% for the maximum strength and force applied in bending, validating, and guaranteeing its use in CAE applications with a mathematical model according to the methodological criteria supported by the state of the art.

Keywords: *Biocomposite materials, natural fibers, mechanical properties, FEM.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente la necesidad de proteger el medio ambiente reduciendo la contaminación, promueve una gestión de residuos más sistemática en el mundo, ya sean desechos industriales o agrícolas, provocando que se prueben varios métodos, como optimizar la producción o el cultivo para reducir los residuos que se producirán al comienzo del proceso, reprocesar los residuos de los procesos de producción o cultivo para hacerlos más valiosos que la eliminación convencional, entre otros [1]. En este sentido el problema de los residuos plásticos seguirá siendo un problema en el desarrollo de polímeros/mezclas/compuestos biodegradables que puedan sustituir a todos los demás polímeros no biodegradables [2], lo cual ha conducido las investigaciones a la búsqueda de alternativas de materiales compuestos utilizando diferentes tipos de refuerzos, como nanopartículas, fibras sintéticas y fibras naturales [3].

Los materiales compuestos poliméricos juegan un papel importante en la industria, gracias a su bajo costo, versatilidad y amplia gama de propiedades [4]. Las fibras naturales son biopolímeros de origen vegetal o animal, sin embargo, los biocompuestos sobre todo en la industria automotriz se enfocan principalmente hacia la fibra natural de origen vegetal debido a su resistencia relativamente alta, bajo costo, baja densidad, alta amortiguación acústica, bajo consumo de energía de fabricación, baja huella de carbono y capacidad biodegradable [5]-[7].

El refuerzo es el componente principal del material compuesto y es la parte que soporta la mayor parte de la carga aplicada, mientras que la matriz rodea el refuerzo y lo protege, por lo que existen varios factores que influyen en las propiedades de los materiales compuestos, como el tipo, disposición y volumen de refuerzo, tipo y volumen de matriz y el método de elaboración de los compuestos [8].

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de materiales compuestos basados en una matriz polimérica de resina epoxi con refuerzo de fibras naturales de cabuya y caña de azúcar, mediante ensayos experimentales y validación con el método FEM de tipo dinámico transitorio no lineal y explícito a través de pruebas estandarizadas ASTM. Se lleva a cabo un análisis comparativo y una validación con el propósito de emplear los datos adquiridos en un modelo matemático, teniendo en cuenta la considerable variabilidad en las propiedades de las fibras naturales de origen vegetal [9].

MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio, se llevó a cabo la metodología detallada en la Figura 1, con el objetivo de analizar las propiedades mecánicas de materiales compuestos con fibra de cabuya y caña de azúcar como refuerzos y resina epoxi como matriz. Los materiales se definieron según las fracciones volumétricas de matriz y refuerzo: 75% matriz - 25% refuerzo y 60% matriz - 40% refuerzo. La orientación de las fibras se estableció en 90 - 0 - 90.

Se construyeron probetas estandarizadas para los ensayos de tracción, flexión e impacto según las normas ASTM D3039, D2764 y D5628, respectivamente. Estas probetas se diseñaron para asegurar la comparabilidad de los resultados y se sometieron a ensayos experimentales de tracción, flexión e impacto, siguiendo las normas mencionadas. Las fractografías proporcionaron información sobre la interacción matriz-refuerzo.

Finalmente se realizó un análisis estadístico de los resultados, incluyendo análisis de ensayos de tracción y flexión. Además, se incorporó simulación numérica a través del método de elementos finitos (FEM) para la validación del comportamiento ante

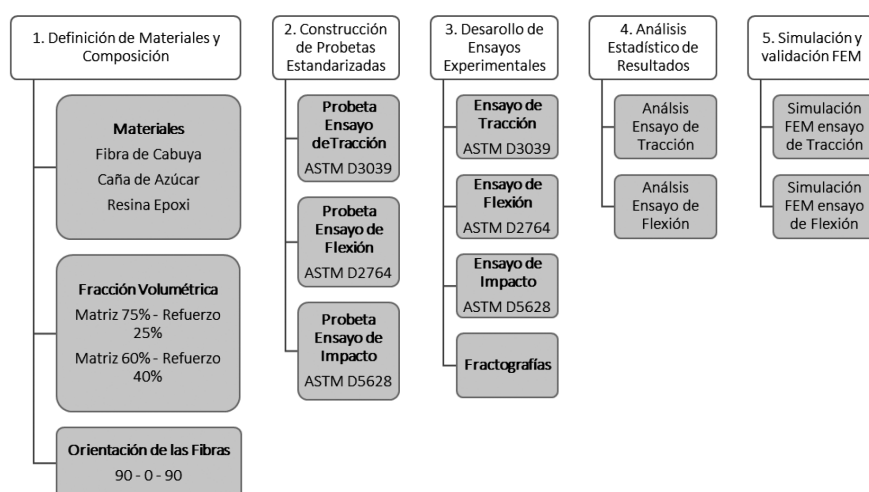


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada.

tracción y flexión del material que presentó las mejores propiedades.

Materiales

Las fibras de cabuya son obtenidas a partir de la planta de agave, la cual es cultivada en zonas caracterizadas por su clima seco y con un rango altitudinal que abarca desde los 1400 hasta los 2500 metros sobre el nivel del mar, en este entorno se registra una temperatura promedio anual de aproximadamente 17 °C, con valores extremos de temperatura que oscilan entre los 3 °C como mínimo y los 29 °C como máximo. Las precipitaciones anuales en este contexto se encuentran en un intervalo de 360 a 600 mm, de acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [10] del año 2020. Por otro lado, el proceso de obtención de la caña de azúcar se llevó a cabo en una región cuya altitud varía entre 1400 y 2850 metros sobre el nivel del mar, y donde se registra una temperatura promedio anual de alrededor de 19 °C [11].

El proceso para obtener las fibras de cabuya implica sumergir las hojas del agave en agua durante un período de 8 a 10 días, esto permite que tanto la goma como la pulpa se descompongan. Posteriormente, se realiza un proceso de desfibrado para eliminar las capas superficiales, se presionan con fuerza las hojas del agave para romper su estructura y liberar las fibras contenidas en su interior, las cuales son luego secadas a temperatura ambiente.

Para la extracción de la fibra de caña de azúcar se realizaron dos cortes verticales en forma de cruz, desde un nudo a otro, resultando en cuatro secciones. Estas secciones se manipularon para separar las partes con pulpa y fibra, posteriormente se secaron a temperatura ambiente, dando lugar a las hebras de fibra. Cabe destacar que no se aplicaron tratamientos ni se añadieron compuestos a las fibras naturales en ningún momento del proceso.

La masa de fibra que se requiere para la elaboración de las probetas responde a la ecuación 1.

$$m = \rho * V \quad (1)$$

Donde m es la masa en gramos, ρ la densidad de la fibra y V el volumen de la probeta cuyas dimensiones están bajo normativa ASTM. La densidad de la cabuya es 0,665 g/cm³ [12], la densidad de la caña de azúcar es 0,83 g/cm³ [13] y la densidad de la resina epoxi es 1,10 g/cm³ [14]. Esto con el objetivo de definir la fracción volumétrica del refuerzo.

