

**Caracterización mecánica de un material compuesto reforzado con fibras de caña de  
azúcar**

**Heiner Fabian Vega Vergara**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**Octavio Andrés González Estrada**

**Ingeniero Mecánico, Ph D.**

**Codirector**

**Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra**

**Ingeniero Mecánico**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería de Mecánica**

**Bucaramanga**

**2019**

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos.....	16
1.2 Objetivo General .....	16
1.2. Objetivos Específicos .....	16
2. Marco Teórico .....	17
2.1 Material Compuesto .....	17
2.2 Componente de refuerzo (fibras) .....	17
2.3 Matriz del material compuesto .....	18
2.4 Análisis de Elementos finitos (FEA).....	19
2.5 Análisis de varianza (ANOVA) .....	19
3. Materiales y método .....	20
3.1 Materiales y equipo .....	20
3.1.1 Máquina de ensayos. ....	20
3.1.2 Fibras de caña de azúcar.....	20
3.1.3 Resina epoxi R744. ....	21
3.2 Fabricación del material compuesto.....	22

---

3.3 Experimento .....	22
3.3.1 Diseño experimental.....	22
3.3.2 Ensayos de tracción.....	25
3.3.3 Ensayos de flexión.....	25
3.4 Modelo numérico .....	25
3.4.1 Modelo geométrico y propiedades del compuesto.....	25
3.4.2 Mallado.....	26
3.4.3 Condiciones de contorno.....	27
4. Resultados .....	29
5. Conclusiones .....	44
6. Recomendaciones.....	46
Referencias Bibliográficas .....	47
Anexos.....	50

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Morfología del tallo de la caña de azúcar. ....	14
Figura 2. (a) Bagazo seco. (b) Fibras de caña de azúcar. ....	21
Figura 3. Moldes de los cuatro tipos de probetas fabricadas.....	23
Figura 4. Tipos de probetas .....	24
Figura 5. Montaje de los ensayos. (a) Ensayo de tensión. (b) Ensayos de flexión.....	26
Figura 6. Modelo del material compuesto.....	27
Figura 7. Mallado del compuesto. (a) Mallado de la matriz. (b) Mallado del refuerzo. ....	28
Figura 8. Condiciones de contorno para el modelo expuesto a cargas de tracción. (a) Soporte fijo. (b) Carga de tracción.....	28
Figura 9. Condiciones de contorno para el modelo expuesto a cargas de flexión. (a) Soportes fijos en el plano inferior del modelo. (b) Carga de flexión. ....	29
Figura 10. Comportamiento de cada tipo de probeta en los ensayos de tensión. ....	31
Figura 11. Intervalos de confianza para las medias de esfuerzo a tensión de cada grupo de probeta. ....	32
Figura 12. Comportamiento de cada tipo de probeta en los ensayos de flexión. ....	34
Figura 13. Intervalos de confianza para las medias de esfuerzo a flexión de cada grupo de probeta. ....	35
Figura 14. Distribución de esfuerzos de Von Mises a tracción del modelo de la probeta MC1.. ..	36

---

Figura 15. Distribución de esfuerzos de Von Mises a tracción del modelo de la probeta MC2. .....	36
Figura 16. Distribución de esfuerzos de Von Mises a tracción del modelo de la probeta MC3.. .....	37
Figura 17. Distribución de esfuerzos de Von Mises a flexión del modelo de la probeta MC1... .....	39
Figura 18. Distribución de esfuerzos de Von Mises a flexión del modelo de la probeta MC2... .....	39
Figura 19. Distribución de esfuerzos de Von Mises s flexión del modelo de la probeta MC3... .....	40

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características de las probetas de ensayo.....	24
Tabla 2. Número de ensayos de tracción y flexión para cada tipo de probeta. ....	24
Tabla 3 Resultados promedios de los ensayos de tensión de las fibras de caña de azúcar. ....	29
Tabla 4. Resultados estadísticos de los ensayos de tensión de las fibras de caña de azúcar....	30
Tabla 5. Resultados promedios de los ensayos de tensión.....	30
Tabla 6. Resultados del análisis de varianza para los ensayos de tracción. ....	32
Tabla 7. Resultados promedios de los ensayos de flexión.....	33
Tabla 8. Resultados del análisis de varianza para los ensayos de flexión.....	34
Tabla 9. Módulos de elasticidad a tracción experimental y numérico. ....	38

---

### Lista de Anexos

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Resultados análisis de varianza a esfuerzos de tensión. ....	50
Anexo B. Resultados análisis de varianza a esfuerzos de flexión.....	51
Anexo C. Elongación bajo cargas de tensión.....	52
Anexo D. Elongación bajo cargas de flexión.....	53
Anexo E. Resultados del proceso de convergencia.....	54

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON FIBRAS DE CAÑA DE AZÚCAR.

**AUTOR:** HEINER FABIAN VEGA VERGARA

**PALABRAS CLAVE:** Material compuesto, Matriz epoxi, Refuerzo orgánico, Fibras de caña de azúcar, Esfuerzos de tracción, Esfuerzos de flexión.

## DESCRIPCION

Los materiales compuestos han atraído un gran interés en el área de la ingeniería mecánica en las últimas décadas debido a la gran variedad de aplicaciones industriales en las que se pueden usar estos materiales, y al bajo impacto en el medio ambiente cuando son desechados, en comparación con los materiales tradicionales. Una de las configuraciones para materiales compuestos más destacada es la de matrices poliméricas reforzadas con fibras. Las matrices desempeñan varias funciones en el compuesto tales como, proporcionar la forma general de la pieza o producto hecho de material compuesto, proteger y distribuir la carga en el refuerzo; y las fibras se encargan de mejorar la resistencia y la rigidez del compuesto. En esta investigación se fabricaron probetas un material compuesto por una matriz epoxi R744 reforzado con haces de fibras de caña de azúcar. Este material fue sometido a pruebas experimentales de tracción y flexión bajo las normas ASTM 3039 y 7264, las cuales estandarizan las pruebas de tensión y flexión, respectivamente, para materiales compuestos de matriz polimérica. Posteriormente, el compuesto se estudió numéricamente, mediante análisis de elementos finitos (FEA), para estimar la distribución de los esfuerzos en este y validar los resultados obtenidos experimentalmente.

<sup>1</sup> \* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Octavio Andrés González Estrada, Ingeniero Mecánico.

## ABSTRAC

**TITLE:** MECHANICAL CHARACTERIZATION OF A REINFORCED COMPOSITE MATERIAL WITH SUGAR CANE FIBERS.

**AUTHOR:** HEINER FABIAN VEGA VERGARA

**KEYWORDS:** Composite material, Epoxy matrix, Organic reinforcement, Sugar cane fibers, Tensile stress, Flexural stress.

## DESCRIPTION

Composite materials have attracted great interest in the area of mechanical engineering in recent decades due to the wide variety of industrial applications in which these materials can be used, and the low impact on the environment when they are discarded, in comparison With traditional materials. One of the most prominent configurations for composite materials is polymer reinforced matrixes with fibers. The matrices perform various functions in the compound such as, providing the general shape of the piece or product made of composite material, protecting and distributing the load in the reinforcement; and the fibers are responsible for improving the strength and stiffness of the compound. In this investigation, specimens were made of a material composed of an R744 epoxy matrix reinforced with bundles of sugarcane fibers. This material was subjected to experimental tensile and flexural tests under ASTM 3039 and 7264 standards, which standardize tension and flexural tests, respectively, for polymer matrix composite materials. Subsequently, the compound was studied numerically, by finite element analysis (FEA), to estimate the distribution of efforts in it and validate the results obtained experimentally.

<sup>1</sup> \* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Octavio Andrés González Estrada, Ingeniero Mecánico.

## Introducción

Los materiales compuestos han sido el foco de atención de muchos investigadores debido a sus sobresalientes propiedades mecánicas, las cuales permiten que sean utilizados en numerosas aplicaciones aeroespaciales, marinas, automovilísticas, civiles, entre otras [1]. Un material compuesto aceptable para uso en aplicaciones de ingeniería debe satisfacer los siguientes tres requisitos básicos: (i) consistir en al menos dos materiales físicamente distintos y separables mecánicamente, que, dependiendo de sus propiedades y cantidades utilizadas, se denominan matriz y refuerzo; (ii) debe haber una posibilidad para su preparación mediante la mezcla de los componentes anteriores (a veces precedidos o acompañados de algún tratamiento especial para lograr propiedades óptimas); y (iii) se espera que el material final posea varias propiedades superiores a las de los componentes individuales, es decir, debe estar presente algún efecto sinérgico [9].

Una de las configuraciones para materiales compuestos más destacada es la de matrices poliméricas reforzadas con fibras. Las matrices desempeñan varias funciones en el compuesto tales como, proporcionar la forma general de la pieza o producto hecho de material compuesto, proteger y distribuir la carga en el refuerzo; y las fibras se encargan de mejorar la resistencia y la rigidez del compuesto [10]. Las matrices poliméricas se dividen en dos grupos: termoestables y termoplásticas. Las matrices termoestables incluyen epoxis, poliéster y poliamidas. Las matrices epoxis son las más empleadas para compuestos poliméricos debido a varias propiedades deseables, como buena resistencia mecánica, estabilidad dimensional y baja inflamabilidad [11, 13]. Las propiedades mecánicas de los polímeros reforzados con fibras (PRF), especialmente la resistencia a la tracción y el módulo de Young aumentan con la longitud de las fibras, por lo tanto, para

fabricar un compuesto de alto rendimiento se debe usar fibras continuas [4]. Debido a la creciente búsqueda por proteger el medio ambiente y conservar energía, la mayoría de los estudios en PRF se centran en fibras naturales, ya que estas provienen de fuentes renovables y ayudan a reducir el impacto ambiental generado cuando el material es desechado.

Las fibras del bagazo de caña de azúcar (BCA) es una de las fibras más atractivas debido a sus propiedades mecánicas y gran abundancia. El bagazo es el residuo que queda después de la trituración de la caña de azúcar para la extracción de jugo. Este se compone principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, que se conectan en red para darle resistencia a la fibra [12]. Los investigadores actuales de la comunidad científica de los polímeros, indicaron la posibilidad de reforzar diferentes matrices de polímeros con fibras de BCA, a nano, micro o macroescala para ampliar las aplicaciones de compuestos de polímeros [14, 15]. La *Saccharum officinarum*, más conocida como caña de azúcar, es un cultivo tropical y subtropical y es la principal fuente de azúcar a nivel mundial. La superficie de cultivo de azúcar global es de aproximadamente 31.3 millones de hectáreas, entre las cuales la caña de azúcar representa el 70% [19]. La producción mundial de BCA se registró recientemente en  $1.6 \times 10^3$  millones de toneladas por año [4]. La mayor parte de la caña de azúcar consiste en duro material fibroso llamado corteza, mientras que en el interior, hay un material suave llamado medula [7], tal como se aprecia en la figura 1. La medula contiene fibras pequeñas y la mayoría de la sacarosa, mientras que la corteza está compuesta por fibras más largas, duras y finas. Las propiedades de los compuestos reforzados por las fibras de la corteza son mejores debido a que esta presenta una mayor densidad [6].

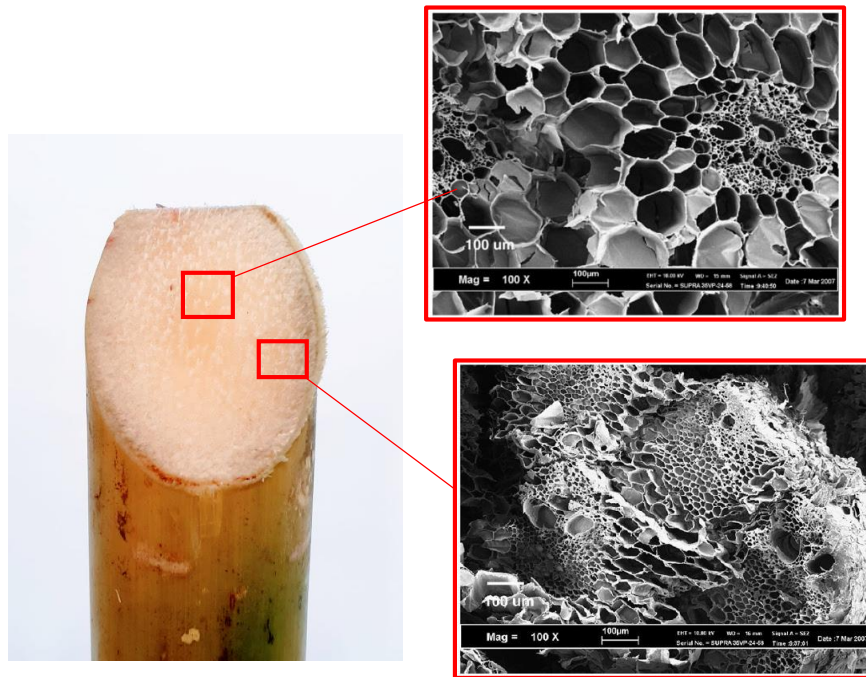


Figura 1. Morfología del tallo de la caña de azúcar.