Para este estudio la muestra se representó por las probetas realizadas tanto para la resina epoxi con refuerzo de fibra de cabuya, así como para la misma resina con refuerzo de fibra de caña de azúcar, las cuales fueron dispuestas con un número de seis probetas por cada ensayo de acuerdo con la configuración y fracción volumétrica elegida. En la Tabla 1 se establece la cantidad total en gramos que se requirió para la elaboración de todas las probetas.

Tabla 1. Cantidad total de fibras para la fabricación de probetas.

Fibra	Total (g)
Cabuya	185,01
Caña de Azúcar	118,13

Elaboración de probetas

Para la caracterización de los materiales se elaboraron probetas de resina epoxi de baja viscosidad como matriz termoestable y las fibras de cabuya y caña de azúcar como materiales de refuerzo para obtener finalmente el material compuesto. Se prepararon las muestras para los ensayos de tracción siguiendo la normativa ASTM D3039 [15], con una longitud de 250 mm, ancho de 25 mm y un espesor de 3 mm. Las probetas para los ensayos de flexión se confeccionaron conforme a la normativa ASTM D7264 [16], con una longitud de 160 mm, ancho de 16 mm y espesor de 3 mm. En el caso del ensayo de impacto, se adoptaron las directrices de la normativa ASTM D5628[17], que establece dimensiones de 58 mm de longitud, 58 mm de ancho y 3 mm de espesor para la probeta. La matriz de refuerzo consiste en fibras largas que fueron dispuestas de manera continua en las probetas, la longitud de las fibras superó los 250 mm para cumplir con los requerimientos de las normativas mencionadas. Cuentan con una densidad promedio de entre 1,3 a 1,52g/cm³ considerando las fracciones volumétricas y orientación de fibras que se llevan a cabo en este estudio.

En la composición del material se utilizaron dos fracciones volumétricas, C01 (75% matriz - 25% refuerzo) y C02 (60% matriz - 40% refuerzo), el criterio de selección para la fracción volumétrica del material de refuerzo se basó en conseguir propiedades específicas relacionadas con la resistencia, adhesión interfacial y apariencia, trabajos citados coinciden en que con una fracción volumétrica mayor al 50% las fibras tienden a acumularse en la matriz, lo que debilita el área interfacial y provoca el desprendimiento entre las fibras y la matriz empeorando las propiedades físicas y el aspecto [18]. En cuanto al material de refuerzo se usaron 3 capas de fibra continua con orientación 90° - 0° - 90° para todos los casos. De esta manera, se obtuvieron un total de 6 probetas para cada material, configuración y tipo de ensayo.

En la Tabla 2 se indica la codificación usada según el tipo de material y configuración.

Para la elaboración de las probetas se utilizó el método de estratificación por compresión mediante moldes de acero ajustables para asegurar una correcta cohesión entre la matriz y el material de refuerzo, evitando posibles filtraciones de aire en el interior que pudieran influir como concentradores de tensión generando resultados erróneos. El método de estratificación por compresión en la construcción de las probetas puede tener una influencia significativa en los resultados de los ensayos mecánicos, especialmente en los ensayos de tracción. La forma en que se preparan y construyen las probetas puede afectar las propiedades mecánicas observadas, por lo que se debe considerar la distribución uniforme de refuerzo para evitar variabilidad, evitar daños a las fibras de refuerzo durante la preparación, garantizar la orientación correcta en materiales compuestos laminados, prevenir inclusiones defectuosas que debiliten el material y asegurar una unión adecuada entre capas para transferir cargas.

Se llevó a cabo el corte de 24 probetas de tracción, luego del proceso de control de calidad se colocaron lijas en los extremos de cada una de ellas con el fin de evitar el deslizamiento de las mordazas de la máquina de ensayos. Así también se obtuvieron 24 probetas para el ensayo de flexión y 24 para impacto, como se muestran en la Figura 2.

Caracterización mecánica

Los ensayos de tracción (ASTM D3039) y flexión (ASTM D7264) se realizaron en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero de la ciudad de Ambato - Ecuador mediante la máquina de ensayos universales MTE-50 a velocidad de ensayo de 10 mm/min, temperatura de 23 °C y humedad

Tabla 2. Disposición del material y configuración.

Código	Parámetro	Especificación
M01	Material	Resina epoxi con fibra de cabuya.
M02	Material	Resina epoxi con fibra de caña de azúcar.
C01	Configuración	Matriz 75% - Refuerzo 25%.
C02	Configuración	Matriz 60% - Refuerzo 40%.

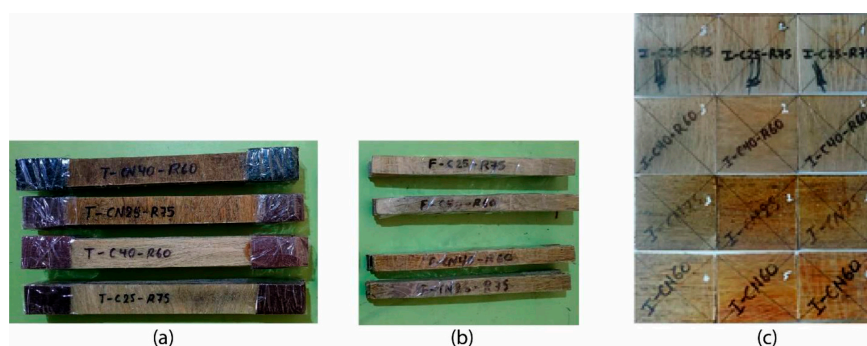


Figura 2. Obtención de probetas para ensayos experimentales: (a) Tracción, (b) Flexión, (c) Impacto.

de 49,30% para tracción y a la misma velocidad de ensayo, temperatura de 20,5 °C y humedad de 52,80% para flexión.

Los ensayos de impacto (ASTM D5628) se realizaron en la Universidad Técnica de Ambato - Laboratorio de Metalografía Ingeniería Mecánica en la Máquina Tipo Caída de Masa de Impacto de 0,22 kg con geometría del dardo FE el cual posee un radio de punta de 10 mm $\pm$ 0,1 mm y un diámetro de eje de 13 mm. El estudio morfológico se llevó a cabo mediante un microscopio electrónico de barrido SEM para determinar las fractografías.

Parámetros para simulaciones FEM

Se llevó a cabo un análisis de elementos finitos dinámicos transitorios no lineales que utilizan integración de tiempo explícita. Dentro del software de simulación se utilizó el modelo de material MAT054 ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE que está diseñado específicamente para manejar materiales ortotrópicos como laminados compuestos de fibras unidireccionales [19], [20].

Para la simulación del ensayo de tracción se realizó un mallado tipo Shell con elementos Quads de 2 mm que de acuerdo al criterio de malla de Jacobian Ratio indica una calidad de malla excelente con un valor mínimo de 0,997. A la probeta se le asignó el modelo de material compuesto MAT054 con un espesor de 3 mm. Se consideraron condiciones análogas al proceso experimental ubicando la sujeción fija de la probeta en un extremo de 50 mm de longitud, mientras que el extremo opuesto se somete una sección de la probeta de 50 mm a un desplazamiento lineal a lo largo del eje longitudinal de la probeta hasta

la falla del material con un tiempo de simulación establecido en 0,15 segundos.

Por su parte para la simulación del ensayo de flexión se realizó un mallado tipo Shell en la probeta con elementos Quads de 2 mm con calidad de malla excelente de acuerdo al Jacobian Ratio y se asignó el material MAT054 con espesor de 3 mm. Por su parte, para los soportes y cabezal móvil representativos de la máquina de ensayo se usó una malla tipo Solid con elementos Quads y Trias de 1 mm a los cuales se les asignó el material rígido MAT020_RIGID que permite la transmisión de fuerzas sin deformarse. Se aplicó la condición de contacto entre la probeta, los soportes y el cabezal móvil con la carta de control AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, los soportes se ubicaron como puntos de apoyo fijos de la probeta mientras se aplica un desplazamiento del cabezal móvil de 20 mm en un tiempo de 0,15 segundos.

Respecto al análisis por el método de elementos finitos (FEM) se desarrolló en el software LS-Dyna, se utilizó un computador con procesador Core i7 de 2,6 GHz y 64-bits con 16 GB RAM y tarjeta de video GEFORCE GTX 960M.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos experimentales

Tracción

La Figura 3 presenta de manera gráfica los resultados obtenidos a través de ensayos de tracción realizados en una máquina de ensayos universales. Estos ensayos se llevaron a cabo en 6 probetas, las cuales

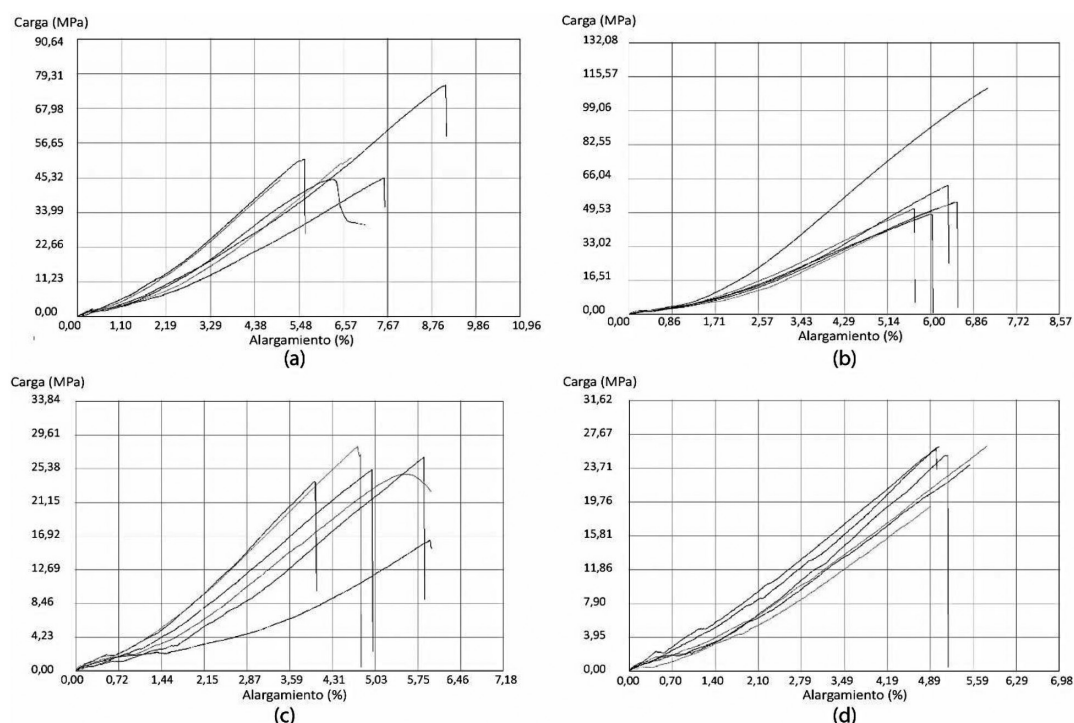


Figura 3. Diagramas esfuerzo vs deformación en ensayo de tracción: (a) M01-C01, (b) M01-C02, (c) M02-C01, (d) M02-C02.

han sido clasificadas según el tipo de material y configuración.

En los diagramas de esfuerzo versus deformación, se pueden apreciar las respuestas mecánicas de las diferentes probetas bajo la aplicación gradual de carga. Cada curva representa el comportamiento característico de una determinada configuración de probeta y tipo de material en términos de cómo resisten las fuerzas aplicadas y cómo se deforman en respuesta a esas fuerzas. La diferencia entre probetas del mismo material en un ensayo de tracción está relacionada con diversas razones, que a menudo se asocian con la variabilidad inherente en la fabricación, preparación y propiedades del material. Algunos materiales, especialmente los compuestos naturales, pueden tener una variabilidad inherente debido a su origen biológico o a las condiciones de crecimiento. Aunque se utilice el mismo material, es difícil lograr una uniformidad perfecta en cada muestra. Las diferencias en la microestructura, distribución de fibras, contenido de humedad y otros factores intrínsecos pueden llevar a variaciones en las propiedades mecánicas [18].

Además, al incluir un menor porcentaje de refuerzo se tiende a empeorar las propiedades mecánicas debido a la influencia directa de la fase de refuerzo en la matriz del material compuesto. Esto se debe a varios factores que actúan en conjunto para fortalecer el material compuesto en comparación con la matriz sola. Los refuerzos ayudan a distribuir uniformemente las cargas aplicadas sobre el material compuesto, acrecentando así los puntos de concentración de tensión, influyendo directamente en la dispersión de los resultados [18].

Las propiedades mecánicas de las fibras naturales varían considerablemente según la composición química y estructural, el tipo de fibra y las condiciones de crecimiento. A pesar de que la fibra de caña y la fibra de cabuya tienen propiedades mecánicas similares, al utilizarlas para formar un material compuesto, las propiedades mecánicas del compuesto se ven influenciadas principalmente por la adhesión entre la matriz y las fibras [13].

Las fibras de cabuya (M01) demostraron ser más adecuadas para aplicaciones que requieran alta

resistencia y rigidez, mientras que las fibras de caña de azúcar (M02) podrían ser más apropiadas en aplicaciones donde la deformación antes de la ruptura sea más crítica.

La Tabla 3 muestra los valores promediados de las propiedades mecánicas de las 6 probetas sometidas al ensayo de tracción para cada material y configuración. Se han calculado la media de los valores obtenidos en las pruebas individuales para cada material y configuración, con el objetivo de reducir el impacto de las variaciones individuales entre las probetas y brindar una representación más precisa del comportamiento promedio del material en estudio lo que proporciona una visión general del rendimiento de las probetas en términos de sus propiedades mecánicas.