Fuente: [6].

El BCA se utiliza principalmente como combustible para generar vapor y producir electricidad en las fábricas de azúcar y como materia prima en las industrias de papel. Sin embargo, estas no son las únicas aplicaciones que tiene el bagazo de caña de azúcar. Por ejemplo, algunos investigadores han demostrado la capacidad que tiene este subproducto para convertirse en refuerzos de cementos compuestos, respetuosos con el medio ambiente, que pueden utilizarse en diversas aplicaciones internas y externas de edificios [16]. Algunas de las aplicaciones potenciales de los compuestos reforzados con fibra natural en la industria automotriz incluyen paneles de puertas e instrumentos, bandejas de embalaje, guanteras, reposa brazos y respaldo de asientos [5].

Además de los estudios experimentales, los compuestos pueden ser evaluados por modelos predictivos, usualmente, mediante modelos de análisis por elementos finitos (FEA). Los materiales

---

compuestos han sido, y siguen siendo, una de las principales áreas de investigación en mecánica computacional en las últimas décadas. Los principales esfuerzos se centran en el estudio de laminados y estructuras compuestas [17]. Recientemente, se ha desarrollado una forma unificada explícita, de condiciones de fronteras usadas para el análisis de elementos de volúmenes representativos (EVR), mediante elementos finitos, para laminados unidireccionales o con distintas orientaciones angulares, para predecir las propiedades elásticas de los materiales, los resultados obtenidos con este método se han validado con resultados experimentales, presentando bajos porcentajes de error entre ellos [18, 10]. Estos modelos de análisis de elementos finitos deben pasar por ciertas etapas para una correcta solución del modelo; primero se debe hacer un modelo geométrico y convertirlo en modelo sólido, luego, se asignan las propiedades del material, después se debe proceder al mallado adecuado para el modelo, luego, se debe aplicar las condiciones de contorno y por último se soluciona el conjunto de condiciones establecidas y muestran los resultados requeridos [20]. Este es el modelo adoptado por esta investigación.

A partir de lo anterior, se fabricaron probetas un material compuesto por una matriz epoxi R744 reforzado con haces de fibras de caña de azúcar. Este material fue sometido a pruebas experimentales de tracción y flexión bajo las normas ASTM 3039 y 7264, las cuales estandarizan las pruebas de tensión y flexión, respectivamente, para materiales compuestos de matriz polimérica. Posteriormente, el compuesto se estudió numéricamente, mediante análisis de elementos finitos (FEA), para estimar la distribución de los esfuerzos en este y validar los resultados obtenidos experimentalmente.

## 1. Objetivos

### 1.2 Objetivo General

Contribuir con el fortalecimiento de la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad industrial de Santander de impulsar la investigación e innovación llevando a cabo la caracterización de un material compuesto reforzado con fibra de caña de azúcar mediante simulaciones y ensayos experimentales con el fin de medir sus propiedades mecánicas.

### 1.2. Objetivos Específicos

1. Construir probetas de un material compuesto con resina epoxi reforzado con fibras de caña de azúcar, alineadas paralelamente a sus ejes longitudinales, bajo las normas ASTM D3039 y D7264 para realizar ensayos de tensión y flexión respectivamente.
2. Determinar por medio de ensayos las propiedades mecánicas; resistencia a la tracción y a la flexión, del material compuesto reforzado con fibras de caña de azúcar.
3. Estimar mediante la utilización de elementos finitos la respuesta del material compuesto reforzado con fibras de caña de azúcar a cargas de tracción y flexión para comparar con los resultados experimentales.
4. Implementar un análisis estadístico experimental apropiado que permita determinar la resistencia a la tracción y a la flexión del material compuesto reforzado con fibras de caña de azúcar y que otorgue un conocimiento aproximado del comportamiento de este.

## 2. Marco Teórico

A continuación, se presentarán referencias teóricas que ayudarán a entender los conceptos básicos de este trabajo de grado.

### 2.1 Material Compuesto

Se define como material compuesto la combinación de dos o más materiales en la cual no hay interacción química entre estos. Estos materiales compuestos presentan mejores propiedades mecánicas que los materiales componentes por si solos.

Los materiales compuestos están formados por una matriz continua que transmite los esfuerzos al agente reforzante, lo protege y da cohesión al material, y el componente reforzante que aporta la resistencia mecánica, rigidez y dureza al material. El componente reforzante puede ser fibras, partículas o estructuras.

### 2.2 Componente de refuerzo (fibras)

Las fibras mejoran la resistencia, carga de rotura, la rigidez, la relación resistencia/peso, estas soportan la mayor parte de la fuerza o tensión aplicada. Los factores más importantes que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar materiales compuestos reforzados con fibras son los siguientes:

- **Relación de aspecto:** Esto hace referencia a la disposición de las fibras, es decir, si estas son continuas o discontinuas. Las fibras continuas tienen altas resistencias, pero son

difíciles de introducir en el material compuesto y por lo tanto son más difíciles de construir, mientras que las fibras discontinuas también proporcionan altas resistencias y son más fáciles de construir.

- **Fracción volumétrica:** Una mayor fracción volumétrica de fibra aumenta la resistencia ya que aumenta la posibilidad de rodear las fibras con el material que hace de matriz.
- **Orientación de las fibras:** Las fibras unidireccionales presentan resistencia máxima cuando la carga aplicada es paralela a las fibras, sin embargo, las propiedades son muy anisotrópicas. Por ello, se suelen usar fibras dispuestas en forma de tejido, capas cruzadas, sacrificando la máxima resistencia con propiedades uniformes en el compuesto.
- **Propiedades de fibras:** El material de las fibras debe ser fuerte, rígido, ligero y tener elevada temperatura de fusión. Se prefieren materiales con elevados módulos y resistencia específicos. Las fibras pueden disponerse como telas o tejidos o ser producidas en forma de fibras largas. También se puede cambiar la orientación en las capas alternadas de fibras largas.

### 2.3 Matriz del material compuesto

La matriz de los materiales compuestos mantiene la forma de la estructura, dan estabilidad al conjunto transfiriendo las cargas al refuerzo, protegen al refuerzo del deterioro mecánico y químico y evita la propagación de grietas. Las matrices se clasifican según el comportamiento térmico del polímero, tenemos:

- **Termoplásticos:** Son polímeros que al calentarse a determinadas temperaturas se convierten en fluidos, permitiendo su moldeabilidad en la forma deseada, que quedará preservada al enfriarse.
- **Termoestables:** Son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser remodelados. Molecularmente hablando tienen una estructura entrecruzada y por lo tanto tienden a ser resinas de mucha rigidez, y al someterlos a temperatura elevada promueve la descomposición química del polímero. A temperatura ambiente son duros y frágiles.

#### 2.4 Análisis de Elementos finitos (FEA)

El análisis de elementos finitos (FEA) consiste en el modelado de productos y sistemas en un entorno virtual, con el objetivo de encontrar y resolver posibles problemas estructurales o de rendimiento (o problemas ya existentes). El FEA es la aplicación práctica del método de elementos finitos (FEM), que utilizan los ingenieros y científicos para modelar matemáticamente y resolver numéricamente complejos problemas estructurales, de fluidos. El software de FEA se puede utilizar en una amplia gama de sectores pero habitualmente se emplea en el sector de la aeronáutica, la biomecánica y la automoción.

#### 2.5 Análisis de varianza (ANOVA)

Un análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

### 3. Materiales y método

#### 3.1 Materiales y equipo

**3.1.1 Máquina de ensayos.** La de máquina de ensayos MTS BIONIX fue utilizada para hacer las pruebas mecánicas a las fibras de caña de azúcar, probetas de resina epoxi R744 y probetas del material compuesto. Esta máquina registra automáticamente los valores de la fuerza aplicada y el desplazamiento de la cabeza móvil con una frecuencia de dos datos por segundo.

**3.1.2 Fibras de caña de azúcar.** El bagazo de caña de azúcar fue obtenido después de la extracción del jugo contenido en los tallos de la caña de azúcar, proceso que se realiza mediante un molino que los exprime. Con el fin de mejorar la unión de las fibras y la matriz del compuesto adhesión de las fibras, el bagazo se sumergió en agua hirviendo durante 30 minutos, para eliminar los tejidos pastosos y residuos adheridos a las superficies de las fibras [20]. Luego de esto, fue puesto a secar durante 72 horas bajo condiciones ambiente. Los haces de fibras se sustrajeron manualmente de la corteza del bagazo, lugar donde se encuentran las fibras más largas y resistentes, esto se hizo con la ayuda de un bisturí. Estos fueron cortados con una longitud de 100 mm y un diámetro promedio de 0.725 mm, este fue medido con un calibrador de 0.05 mm de precisión. En la Figura 2 se puede observar el bagazo seco y las fibras de caña de azúcar extraídas de este. Una vez obtenidas las fibras del bagazo caña de azúcar, se procedió a averiguar sus propiedades mecánicas bajo la norma ASTM 3822. Para esto se sometieron diez fibras a ensayos

de tensión, a las cuales se les hizo una pestaña de resina epoxi en cada uno de sus extremos para que las mordazas de la máquina de ensayos pudiera sujetarlas y transmitirle la fuerza de tracción.

**3.1.3 Resina epoxi R744.** La resina epoxi R744 utilizada en esta investigación se mezcló con un agente catalizador para endurecer, la proporción en volumen de resina y endurecedor utilizada para la mezcla fue de 4:1, tal como lo recomienda el fabricante de estos productos.



(a)



(b)

*Figura 2.* (a) Bagazo seco. (b) Fibras de caña de azúcar.

### 3.2 Fabricación del material compuesto

La fabricación de las probetas del material compuesto se realizó mediante la técnica de estratificación manual (hand lay up), la cual consiste en preparar la mezcla de resina y endurecedor en un recipiente, para luego depositarlo en un molde. Dicho molde fue fabricado en balsa de tal manera que tuviera la capacidad de moldear cinco probetas juntas. Este molde fue recubierto con cera desmoldante para facilitar la extracción de las probetas una vez haya terminado el secado del material compuesto. Los componentes de la resina epoxi se mezclaron de forma manual, durante cinco minutos. Esta mezcla se revolvió lentamente para evitar que se crearan burbujas de aire que podrían convertirse en concentradores de esfuerzos en las probetas. Las fibras se ubicaron en el molde dándoles la dirección y alineación adecuada; para los ensayos de flexión, las fibras se situaron aproximadamente a 1 mm de la base de las probetas, de tal modo que estuvieran fuera del plano neutro de tensiones. Posteriormente, se vertió la mezcla de resina epoxi en el molde y se dejó secar bajo condiciones ambiente por 24 h. Finalmente, se retiró el bloque de probetas del molde y se utilizó una sierra de mesa para separarlas, el material no sufrió ningún tipo de daño debido al corte y se lograron buenos acabados superficiales. Se fabricaron cuatro tipos de probetas en forma rectangular con medidas de (100x20x5) mm. En la Figura 3 se puede apreciar las probetas antes de ser separadas de los moldes.

### 3.3 Experimento

**3.3.1 Diseño experimental.** Para los ensayos experimentales se crearon cuatro tipos de probetas, con las características indicadas en la Tabla 1, para averiguar las variaciones en las propiedades mecánicas del material compuesto según cambia su fracción volumétrica de fibras.