Los valores encontrados se asemejan a trabajos previos. En un estudio de material compuesto de matriz epóxica con 10% de refuerzo de fibra de caña de azúcar se encontró el esfuerzo máximo de tracción de 16 MPa con 6,5% de elongación y al usar el 15% de refuerzo se obtuvo 19 MPa con 8,33% de elongación [13]. Para compuestos con un refuerzo del 30% en peso de fibra natural de agave se encontró valores de resistencia a la tracción entre 66,92 a 75,84 MPa [21]. Sin embargo, al elaborar un compuesto de fibra de agave con resina epoxi usando fibras cortadas entre 1 a 4 cm y en porcentajes del 10 al 25% de material de refuerzo se encontró resistencia a la tracción entre 20 a 40 MPa [22],

estos resultados difieren ligeramente lo cual podría deberse al uso de fibra no continua.

Se realizó un estudio estadístico ANOVA entre las medias del esfuerzo máximo de tracción que determinó que existen diferencias significativas con un p-valor menor a 0,05. La Tabla 4 muestra los resultados de la prueba de múltiples rangos mediante el método de diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher en el cual se registran dos grupos homogéneos para la variable de esfuerzo máximo de tracción. Se verifica que la diferencia significativa se presenta entre los grupos determinados por el tipo de material con un nivel de confianza del 95%.

Los resultados obtenidos en la Figura 4 indican que la respuesta resistiva a la tracción depende principalmente del tipo de material de refuerzo, mientras que las configuraciones según el porcentaje de refuerzo y matriz no muestran diferencias estadísticamente significativas; esto sugiere que, en las configuraciones donde el porcentaje de refuerzo supera el 25%, la fibra de caña de azúcar no presenta mejoras notables en las propiedades mecánicas.

Flexión

La Figura 5 muestra los diagramas esfuerzo-deformación de los ensayos de flexión obtenidos de la máquina de ensayos universales por cada probeta de acuerdo el tipo de material y configuración codificada.

Tabla 3. Resultados experimentales ensayo de tracción.

Material	Configuración	Fuerza Máxima (N)	Esfuerzo Máximo de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Elongación (%)
M01	C01	4107,81	52,25	784,64	6,73
M01	C02	5420,55	63,70	987,39	6,36
M02	C01	1812,37	24,19	479,49	5,17
M02	C02	1966,73	24,54	469,74	5,23

Tabla 4. Prueba de múltiples rangos para esfuerzo de tracción.

Combinaciones	Número de Ensayos	Esfuerzo medio [MPa]	Grupos Homogéneos	
M02-C01	6	24,19	x	
M02-C02	6	24,54	x	
M01-C01	6	52,25		x
M01-C02	6	63,70		x

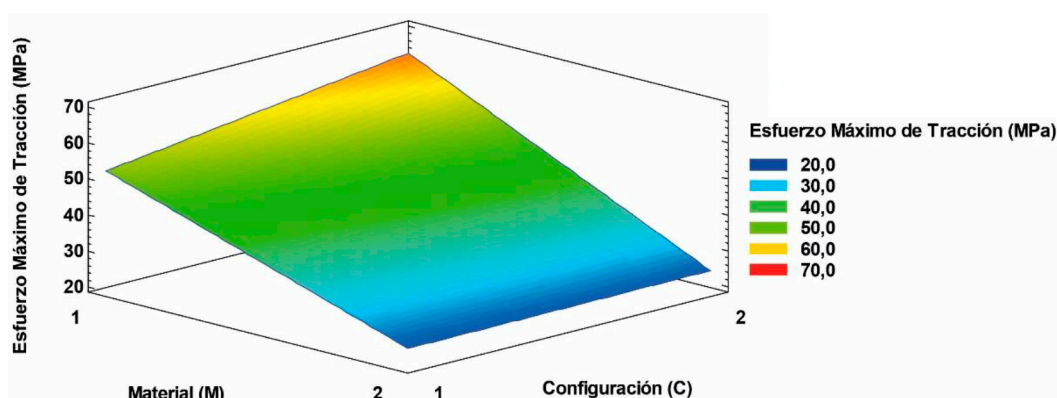


Figura 4. Superficie de respuesta para el esfuerzo máximo de tracción.

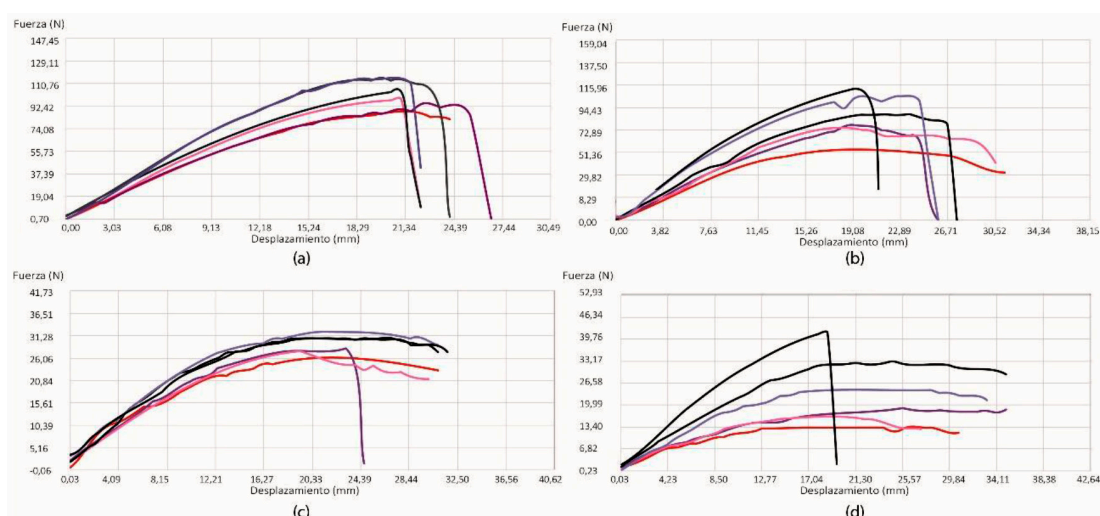


Figura 5. Diagramas esfuerzo vs deformación por tipo de material y configuración de cada probeta bajo ensayo a flexión: (a) M01-C01, (b) M01-C02, (c) M02-C01, (d) M02-C02.

La Tabla 5 muestra los resultados promediados de las propiedades mecánicas de las 6 probetas sometidas al ensayo de flexión para cada material y configuración.

Los resultados de las pruebas de flexión revelan diferencias notables entre las configuraciones de materiales y refuerzos. En el caso del material M01 en la configuración C01, se obtuvo una fuerza máxima de 108,86 N, lo que resultó en un esfuerzo máximo de flexión de 118,81 MPa. Comparativamente, en la configuración C02 de material M01, aunque la fuerza máxima disminuyó ligeramente a 100,45 N, el esfuerzo máximo de flexión se mantuvo prácticamente constante en

118,73 MPa. Estas diferencias porcentuales en la fuerza máxima entre las dos configuraciones para material M01 indican una disminución del 7,3% de la configuración C02 respecto a C01.

En el caso del material M02 en la configuración C01, la fuerza máxima disminuyó significativamente a 30,50 N, lo que resultó en un esfuerzo máximo de flexión de 45,77 MPa. En la configuración C02 de material M02, la fuerza máxima también disminuyó a 27,08 N, pero el esfuerzo máximo de flexión aumentó a 50,36 MPa. Las diferencias porcentuales en la fuerza máxima entre las configuraciones C01 y C02 para material M02 representan una disminución del 11,3%.

Tabla 5. Resultados experimentales ensayo de flexión.

Material	Configuración	Fuerza Máxima (N)	Esfuerzo Máximo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Deflexión (mm)
M01	C01	108,86	118,81	4486,89	20,00
M01	C02	100,45	118,73	4977,03	18,38
M02	C01	30,50	45,77	2341,60	17,80
M02	C02	27,08	50,36	2707,66	17,79

Estudios previos encontraron valores semejantes de esfuerzo de flexión, entre 80 a 150 MPa, en materiales compuestos de fibra de agave con resina epoxi en concentraciones del 10 al 25% de material de refuerzo [22].

Las diferencias porcentuales en los resultados de las pruebas de flexión proporcionan una visión más precisa de cómo las configuraciones de refuerzo afectan las propiedades mecánicas. Las variaciones porcentuales en las fuerzas máximas indican las respuestas distintas de los materiales a las configuraciones, lo que resalta la importancia de considerar estos factores en el diseño y la optimización de los compuestos.

El análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de múltiples rangos (Tabla 6) confirman que existe

una diferencia estadísticamente significativa en las medias del esfuerzo máximo de flexión entre los grupos homogéneos determinados por el tipo de material. Esta diferencia significativa sugiere que las propiedades mecánicas de los dos materiales responden de manera distinta a las configuraciones de refuerzo, y las diferencias porcentuales en las fuerzas máximas entre las configuraciones resaltan estas variaciones.

El gráfico de superficie de respuesta de la Figura 6 muestra la relación del esfuerzo máximo de flexión con respecto a los materiales y configuraciones analizados. Se observa que el material M01 ofrece mejores características mecánicas, así como también se aprecia que las configuraciones usadas no generan diferencias relevantes en el comportamiento a flexión.

Tabla 6. Prueba de múltiples rangos para esfuerzo de flexión.

Combinaciones	Número de ensayos	Esfuerzo medio [MPa]	Grupos Homogéneos	
M02-C01	6	45,77	x	
M02-C02	6	50,36	x	
M01-C01	6	118,73		x
M01-C02	6	118,81		x

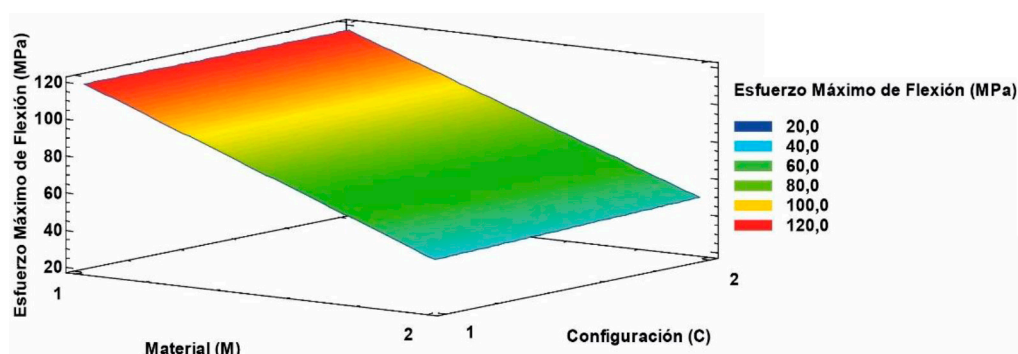


Figura 6. Superficie de respuesta para el esfuerzo máximo de flexión.

Impacto

La Tabla 7 presenta los resultados promediados de las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los ensayos de impacto realizados en las 6 probetas para cada configuración y material. Los valores de energía promedio absorbida y resistencia máxima al impacto han sido registrados y analizados en función de las diferentes configuraciones de materiales compuestos.

Las diferencias observadas en los resultados pueden atribuirse a diversos factores. En particular, la influencia del porcentaje de refuerzo en las propiedades mecánicas del material es evidente. La configuración C02 con un mayor porcentaje de refuerzo (40%) parece demostrar un aumento en la energía absorbida y la resistencia al impacto en comparación con la configuración C01 (25% de refuerzo). Esto podría deberse a una mayor capacidad de absorción de energía por parte de las fibras de refuerzo.

La naturaleza de las fibras naturales, como la cabuya y la caña de azúcar, también puede haber influido en los resultados. La disposición y distribución de estas fibras dentro de la matriz de resina epoxi juega un papel crucial en la capacidad de absorción de energía y resistencia al impacto del material compuesto resultante.

Los resultados de los ensayos de impacto revelan la influencia de la configuración de materiales, el porcentaje de refuerzo y las propiedades mecánicas inherentes de las fibras naturales en las propiedades de absorción de energía y resistencia al impacto. La configuración con un mayor porcentaje de refuerzo (C02) tiende a presentar mejoras en estas propiedades en comparación con la configuración con menos refuerzo (C01). Estos hallazgos son consistentes con la relación esperada entre el contenido de refuerzo y la mejora en las propiedades mecánicas en los materiales compuestos.

Análisis Fractográfico

La Figura 7 muestra la adherencia entre la matriz y el material de refuerzo de las probetas luego del ensayo de tracción. En el análisis de las fractografías en los casos específicos, se observaron patrones distintos de desunión y fractura entre las fibras y la matriz; las causas principales de la baja resistencia en las muestras dadas incluyen la separación entre la superficie de la matriz y la fibra, el desprendimiento de la fibra, la fractura de la fibra, las fisuras en la matriz y la presencia de grietas.

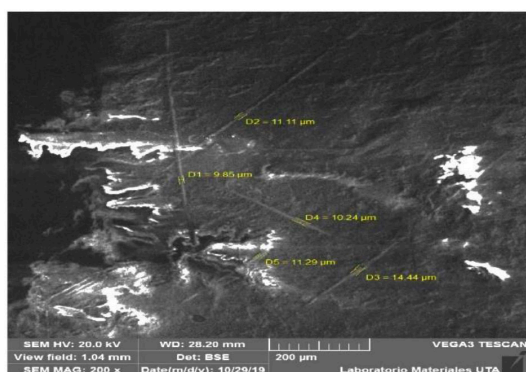
En el caso (a), se observa una fractura solo en la zona de refuerzo epóxico con una morfología fibrosa, considerando que la adherencia entre las fibras de cabuya y la matriz epóxica sea relativamente fuerte, la fractura se debe a tensiones concentradas o al estrés diferencial generado durante la carga. La variabilidad en las dimensiones de las fibras (9,85 μm a 14,44 μm) influyen en cómo se distribuyen las tensiones y, por lo tanto, contribuyen a la fractura localizada.