Como se observa en la Tabla 2, se fabricaron diez muestras para cada tipo de probeta, de las cuales, cinco muestras se ensayaron con cargas de tracción y cinco a cargas de flexión, tal como lo recomienda las normas anteriormente mencionadas. En total se fabricaron 40 probetas, estas se sometieron a los ensayos de tracción y flexión en forma aleatoria. Todas las probetas fueron etiquetadas apropiadamente para hacerles seguimiento durante el experimento. Se hizo un análisis de varianza de un factor con el software de análisis estadístico Minitab, para averiguar si las medias de las observaciones obtenidas en los ensayos de los cuatro grupos de muestras, son similares o significativamente distintas. En la Figura 4 se muestran los cuatro tipos de probetas fabricadas.



*Figura 3.* Moldes de los cuatro tipos de probetas fabricadas.

Tabla 1.

Características de las probetas de ensayo.

Tipos de probeta	Fracción volumétrica del refuerzo (fibra) en el material compuesto
Probeta RE	0 % (solo resina)
Probeta MC1	2 %
Probeta MC2	3.5 %
Probeta MC3	5 %

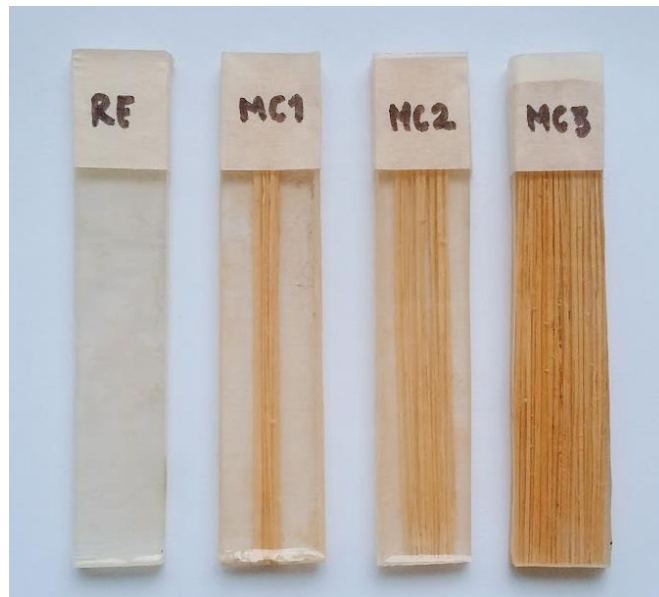


Figura 4. Tipos de probetas

Tabla 2.

Número de ensayos de tracción y flexión para cada tipo de probeta.

	Probeta RE	Probeta MC1	Probeta MC2	Probeta MC3
Ensayos de tracción	5	5	5	5
Ensayos de flexión	5	5	5	5

**3.3.2 Ensayos de tracción.** Los ensayos de tracción se llevaron a cabo bajo la norma ASTM 3039, la cual normaliza las pruebas de tensión en materiales compuestos de matriz polimérica. La máquina de ensayos fue ajustada a una velocidad de avance de 2 mm/min, para efectuar una tasa de deformación casi constante sobre las probetas del compuesto. Se transfirió la fuerza de tracción a las probetas por medio de unas mordazas correctamente alineadas, controladas hidráulicamente.

**3.3.3 Ensayos de flexión.** Los ensayos de flexión se realizaron bajo la norma ASTM 7264 . Se utilizó el procedimiento “A” expuesto en dicha norma, la cual consiste en ensayar las probetas apoyándolas en dos soportes ubicados cerca a los extremos de esta y colocando la carga en el centro de la probeta mediante la cabeza de carga de la máquina. Para estos ensayos, la máquina fue ajustada a una velocidad de avance de 1 mm/min. En cada prueba se registró la fuerza aplicada y el desplazamiento de la cabeza móvil de la máquina de ensayos. Al finalizar este, se analizó el modo de falla y su localización en cada probeta para verificar que las fracturas se dieron de la forma esperada. En la Figura 5 se puede apreciar el montaje de los ensayos de tensión y flexión.

### 3.4 Modelo numérico

**3.4.1 Modelo geométrico y propiedades del compuesto.** Para crear los modelos geométricos del material compuesto fue utilizado el software Ansys. Se crearon tres modelos diferentes, a los cuales se les establecieron las propiedades geométricas y las fracciones volumétricas de refuerzo indicadas anteriormente. En la Figura 6 se observa el modelo del compuesto, en el cual se aprecian las fibras de caña de azúcar orientadas paralelamente entre ellas, embebidas por la matriz de resina epoxi R744. Para este arreglo la fracción volumétrica de fibra es de 5%. Las propiedades

mecánicas de las fibras de caña de azúcar y de la resina epoxi encontradas en los ensayos experimentales fueron establecidas en los modelos.

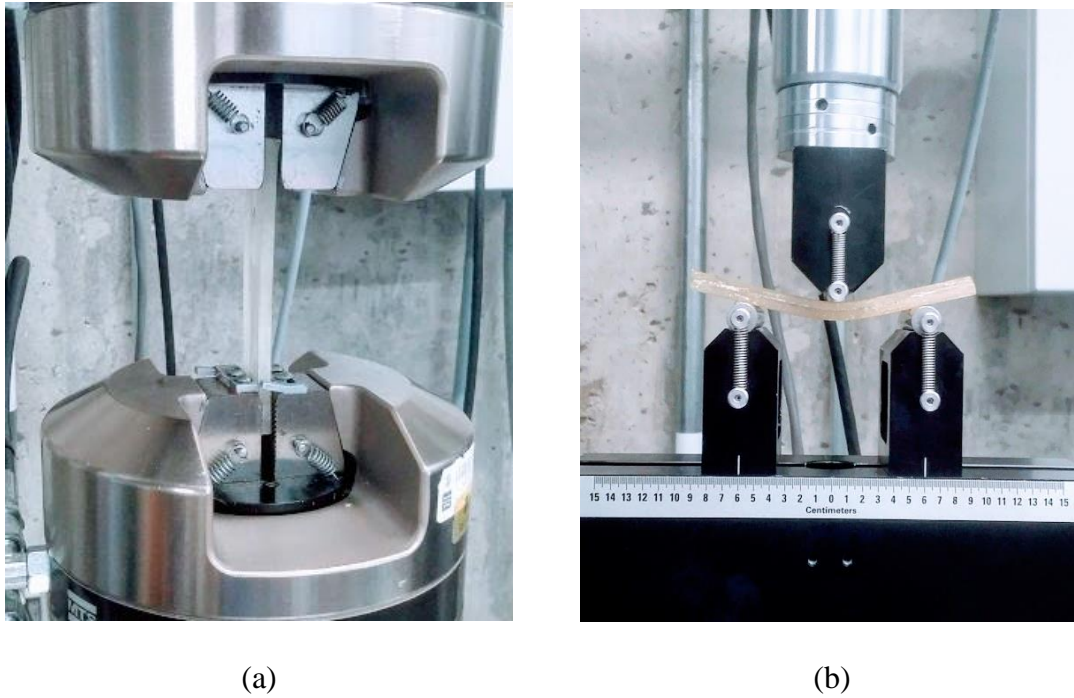
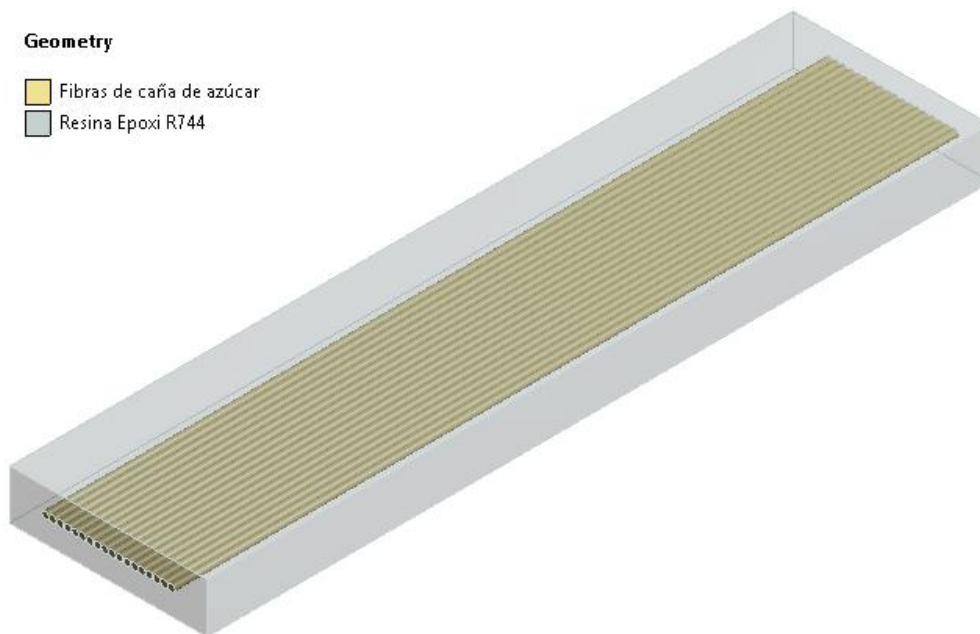


Figura 5. Montaje de los ensayos. (a) Ensayo de tensión. (b) Ensayos de flexión.

**3.4.2 Mallado.** En la Figura 7 se muestra el mallado para las fibras y para la resina epoxi R744. Se utilizaron elementos SOLID 187, en la interfaz refuerzo – matriz del modelo se establecieron condiciones de contacto tipo “bonded”. La convergencia de los resultados numéricos fue evaluada con los valores de los esfuerzos obtenidos. Para cada modelo analizado se calcularon las diferencias porcentuales de los resultados numéricos con el modelo inmediatamente anterior y se asumió que la malla estaba en convergencia si dicha diferencia era menor al 5% [2]. Se analizó el modelo como un problema clásico de elasticidad lineal.



*Figura 6.* Modelo del material compuesto.

**3.4.3 Condiciones de contorno.** Para los modelos expuestos a cargas de tracción se postularon las correspondientes condiciones de desplazamiento en los extremos del modelo de la probeta del compuesto, donde inician las regiones de agarre de las mordazas de la máquina de ensayos. En la figura 8 se muestran las condiciones de contorno aplicadas al modelo. Al plano izquierdo del modelo se le restringen los desplazamientos con un soporte fijo y en el plano derecho se insertó una fuerza de tensión alineada a la dirección longitudinal de las fibras. Las condiciones de contorno para los modelos expuestos a cargas de flexión se muestran en la Figura 9. Se establecieron restricciones de desplazamientos tipo “remote displacement” en las aristas inferiores del plano frontal y posterior y se le puso una carga a lo largo de la mitad del plano superior. Las cargas en los modelos se aplicaron en 5 pasos de un segundo.

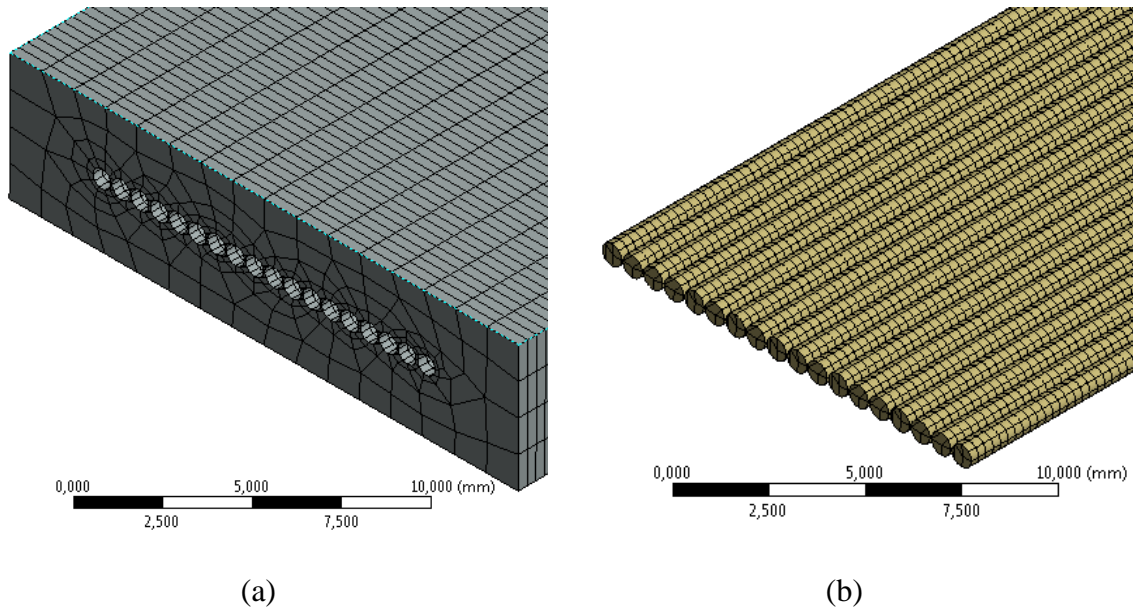


Figura 7. Mallado del compuesto. (a) Mallado de la matriz. (b) Mallado del refuerzo.