En el caso (b), se observa un desprendimiento de la fibra de cabuya por encima del refuerzo debido a la falta de adherencia. Esta situación puede vincularse tanto con la compatibilidad entre la matriz y la fibra como con las dimensiones de las fibras (11,43 μm a 17,14 μm). Las fibras más grandes podrían no ser encapsuladas adecuadamente por la matriz, lo que conduce a la separación; trabajos citados respaldan que altas concentraciones en el refuerzo de la matriz pueden resultar en acumulación de fibras, debilitando el área interfacial y propiciando el desprendimiento, lo que afecta las propiedades físicas.

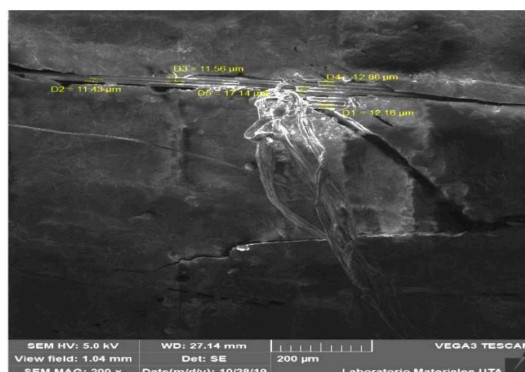
En el caso (c), aunque las fracturas son consistentes en las fibras de caña de azúcar, el desprendimiento de la superficie del refuerzo epóxico sugiere problemas de adhesión en esta interfaz. Las dimensiones variables de las fibras (8,22 μm a 12,33 μm) pueden influir

Tabla 7. Resultados experimentales ensayo de impacto.

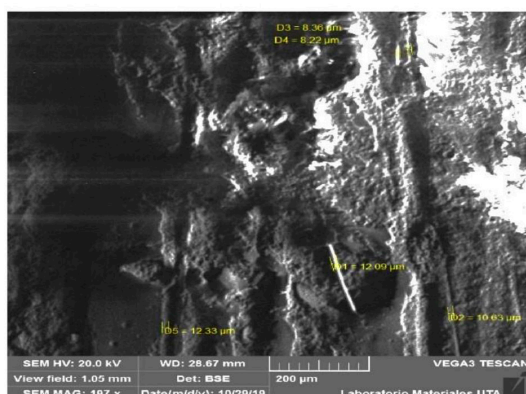
Material	Configuración	Energía Promedio Absorbida (J)	Resistencia Máxima al Impacto (J)
M01	C01	1,20	1,53
M01	C02	1,20	1,31
M02	C01	0,60	0,77
M02	C02	1,20	1,31



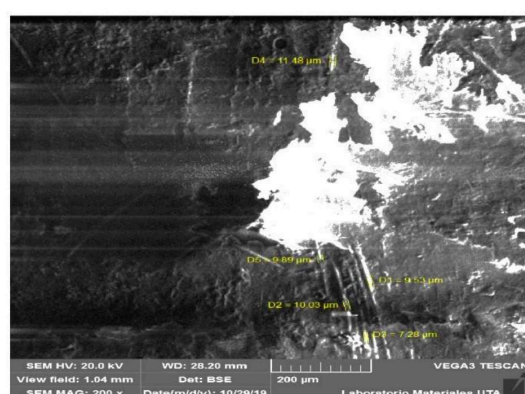
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7. Fractografías de probetas después del ensayo de tracción: (a) M01-C01, (b) M01-C02, (c) M02-C01, (d) M02-C02.

en la distribución de tensiones y el comportamiento de la fractura.

Finalmente, en el caso (d), se observa una morfología del refuerzo fibroso con desprendimiento, pero con consistencia en las fibras de caña de azúcar. La variación dimensional de las fibras (7,28 μm a 11,48 μm) puede contribuir nuevamente a cómo se distribuyen las tensiones y cómo se propaga la fractura.

Simulación FEM

Para la simulación se utilizaron las propiedades mecánicas del material M01 (resina epoxi con fibra de cabuya) configuración C02 (Matriz 60% - Refuerzo 40%) como el material de mejor comportamiento según los resultados de los ensayos experimentales y los análisis estadísticos.

Tracción

Se obtuvo un esfuerzo máximo de tracción de 63,44 MPa (Figura 8) lo cual respecto al valor registrado en el ensayo experimental (63,7 MPa) indica que la simulación tiene un error menor al 1% para este parámetro. Estudios previos analizaron las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya, encontraron una ligera diferencia del 0,2% al comparar los valores de los esfuerzos máximos obtenidos usando simulaciones FEM con dinámica explícita con el método experimental [23].

Se registró un desplazamiento de 9,92 mm (Figura 9) a lo largo del eje longitudinal de la probeta al momento de la falla del material. Para determinar la deformación unitaria se utiliza la ecuación (2).

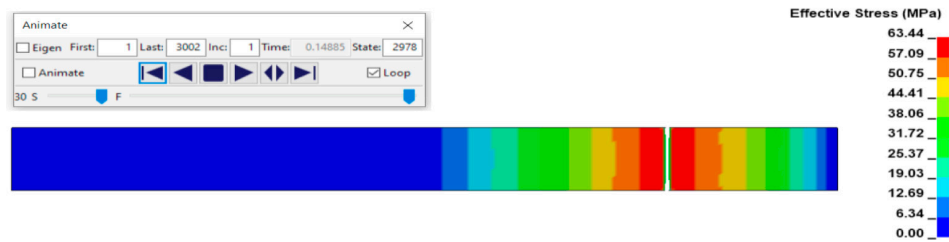


Figura 8. Esfuerzo máximo en la simulación del ensayo de tracción.

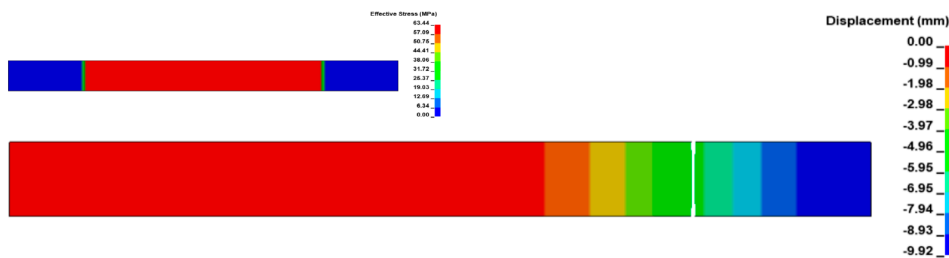


Figura 9. Desplazamiento máximo en la simulación del ensayo de tracción.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

Donde δ es la deformación total, L la longitud inicial de 250 mm y ϵ es la deformación unitaria con un valor calculado de 3,97%. Con los resultados obtenidos de la simulación se generó la curva esfuerzo-deformación de la Figura 10 para la probeta sometida a tracción.

Flexión

El esfuerzo máximo en la simulación del ensayo de flexión se registró en 108,49 MPa (Figura 11)

respecto al ensayo experimental de 118,73 MPa con un error de 8,6%.