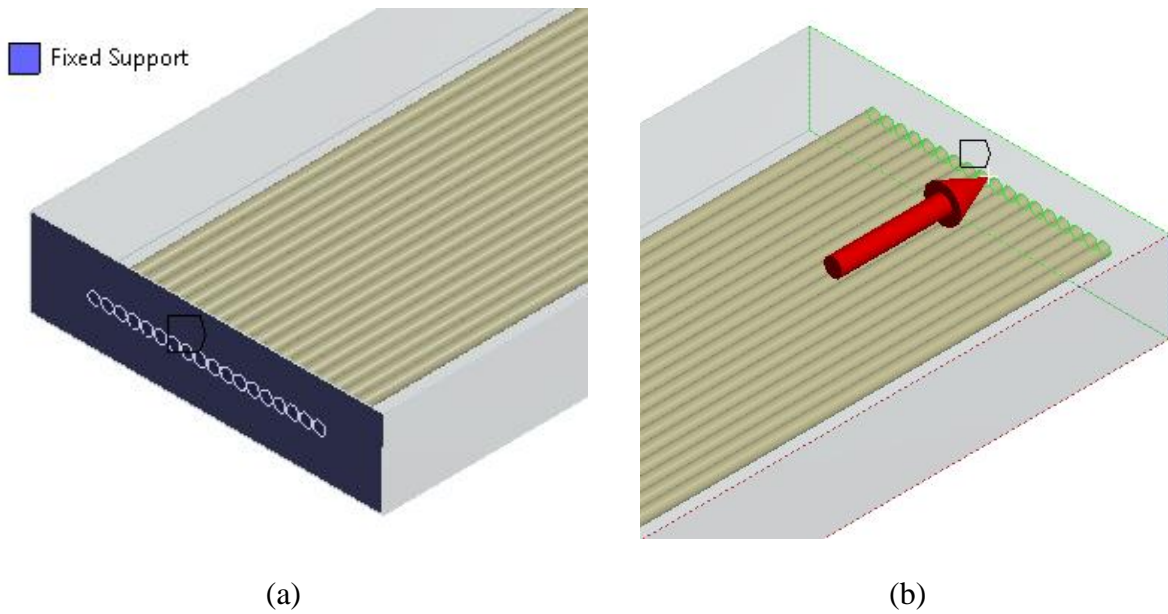


Figura 8. Condiciones de contorno para el modelo expuesto a cargas de tracción. (a) Soporte fijo. (b) Carga de tracción.

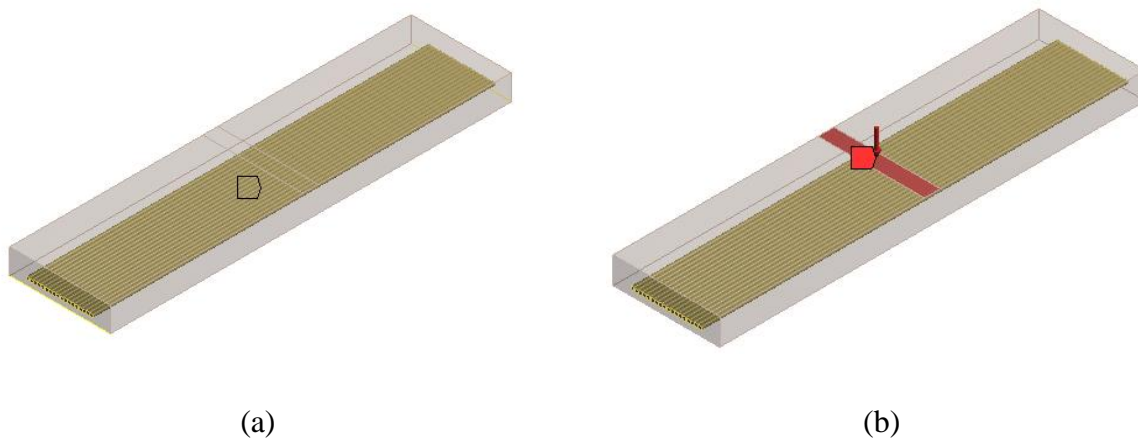


Figura 9. Condiciones de contorno para el modelo expuesto a cargas de flexión. (a) Soportes fijos en el plano inferior del modelo. (b) Carga de flexión.

#### 4. Resultados

Los resultados experimentales que se muestran en esta sección se obtuvieron luego de procesar los datos de todos los ensayos que se realizaron. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de tensión realizados en los haces de fibras de caña de azúcar. Como se puede observar en la Tabla 4 la mayor desviación estándar se produjo en los datos de esfuerzo máximo, también se puede apreciar que los coeficientes de variación de los tres resultados obtenidos del experimento son menores al 25%, lo cual permite decir que los datos obtenidos varían poco.

Tabla 3

*Resultados promedios de los ensayos de tensión de las fibras de caña de azúcar.*

	<b>Diámetro (mm)</b>	<b><math>\sigma_{\max}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_1</math> (GPa)</b>	<b><math>\epsilon</math> (%)</b>
Resultados promedios	0,7250	264.3340	14.5242	2.3439

Tabla 4.

*Resultados estadísticos de los ensayos de tensión de las fibras de caña de azúcar.*

	<b>Desviación estándar</b>	<b>Coficiente de varianza (%)</b>
$\sigma_{\max}$	15.027	5.685
$E_1$	2.131	14.673
$\epsilon$	0.439	18.728

Los resultados de los ensayos de tensión para los cuatro tipos de probeta se muestran en la Tabla 5. En esta, se observa que el esfuerzo máximo a tensión y el módulo de Young aumentan en función del porcentaje de fracción volumétrica de fibra en el compuesto. También se puede observar que la deformación del material disminuye en función del porcentaje de fracción volumétrica de fibra. En la Figura 10 se puede ver el comportamiento de cada tipo de probeta en los ensayos de tensión.

Tabla 5.

*Resultados promedios de los ensayos de tensión.*

<b>Tipo de probeta</b>	<b><math>\sigma_{\max}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_1</math> (GPa)</b>	<b><math>\epsilon</math> (%)</b>
Probeta RE	21.4205	0.8594	6.5354
Probeta MC1	23.1282	1.1468	2.8347
Probeta MC2	28.3818	1.3134	2.6068
Probeta MC3	35.8634	1.6535	2.4163

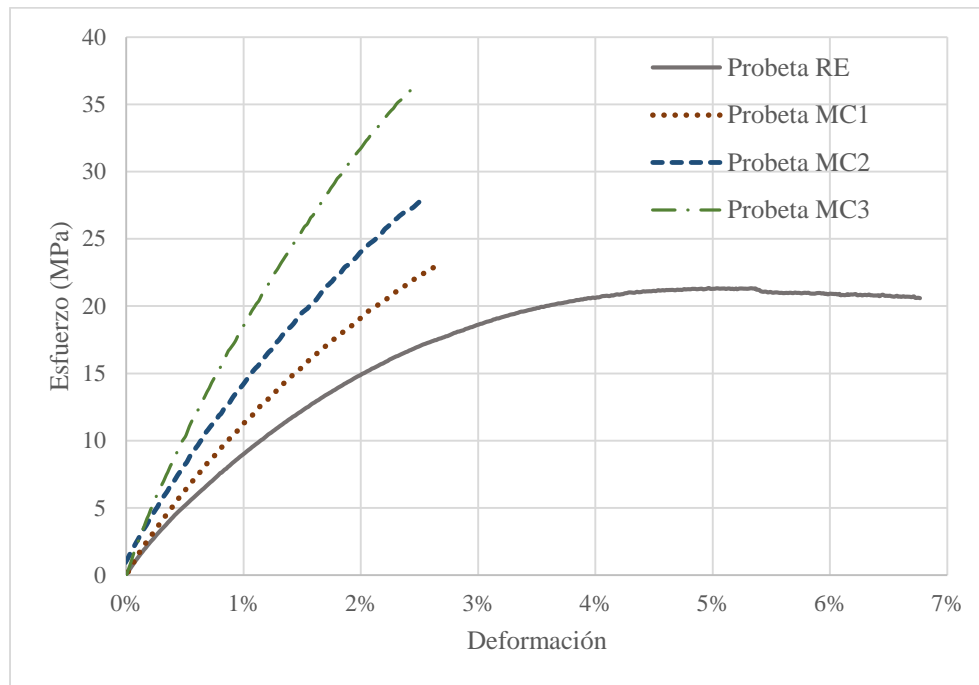


Figura 10. Comportamiento de cada tipo de probeta en los ensayos de tensión.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza, hecho para los resultados obtenidos de en los ensayos de tracción, realizado con un nivel de confianza del 95%, se muestran en la Tabla 6. Estos señalan que el valor  $F_0$  es mayor que el valor  $F_{crítico}$ , por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa y se concluye que por lo menos una de las medias del esfuerzo máximo de los cuatro grupos de probetas es significativamente diferente. En la Figura 11 se muestran los intervalos de confianza de las medias del esfuerzo máximo de cada grupo de probeta, en esta se puede apreciar que el valor de la media de la probeta RE está contenido dentro del intervalo de confianza de la probeta MC1 y viceversa, lo cual indica que no hay una diferencia significativa de los resultados obtenidos entre estos dos grupos. También se puede apreciar que entre las probetas de MC3 y RE se da la mayor diferencia entre las medias de los esfuerzos, esto se debe a que las probetas MC3

eran las que tenían mayor porcentaje de material de refuerzo. En el anexo A se muestran los datos obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 6.

*Resultados del análisis de varianza para los ensayos de tracción.*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedios de los cuadrados	F <sub>0</sub>	F <sub>crítico</sub>
Entre los grupos	632.16	3	210.72	16.74	3.23
Dentro de los grupos	201.31	16	12.58		
Total	833.47	19			

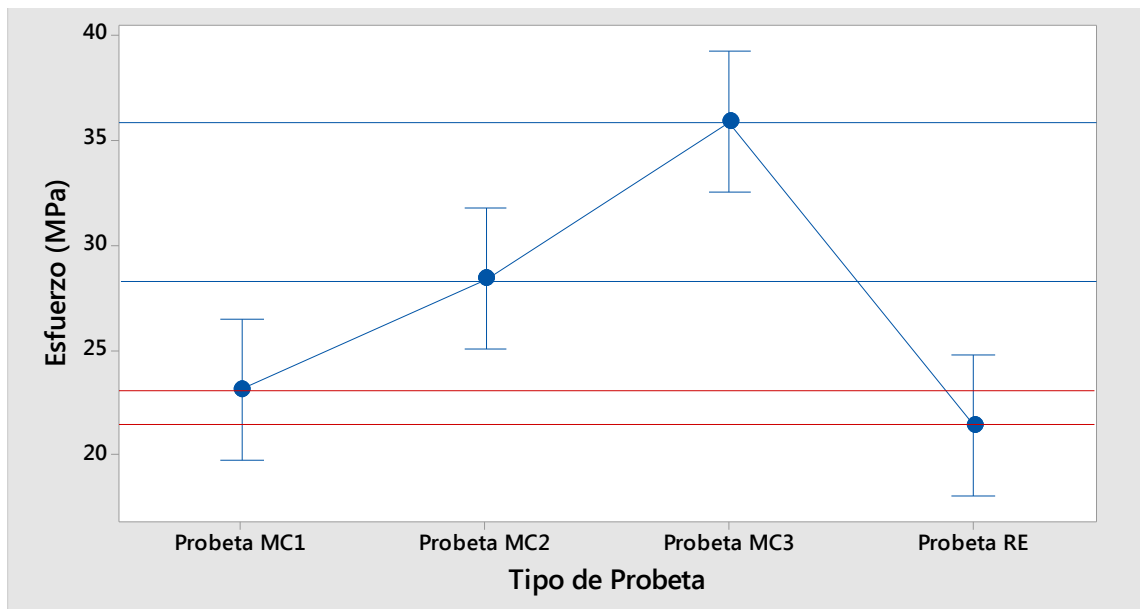


Figura 11. Intervalos de confianza para las medias de esfuerzo a tensión de cada grupo de probeta.

Por otro lado, los resultados de los ensayos de flexión para cada tipo de probeta se pueden observar en la Tabla 7. De manera similar a los resultados obtenidos en los ensayos de tensión, se observa que el esfuerzo máximo a flexión y el módulo de Young aumentan en función del porcentaje de

fracción volumétrica de fibra en el compuesto. La deformación del compuesto disminuyó conforme al incremento de la fracción volumétrica de fibra en este. En la Figura 12 se observa el comportamiento de cada tipo de probeta en los ensayos de flexión. El análisis de varianza hecho con un nivel de confianza del 95%, para los resultados de los ensayos de flexión, son mostrados en la Tabla 8. Al igual que en el caso anterior, este señala que el valor  $F_0$  es mayor que el valor  $F_{crítico}$ , por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa y se concluye que por lo menos una de las medias del esfuerzo máximo de los cuatro grupos de probetas ensayadas a flexión es significativamente diferente.

Tabla 7.

*Resultados promedios de los ensayos de flexión*

<b>Tipo de probeta</b>	<b><math>\sigma_{maxf}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_f</math> (GPa)</b>	<b><math>\epsilon</math> (%)</b>
Probeta RE	17.8741	0.5720	11.1541
Probeta MC1	22.9053	0.6296	7.2240
Probeta MC2	26.4731	0.7838	6.8100
Probeta MC3	29.7288	0.9038	6.4860

En la Figura 13 se muestran los intervalos de confianza de las medias del esfuerzo máximo a flexión de cada grupo de probeta, en esta se puede apreciar que el valor de la media de la probeta MC1 está contenido en el intervalo de confianza de la probeta MC2 y viceversa, la misma situación se presenta entre las probetas MC2 y MC3. Según lo anterior, se puede decir que entre el grupo de probetas MC1 y MC2, y entre el grupo de probetas MC2 y MC3 no hay diferencias significativas en la media de esfuerzos de flexión obtenidos. En el anexo B se muestran los datos obtenidos en los ensayos de flexión.

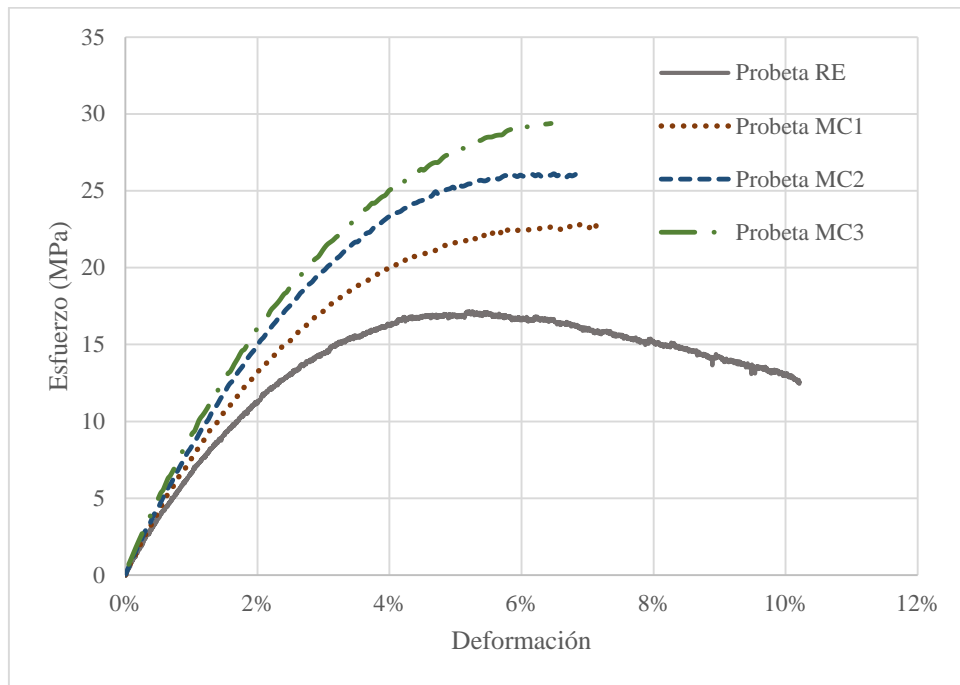


Figura 12. Comportamiento de cada tipo de probeta en los ensayos de flexión.

Tabla 8.

Resultados del análisis de varianza para los ensayos de flexión.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedios de los cuadrados	F <sub>0</sub>	F <sub>crítico</sub>
Entre los grupos	387.09	3	129.03	7.71	3.23
Dentro de los grupos	267.58	16	16.72		
Total	654.68	19			

A los modelos de elementos finitos se les aplicó la carga máxima soportada por cada grupo de probetas en los ensayos experimentales para obtener la distribución de esfuerzos del compuesto. En la Figura 14, 15, y 16 se muestran la distribución de esfuerzos de Von Mises de los modelos de las probetas MC1, MC2 y MC3, respectivamente, expuestos a cargas de tracción. Se les hizo una

sección de corte a los modelos para observar la distribución de esfuerzos dentro del material. Como se esperaba, los modelos indican que las fibras de caña de azúcar soportan la mayor parte del esfuerzo del compuesto, llegando a soportar cargas de hasta 271.34 MPa. Los máximos esfuerzos en los modelos se presentan en la interfaz refuerzo – matriz, llegando a alcanzar cargas de 397.99 MPa, lo cual permite inferir que la falla del compuesto empieza por estas zonas. Los valores de los esfuerzos en la matriz son los más bajos, este comportamiento se presenta en todos los modelos analizados.

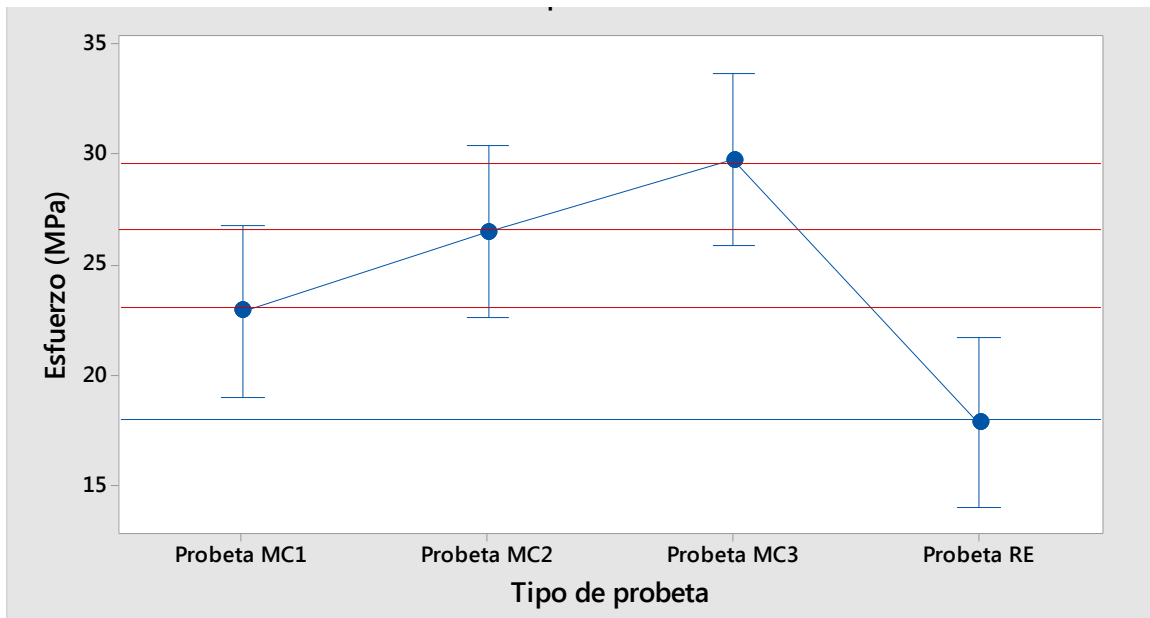


Figura 13. Intervalos de confianza para las medias de esfuerzo a flexión de cada grupo de probeta.

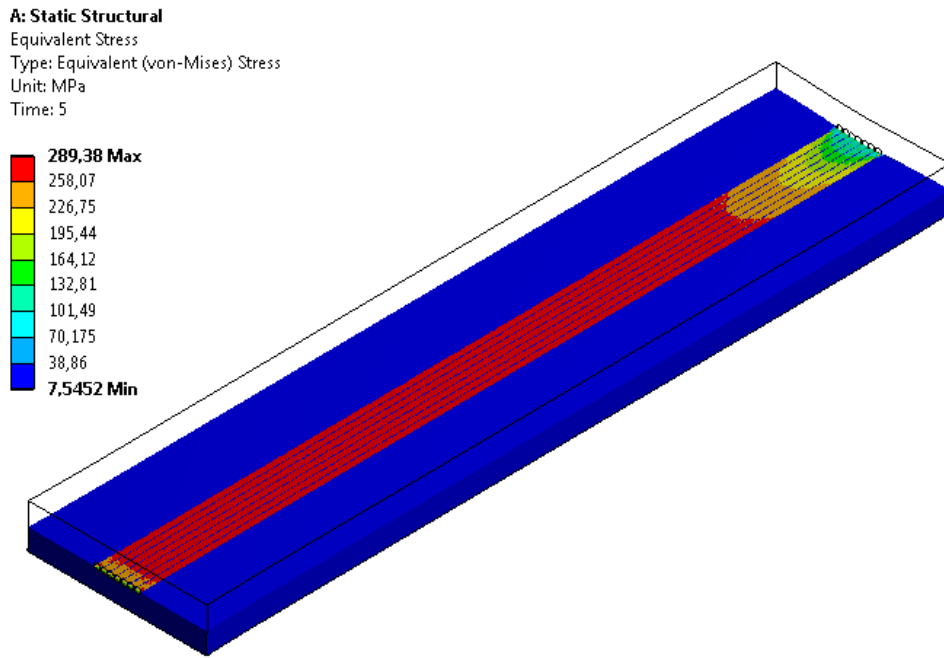


Figura 14. Distribución de esfuerzos de Von Mises a tracción del modelo de la probeta MC1.

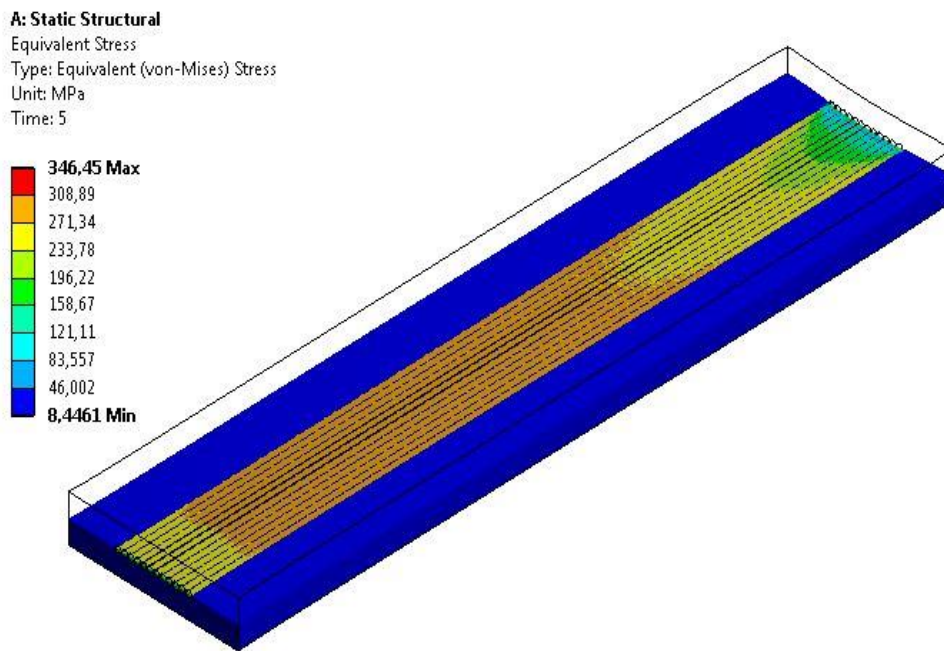


Figura 15. Distribución de esfuerzos de Von Mises a tracción del modelo de la probeta MC2.