La deflexión máxima en el momento de la falla del material fue de 15,58 mm (Figura 12) respecto al valor medido en el ensayo experimental (18,38 mm) con un error de 15,2%.

Con los resultados obtenidos del modelo de elemento finitos del ensayo de flexión se obtuvo la gráfica de fuerza-desplazamiento que se observa en la Figura 13, en donde se registra un valor de fuerza máxima de 110 N que de acuerdo al valor

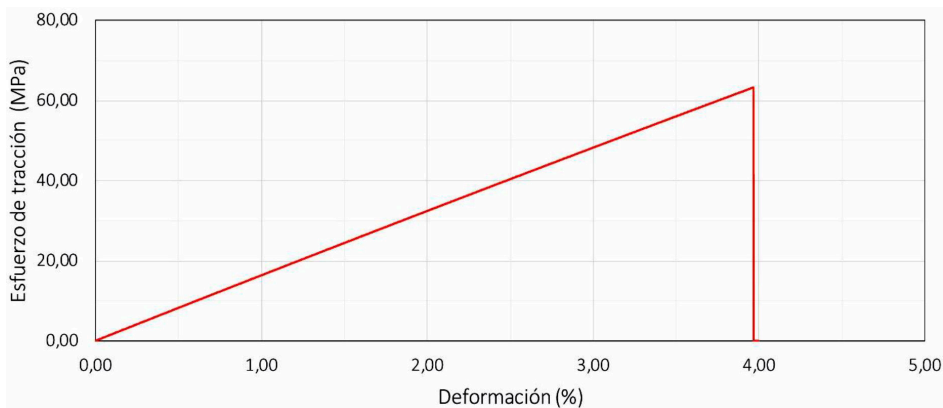


Figura 10. Curva esfuerzo-deformación de la simulación del ensayo de tracción.

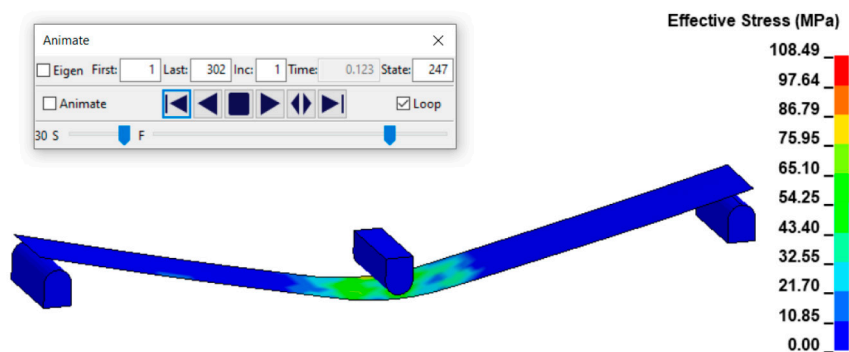


Figura 11. Esfuerzo máximo en la simulación del ensayo de flexión.

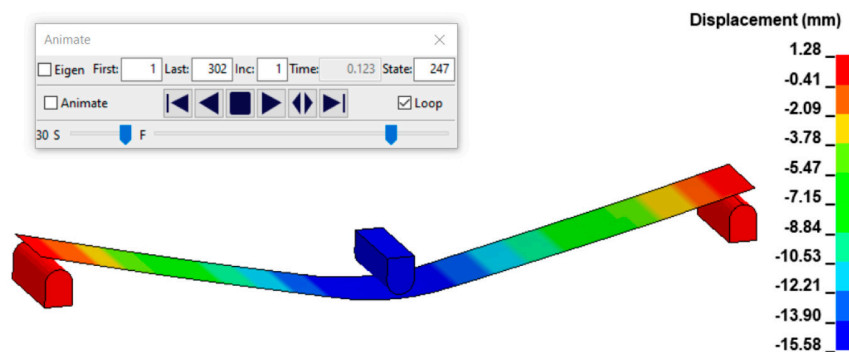


Figura 12. Deflexión máxima en la simulación del ensayo de flexión.

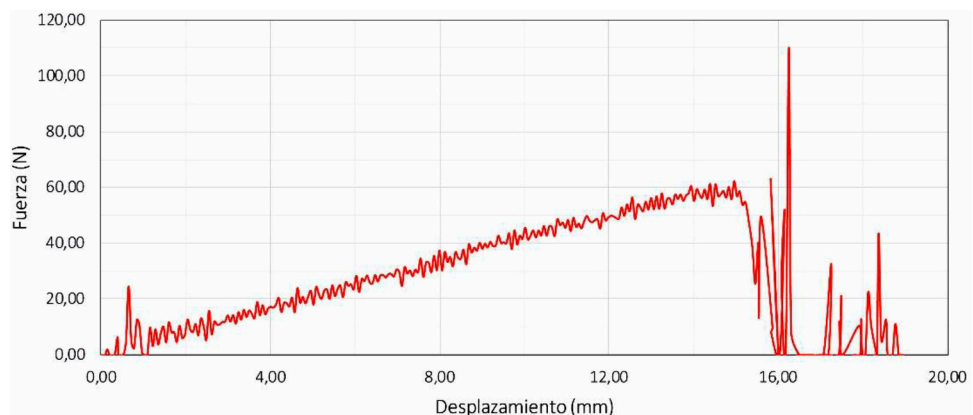


Figura 13. Curva fuerza-desplazamiento de la simulación del ensayo de flexión.

del ensayo experimental (100,45 N) indica un error menor al 10%.

El modelo de elementos finitos posee mucha sensibilidad en la variación de los datos de entrada y condiciones de borde, por ello para ajustar el modelo

se requiere de un análisis de sensibilidad donde se calibran principalmente los parámetros dentro del modelo matemático del material compuesto MAT054. Otras complejidades del modelo incluyen la selección del adecuado tamaño de malla, tiempos de simulación, pasos de tiempo y en el caso de la

simulación del ensayo de flexión la definición de contacto entre la probeta, soportes y cabezal móvil.

Una de las virtudes del método FEM es que el modelo del material calibrado a partir de los ensayos experimentales se puede utilizar para aplicaciones ingenieriles de mayor escala como por ejemplo en la industria automotriz. Entre las desventajas se tiene que la aplicación de cargas más lentas o a menor velocidad, las cuales requieren tiempos de simulación más altos, implica un tiempo de cálculo y un gasto computacional elevado.

CONCLUSIONES

La construcción de las probetas usando el método de estratificación por compresión para su aplicación en los diferentes ensayos basados en las normas ASTM, permitieron evaluar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos en sus distintas configuraciones llevadas a cabo en este estudio. Los resultados obtenidos demostraron claramente las diferencias en esfuerzo máximo, esfuerzo de tracción, módulo de elasticidad y elongación entre las diferentes configuraciones de materiales.