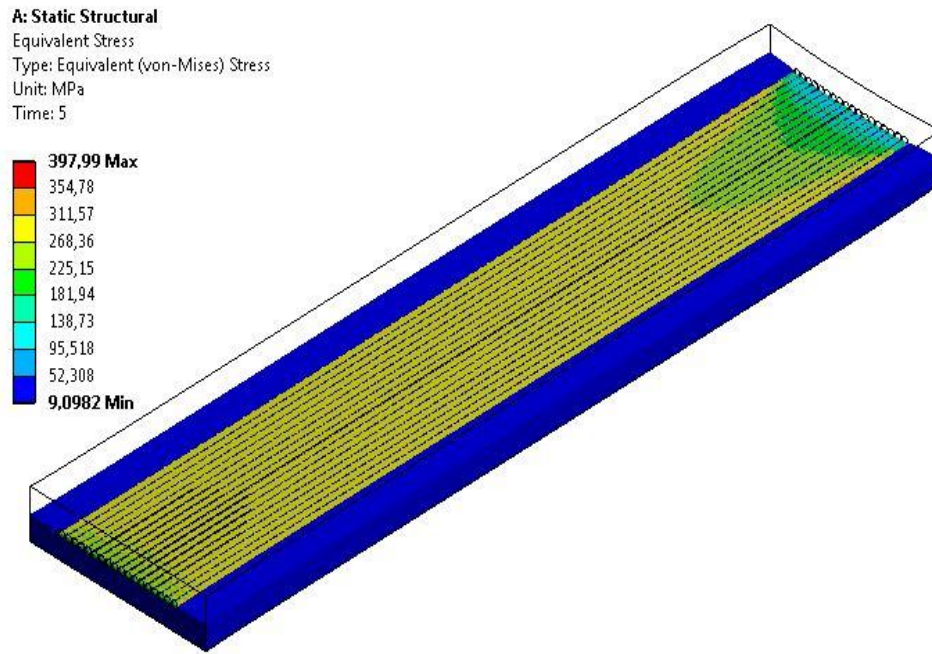


Figura 16. Distribución de esfuerzos de Von Mises a tracción del modelo de la probeta MC3.

Se calculó el módulo de Young del compuesto mediante los valores de las cargas introducidas a los modelos y las deformaciones obtenidas en estos mediante la siguiente ecuación:

$$E_1 = \frac{PL}{A \delta} \tag{1}$$

Donde  $P$  es la carga aplicada,  $L$  la longitud inicial,  $A$  es el área de sección transversal y  $\delta$  es la deformación del modelo. Los resultados de las deformaciones de los modelos se encuentran en el anexo C. En la Tabla 8 se muestran los módulos de elasticidad obtenidos mediante los análisis de elementos finitos y mediante los resultados experimentales de cada tipo de probeta, también se muestra el porcentaje de diferencia entre estos valores.

Tabla 9.

*Módulos de elasticidad a tracción experimental y numérico.*

<b>Tipo de probeta</b>	<b>E<sub>1</sub> Exp (GPa)</b>	<b>E<sub>1</sub> FEA (GPa)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Probeta MC1	1.1468	1.1129	2.95
Probeta MC2	1.3134	1.3540	2.99
Probeta MC3	1.6535	1.6111	2.56

También se comparó el módulo de elasticidad obtenido experimentalmente con el módulo de elasticidad obtenido de la relación de mezclas para materiales compuestos, este se calculó con la siguiente ecuación:

$$E_{teórico} = X_f E_f + X_m E_m \tag{2}$$

En la Tabla 10 se muestran los resultados del módulo de elasticidad obtenidos mediante la relación de mezclas y el porcentaje de error al compararlo con el obtenido experimentalmente:

Tabla 10.

*Módulos de elasticidad a tracción experimental y teórico.*

<b>Tipo de probeta</b>	<b>E<sub>1</sub> Exp (GPa)</b>	<b>E<sub>1</sub> teórico (GPa)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Probeta MC1	1.1468	1.1321	1.28
Probeta MC2	1.3134	1.3372	1.77
Probeta MC3	1.6535	1.5428	6.69

En la Figura 17, 18, y 19 se muestran la distribución de esfuerzos de Von Mises de los modelos de las probetas MC1, MC2 y MC3, respectivamente, expuestos a cargas de flexión. Se les hizo una sección de corte a los modelos para observar la distribución de esfuerzos dentro del material. Se puede observar que las fibras de caña de azúcar soportan cargas de hasta 163.56 MPa. La zona

donde es aplicada la carga y las zonas ubicadas bajo esta son las que más esfuerzos soportan en la matriz del compuesto

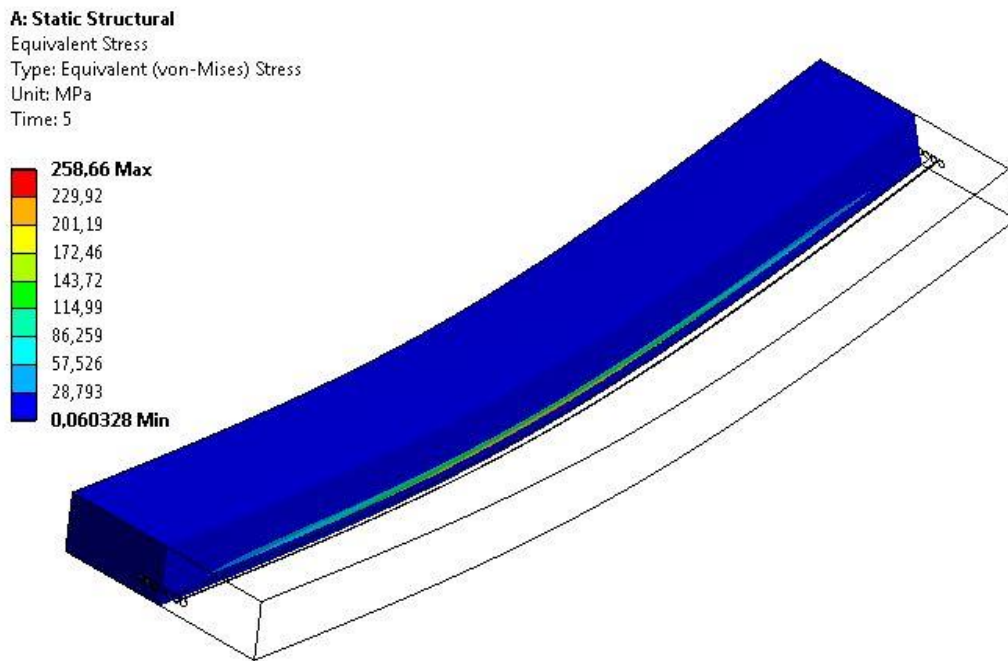


Figura 17. Distribución de esfuerzos de Von Mises a flexión del modelo de la probeta MC1.

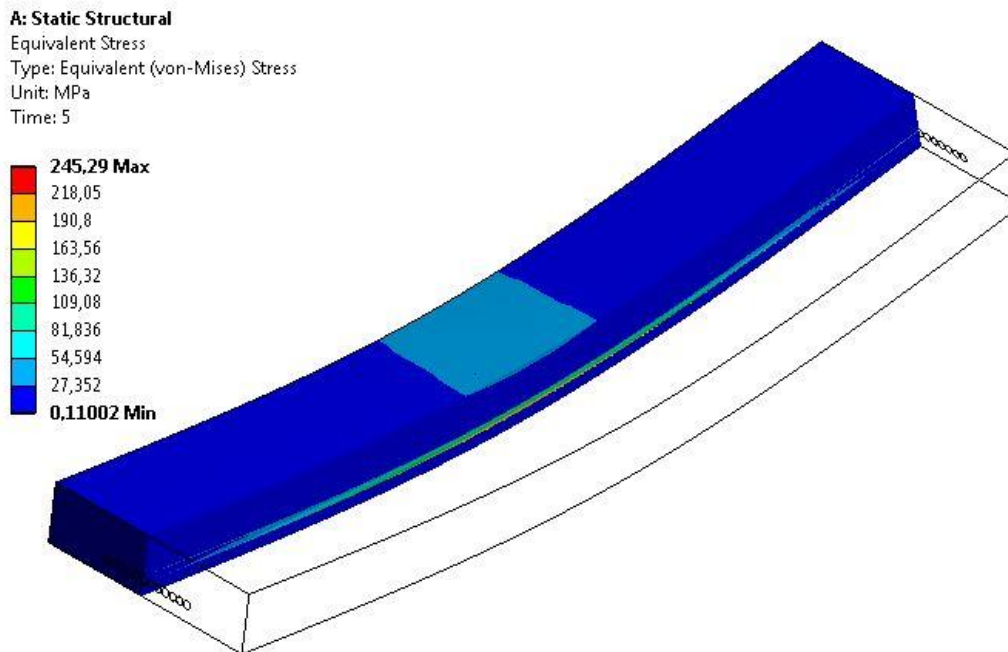


Figura 18. Distribución de esfuerzos de Von Mises a flexión del modelo de la probeta MC2.

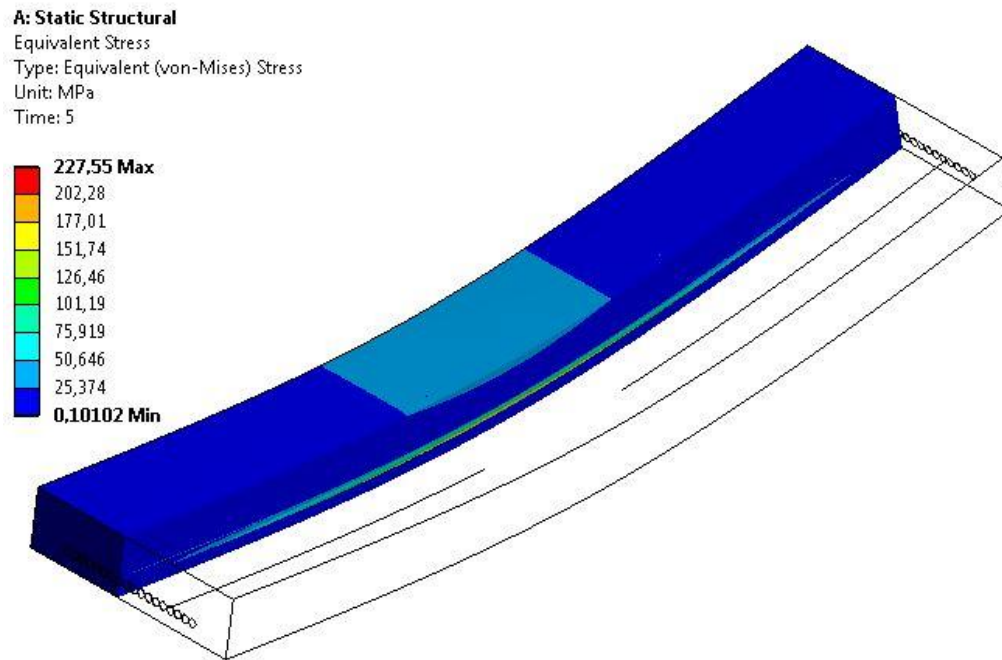


Figura 19. Distribución de esfuerzos de Von Mises s flexión del modelo de la probeta MC3

Se calculó el módulo de Young del compuesto mediante los valores de las cargas introducidas a los modelos y las deformaciones obtenidas en estos mediante la siguiente ecuación:

$$E_f = \frac{L^3 P}{4wh^3 \delta} \quad (3)$$

Donde  $P$  es la carga aplicada,  $L$  la longitud inicial,  $w$  es la anchura,  $h$  es el espesor y  $\delta$  la deformación del modelo. Los resultados de las deformaciones de los modelos se encuentran en el anexo D. En la Tabla 11 se muestran los módulos de elasticidad obtenido mediante el análisis de elementos finitos y mediante los resultados experimentales de cada tipo de probeta, también se muestra el porcentaje de diferencia entre estos valores.

Tabla 11.