El material M01 presentó las mejores propiedades mecánicas tanto en tracción como en flexión, sin embargo, las diferencias debido a las configuraciones C01 y C02, en las que se varió el porcentaje de matriz y refuerzo, no son significativas. El material compuesto M01-C02 de resina epoxi con fibra de cabuya en orientación $90^\circ - 0^\circ - 90^\circ$ y fracción volumétrica 60% matriz - 40% refuerzo ofrece la mejor resistencia a la tracción con 63,70 MPa, mientras que a flexión presenta un esfuerzo de 118,73 MPa semejante a la configuración C01 (118,81 MPa). En el ensayo a impacto el material compuesto que mejor presentó sus propiedades mecánicas fue el M01-C01 en el cual la resistencia máxima al impacto obtenida es de 1,53 J sin falla de este.

De acuerdo con el análisis fractográfico la falla únicamente se produjo en la matriz de resina epoxi mientras que las fibras de refuerzo mantuvieron su consistencia, con la diferencia de que en el material M01 existió solo fractura de la matriz mientras que en el material M02 existió desprendimiento de la matriz dejando a la intemperie el refuerzo de fibra. Por lo tanto, la fibra de cabuya presenta la mejor adherencia con la matriz epoxi.

Los resultados de la simulación por elementos finitos (FEM) en comparación con los ensayos experimentales revelaron discrepancias menores al 1% en el esfuerzo máximo de tracción y menores al 10% en términos de esfuerzo y fuerza máxima aplicada en flexión. Estos resultados validan de manera efectiva tanto los ensayos computacionales como los experimentales. La congruencia en los resultados refuerza la posibilidad de utilizarlos en distintas aplicaciones, respaldados por un modelo matemático coherente con los criterios metodológicos fundamentados en la teoría.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. Stalin Ponce por el apoyo brindado en la ejecución de los ensayos experimentales. Así como también, al Ing. Mario Brito por la colaboración brindada en los laboratorios de simulación de CEND Ingeniería.

REFERENCIAS

- [1] A. Wiangkham, A. Ariyarat, and P. Aengchuan, "Prediction of the influence of loading rate and sugarcane leaves concentration on fracture toughness of sugarcane leaves and epoxy composite using artificial intelligence," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 117, 2022, Art. no. 103188, doi: 10.1016/j.tafmec.2021.103188.
- [2] N. Sreeraman, V.C.S. Gandhi, T. Surendiran, and R. Kumaravelan, "Mechanical, thermal, and morphological behaviour studies on coconut shell and palm kernel filler biocomposite," *Maderas-Cienc Tecnol*, vol. 24, pp. 1-14, 2021, doi: 10.4067/s0718-221x2022000100414.
- [3] D. Verma, V. Dogra, A.K. Chaudhary, and R. Mordia, "Advanced biopolymer-based composites: construction and structural applications," *Sustain. Biopolym. Compos*, D. Verma, M. Sharma, K. Lim Goh, S. Jain, and H. Sharma, Eds., Jan. 2022, pp. 113-128, doi: 10.1016/B978-0-12-822291-1.00010-5.
- [4] J.C. Posada y E. Montes-Florez, "Revisión: materiales poliméricos biodegradables y su aplicación en diferentes sectores industriales", *Inf. Técnico*, vol. 86, no. 1, pp. 94-110, Nov. 2022, doi: 10.23850/22565035.3417.

- [5] N. Kumar and D. Das, "Fibrous biocomposites from nettle (*Girardinia diversifolia*) and poly(lactic acid) fibers for automotive dashboard panel application," *Compos. Part B Eng.*, vol. 130, pp. 54-63, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2017.07.059.
- [6] A.K. Mohanty, M. Misra, and L.T. Drzal, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis, 2005.
- [7] M.A. Alam, S.M. Sapuan, H.H. Ya, P.B. Hussain, M. Azeem, and R.A. Ilyas, "Application of biocomposites in automotive components: A review," *Biocomposite Synth. Compos. Automot. Appl.*, pp. 1-17, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-820559-4.00001-8.
- [8] L. Kerni, S. Singh, A. Patnaik, and N. Kumar, "A review on natural fiber reinforced composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 28, pp. 1616-1621, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.851.
- [9] P. Bhagabati, "Biopolymers and biocomposites-mediated sustainable high-performance materials for automobile applications," *Sustain. Nanocellulose Nanohydrogels from Nat. Sources*, pp. 197-216, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-816789-2.00009-2.
- [10] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, "Datos meteorológicos e hidrológicos", 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.inamhi.gob.ec/>
- [11] M. Cevallos, "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquial Rural 'Santa Catalina de Salinas'", 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.imbabura.gob.ec/phocadownloadpap/K-Planes-programas/PDOT/Parroquial/PDOT%20SALINAS.pdf>
- [12] E.A. Llanes-Cedeño, D. Peralta-Zurita, M. Pucha-Tambo y J.C. Rocha-Hoyos, "Caracterización mecánica a flexión de materiales compuestos con matriz fotopolimérica reforzados con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D", *Ingenius. Rev. Cienc. y Tecnol.*, no. 22, pp. 100-112, 2019, doi: 10.17163/ings.n22.2019.10.
- [13] G. Hemath Kumar, H. Babuvishwanath, R. Purohit, P. Sahu, and R.S. Rana, "Investigations on Mechanical Properties of Glass and Sugarcane Fiber Polymer Matrix Composites," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 4, pp. 5408-5420, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.05.052.
- [14] T. Uygunoglu, I. Gunes, and W. Brostow, "Physical and Mechanical Properties of Polymer Composites with High Content of Wastes Including Boron," *Mater. Res.*, vol. 18, no. 6, pp. 1188-1196, dec. 2015, doi: 10.1590/1516-1439.009815.
- [15] *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International, D3039/D3039M - 08, 2008, doi: 10.1520/D3039_D3039M-08.
- [16] *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International, ASTM D7264/D7264M-21, April, 2007, doi: 10.1520/D7264_D7264M-07.
- [17] *Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)*, D5628 - 18, ASTM International, May. 2018, doi: 10.1520/D5628-18.
- [18] A. Shalwan and B.F. Yousif, "In state of art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres," *Mater. Des.*, vol. 48, pp. 14-24, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.07.014.
- [19] J. Hallquist, LS-DYNA Keyword User's Manual Volume II: Material Models. Livermore Software Technology Corporation (2018).
- [20] P. Feraboli, B. Wade, F. Deleo, M. Rassaian, M. Higgins, and A. Byar, "LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 42, no. 11, pp. 1809-1825, 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.08.004.
- [21] T.B. Yallew, E. Kassegn, S. Aregawi, and A. Gebresias, "Study on effect of process parameters on tensile properties of compression molded natural fiber reinforced polymer composites," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 1-8, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2101-0.
- [22] P. Sathiamurthi, K.S. Karthi Vinith, T.P. Sathishkumar, S. Arunkumar, and A.S. Anaamalaai, "Fiber extraction and mechanical properties of Agave Americana/Kenaf fiber reinforced hybrid epoxy composite," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 8594-8601, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.571.
- [23] J.G. Paredes Salinas, C.F. Pérez Salinas y C.B. Castro Miniguano, "Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicado a la industria automotriz", *Enfoque UTE*, vol. 8, no. 3, pp. 1-15, 2017, doi: 10.29019/enfoqueute.v8n3.163.