*Módulos de elasticidad a flexión experimental y numérico.*

<b>Tipo de probeta</b>	<b>E<sub>f Exp</sub> (GPa)</b>	<b>E<sub>f FEA</sub> (GPa)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Probeta MC1	0.6296	0.7104	11,37
Probeta MC2	0.7838	0.7567	3.45
Probeta MC3	0.9038	0.7951	14.57

También se comparó el módulo de elasticidad obtenido experimentalmente con el módulo de elasticidad obtenido de la relación de mezclas para materiales compuestos, este se calculó con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{E_{Fteórico}} = \frac{X_f}{E_f} + \frac{X_m}{E_m} \tag{4}$$

En la Tabla 12 se muestran los resultados del módulo de elasticidad obtenidos mediante la relación de mezclas y el porcentaje de error al compararlo con el obtenido experimentalmente:

Tabla 12.

*Módulos de elasticidad a flexión experimental y teórico.*

<b>Tipo de probeta</b>	<b>E<sub>1 Exp</sub> (GPa)</b>	<b>E<sub>F teórico</sub> (GPa)</b>	<b>Diferencia (%)</b>
Probeta MC1	0.6296	0.7512	16.18
Probeta MC2	0.7838	0.8884	11.82
Probeta MC3	0.9038	0.9015	0.22

Con el fin de obtener resultados confiables mediante el análisis de elementos finitos, se desarrolló un proceso de convergencia de los resultados de esfuerzos máximos, por medio del refinamiento de la malla de los modelos estudiados. Se asumió que la malla estaba en convergencia si la

diferencia entre resultados era menor al 5%. Los resultados del proceso de convergencia se muestran en las Tablas 13 y 14. Los resultados de los esfuerzos máximos del proceso de convergencia se encuentran en el anexo E.

Tabla 13.

*Resultados del proceso de convergencia para los esfuerzos de tracción.*

<b>Convergencia del modelo de la probeta MC1 expuesto a cargas de tracción</b>		
Elementos	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Diferencia (%)
30867	289.38	
33388	320.07	9.58
36578	317.87	0.68
<b>Convergencia del modelo de la probeta MC2 expuesto a cargas de tracción</b>		
Elementos	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Diferencia (%)
44064	495.14	
45844	385.11	22.22
48172	337.31	12.41
51073	346.45	2.63
<b>Convergencia del modelo de la probeta MC3 expuesto a cargas de tracción</b>		
Elementos	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Diferencia (%)
65376	560.22	
66321	517.32	7.65
68116	418.89	19.02
71098	397.99	4.98

Tabla 14.

*Resultados del proceso de convergencia para los esfuerzos de flexión.*

<b>Convergencia del modelo de la probeta MC1 expuesto a cargas de flexión</b>		
Elementos	$\sigma_{\max f}$ (MPa)	Diferencia (%)
32144	270.27	
38709	253.27	6.29
44354	258.66	2.08

<b>Convergencia del modelo de la probeta MC2 expuesto a cargas de flexión</b>		
Elementos	$\sigma_{\max f}$ (MPa)	Diferencia (%)
40158	244.91	
43576	245.29	0.15

<b>Convergencia del modelo de la probeta MC3 expuesto a cargas de flexión</b>		
Elementos	$\sigma_{\max f}$ (MPa)	Diferencia (%)
62811	229.92	
64106	227.55	1.03

## 5. Conclusiones

Se extrajeron fibras del bagazo de la caña de azúcar y se les realizó ensayos de tracción bajo la norma ASTM 3822. Posteriormente se construyeron probetas de resina epoxi y tres tipos de probetas de un material compuesto por una matriz de resina epoxi R744 reforzado con fibras de caña de azúcar. Estas probetas se ensayaron con cargas de tracción y flexión según las normas ASTM 3039 y 7264 respectivamente. De estos ensayos se obtuvieron los módulos de elasticidad y esfuerzos máximos. De los resultados obtenidos se puede indicar que hay un aumento significativo en las propiedades de tracción, dado que en las muestras de solo resina, probetas RE, se obtuvieron valores de 0.8594 GPa para el módulo de elasticidad y 21.410 MPa para el esfuerzo máximo, mientras que en el material compuesto con el 5% de fracción volumétrica de fibra, probeta MC3, se obtuvieron valores de 1.6535 GPa para el módulo de elasticidad y 35.863 MPa para el esfuerzo máximo. Lo anterior equivale a un aumento del 48% en el valor del módulo de elasticidad y del 40% en el valor del esfuerzo máximo. Para las muestras de solo resina en los ensayos de flexión, se obtuvo un valor para el módulo de elasticidad de 0.572 GPa y 17.874 MPa para el esfuerzo máximo. Comparando esos valores con los obtenidos por las probetas MC3, 0.9038 GPa y 29.728 MPa para el esfuerzo máximo, se aprecia que aumento el valor del módulo de elasticidad de flexión en un 36% y para el esfuerzo máximo aumento un 39%. Comparando los porcentajes de mejora, se puede decir que las fibras de caña de azúcar tienen mejor desempeño bajo cargas de tracción. Se crearon modelos de las probetas fabricadas y se analizaron mediante elementos finitos, se obtuvieron los esfuerzos equivalentes de Von Mises, los cuales indicaron que

---

en las probetas sometidas a cargas de tracción, las fibras soportan mayores esfuerzos que la matriz de resina epoxi. En el modelo de la probeta MC3 las fibras soportan un 49.72% de la carga de tracción. Se calcularon los módulos de elasticidad de tensión de cada modelo y se compararon con los valores obtenidos experimentalmente, se observó que la diferencia entre estos dos valores es menor del 4%, esto indica que los resultados de las propiedades de tracción obtenidos son confiables. Por otro lado, los módulos de elasticidad de flexión encontrados experimentalmente y numéricamente, presentan una diferencia mayor al 5%. Esto pudo ocurrir debido a que las condiciones de contorno establecidas en los modelos expuestos a cargas de flexión no se asemejaban a las de los ensayos experimentales. Se debe tener en cuenta que en el modelo se utilizó la condición de adhesión entre las fibras y la resina epoxi, la cual restringe los desplazamientos en la interfaz refuerzo – matriz, lo cual, no se da completamente en la manufactura de materiales compuesto, por lo tanto, puede que en ensayos experimentales el comportamiento del compuesto en estas zonas sea diferente. Mediante el análisis de varianza realizado, se corrobora que el compuesto tiene un mejor desempeño bajo cargas de tracción, ya que entre los grupos de probetas MC1, MC2 y MC3 se presentaron diferencias significativas en los valores promedios de esfuerzos máximos de tracción, mientras que en los valores promedios de esfuerzos máximos de flexión no hubo diferencias significativas entre el grupo de probetas MC1 y MC2, al igual que entre el grupo de probetas MC2 y MC3. Se observó que el tratamiento de convergencia de los resultados de esfuerzos obtenidos numéricamente mejora la precisión de estos, lo cual permite lograr resultados más confiables mediante el análisis de elementos finitos. Por último, se concluye que el material compuesto estudiado presenta un buen comportamiento bajo cargas de tracción, por lo tanto puede sustituir elementos estructurales que soporten cargas estáticas inferiores a las cargas máximas encontradas en los ensayos.

## 6. Recomendaciones

Se sugiere realizar modelos de comprobación microscópica para verificar la unión total entre fibras de caña de azúcar y la matriz epoxi, antes de las pruebas y al final para descartar modelos de falla como delaminación que independizan el comportamiento de los dos materiales y expone a falla el elemento más débil.

### Referencias Bibliográficas

- [1] Baran I, Cinar K, Ersoy N, Akkerman R and Hattel J H 2017 A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes Arch. Comput. Methods Eng. 24 365–95.
- [2] Bohórquez O, Ardila Parra S A, Pertuz A and González-Estrada O A 2018 Finite Element Analysis for Palm Oil Bunches Press Shaft Fractured in Service Key Eng. Mater. 774 191–6.
- [3] Hofsetz K and Silva M A 2012 Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption Biomass and Bioenergy 46 564–73.
- [4] Iznaga-Benítez A M and Braunbeck-García O A 2011 Comportamiento físico-mecánico de un biomaterial sometido a bajas cargas Ing. Mecánica 14 65–73.
- [5] Jústiz-Smith N G, Virgo G J and Buchanan V E 2008 Potential of Jamaican banana, coconut coir and bagasse fibres as composite materials Mater. Charact. 59 1273–8.
- [6] Lee S C and Mariatti M 2008 The effect of bagasse fibers obtained (from rind and pith component) on the properties of unsaturated polyester composites Mater. Lett. 62 2253–6.
- [7] Leite JL, Pires ATN, De Souza SMAGU, De Souza AAU. Characterisation of a phenolic

- 
- resin and sugar cane pulp composite. In: Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2004.
- [8] Lomov S V, Bernal E, Ivanov DS, Kondratiev S V, Verpoest I. 2005. Homogenisation of a sheared unit cell of textile composites FEA and approximate inclusion model. Rev Eur des éléments finis. Int. J. Solids Struct. 14 1450–18.
- [9] Martínez E, González-Estrada O A and Martínez A 2017 Evaluación de las propiedades tribológicas de materiales compuestos de matriz metálica ( MMCs ) procesados por técnicas de fabricación aditiva con haz láser ( SLM ) Rev. UIS Ing. 16 101–14.
- [10] Mikell P. Groover 2014 Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems (Hoboken, NJ: Wiley).
- [11] Mohan P 2013 A Critical Review: The Modification, Properties, and Applications of Epoxy Resins Polym. - Plast. Technol. Eng. 52 107–25.
- [12] Ounas A, Aboulkas A, El harfi K, Bacaoui A and Yaacoubi A 2011 Pyrolysis of olive residue and sugar cane bagasse: Non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis Bioresour. Technol. 102 11234–8.
- [13] Ratna D 2006 Handbook of Thermoset Resins (Akron: iSmithers).
- [14] Samariha A, Bastani A, Nemati M, Kiaei M, Nosrati H and Farsi M 2013 Investigation of

- 
- the mechanical properties of bagasse flour/polypropylene composites *Mech. Compos. Mater.* 49 447–54.
- [15] Stael G C, Tavares M I B and D’Almeida J R M 2002 Evaluation of sugar cane bagasse waste as reinforcement in eva matrix composite materials *Polym. Plast. Technol. Eng.* 40 217–23.
- [16] Teixeira R S, Tonoli G H D, Santos S F, Fiorelli J, Savastano H and Lahr F A R 2012 Extruded Cement Based Composites Reinforced with Sugar Cane Bagasse Fibres *Key Eng. Mater.* 517 450–7.
- [17] Xia Z, Zhang Y and Ellyin F 2003 A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications *Int. J. Solids Struct.* 40 1907–21.
- [18] Xia Z, Zhou C, Yong Q and Wang X 2006 On selection of repeated unit cell model and application of unified periodic boundary conditions in micro-mechanical analysis of composites *Int. J. Solids Struct.* 43 266–78.
- [19] Xu Q, Ji T, Gao S-J, Yang Z and Wu N 2018 Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials *Materials (Basel)*. 12 39.
- [20] Zienkiewicz OC, Zhu JZ. A simple error estimator and adaptive procedure for practical engineering analysis. *Int J Numer Methods Eng.* 198.

Anexos

Anexo A. Resultados análisis de varianza a esfuerzos de tensión.

Tipo de probeta	Observaciones ( $\sigma_{max}$ )					Suma	Promedio	n
Probeta RE	21.3518	21.8842	24.2487	15.364	24.254	107.1027	21.4205	5
Probeta CM1	23.0996	25.9244	22.0871	15.168	29.362	115.6411	23.1282	5
Probeta CM2	28.0390	26.9870	27.3670	30.159	29.357	141.9090	28.3818	5
Probeta CM3	31.4329	35.4171	36.2569	38.215	37.995	179.3170	35.8634	5

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Probeta RE	5	107.1027	21.4205	13.2321
Probeta CM1	5	115.6411	23.1282	27.7821
Probeta CM2	5	141.9090	28.3818	1.8006
Probeta CM3	5	179.3170	35.8634	7.5142

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	632.1640	3	210.7213	16.7475	0.0000	3.2389
Dentro de los grupos	201.3157	16	12.5822			
Total	833.4797	19				

**Anexo B. Resultados análisis de varianza a esfuerzos de flexión.**

Tipo de probeta	Observaciones ( $\sigma_{max}$ )					Suma	Promedio	n
Probeta RE	17.1622	11.5318	27.2624	22.8321	10.5822	89.3707	17.8741	5
Probeta CM1	22.8281	25.5427	22.9910	19.2680	23.8969	114.5267	22.9053	5
Probeta CM2	26.9423	26.1111	27.6576	27.7021	23.9523	132.3654	26.4731	5
Probeta CM3	29.3739	34.5285	28.7706	27.9586	28.0124	148.6440	29.7288	5

**Análisis de varianza de un factor**

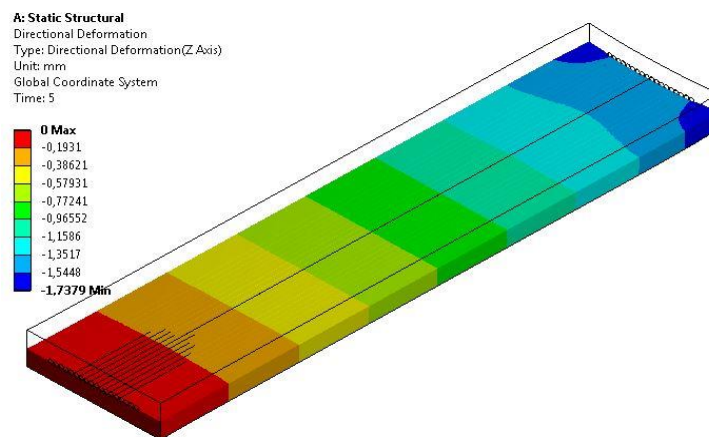
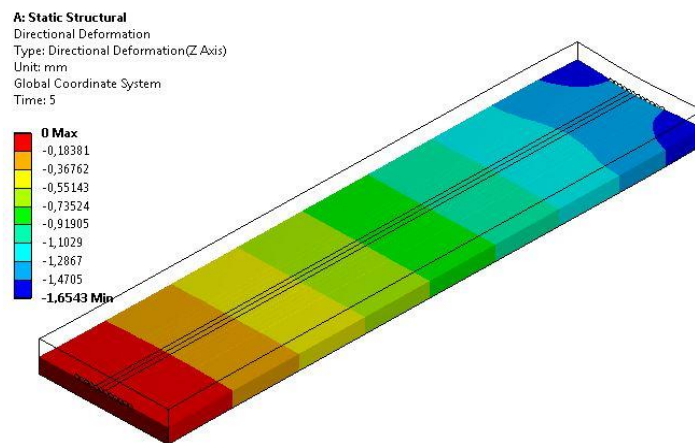
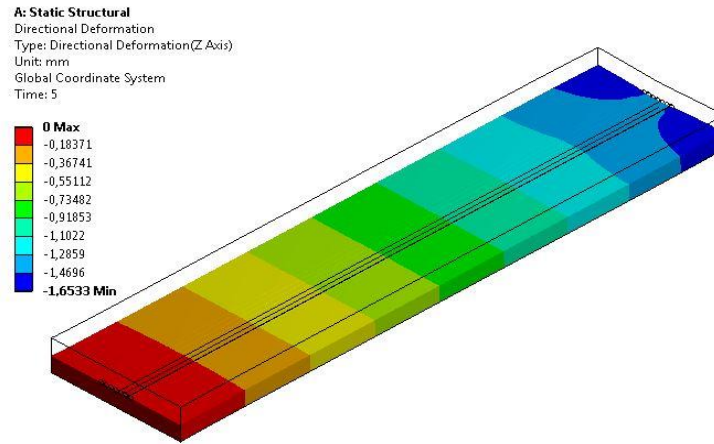
RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Probeta RE	5	89.3707	17.8741	51.6563
Probeta CM1	5	114.5267	22.9053	5.2956
Probeta CM2	5	132.3654	26.4731	2.4048
Probeta CM3	5	148.6440	29.7288	7.5402

ANÁLISIS DE VARIANZA

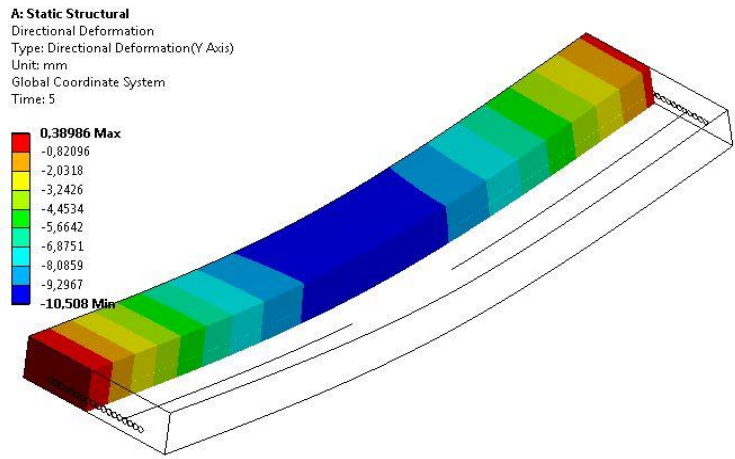
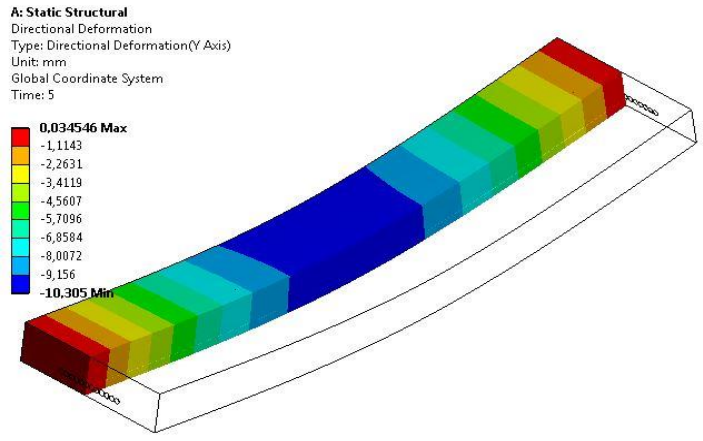
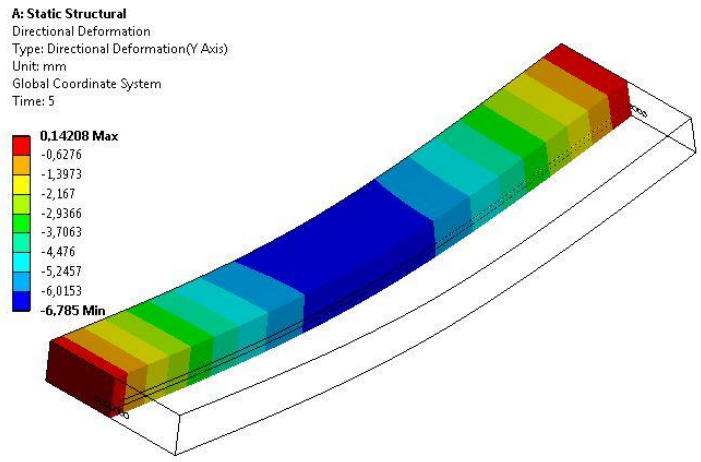
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	387.0947	3	129.0316	7.7152	0.0021	3.2389
Dentro de los grupos	267.5877	16	16.7242			
Total	654.6824	19				

Anexo C. Elongación bajo cargas de tensión.



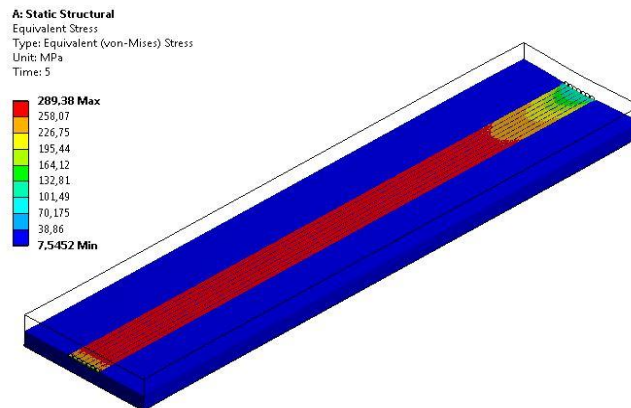
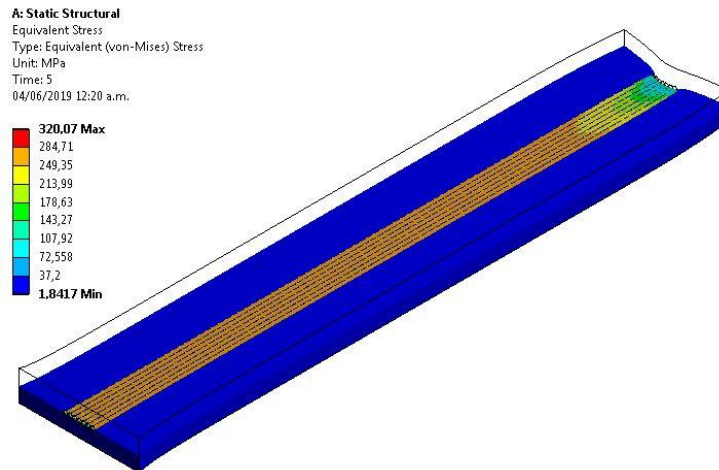
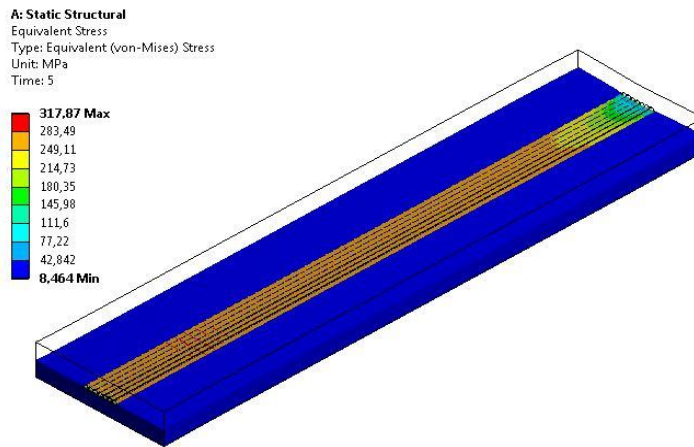
Elongación de las probetas MC1, MC2, MC3 sometidas a cargas de tracción.

**Anexo D. Elongación bajo cargas de flexión.**

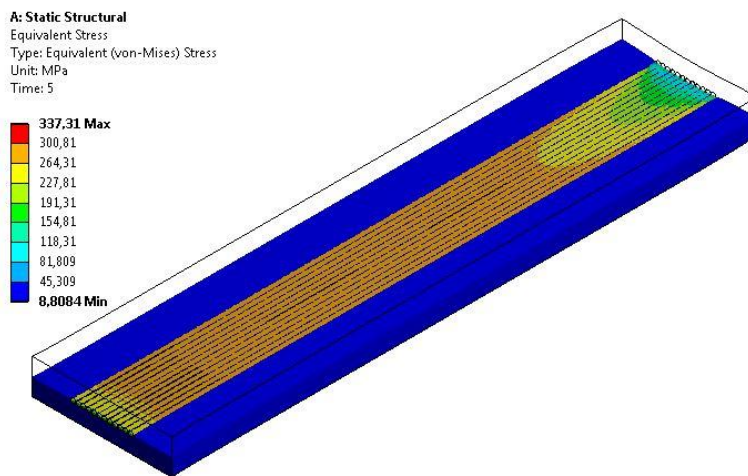
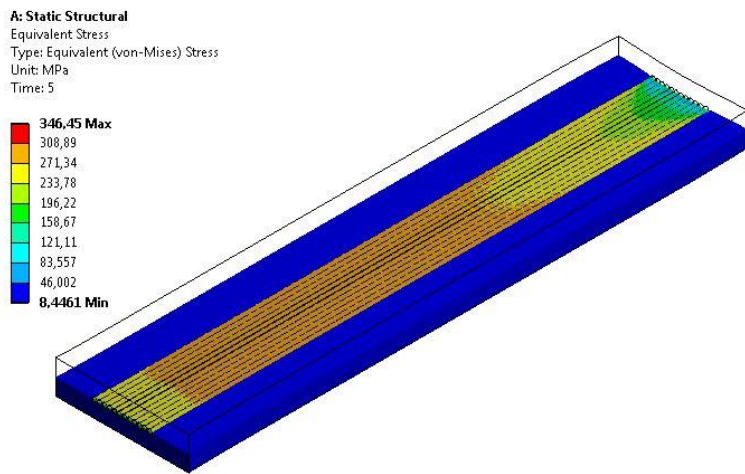
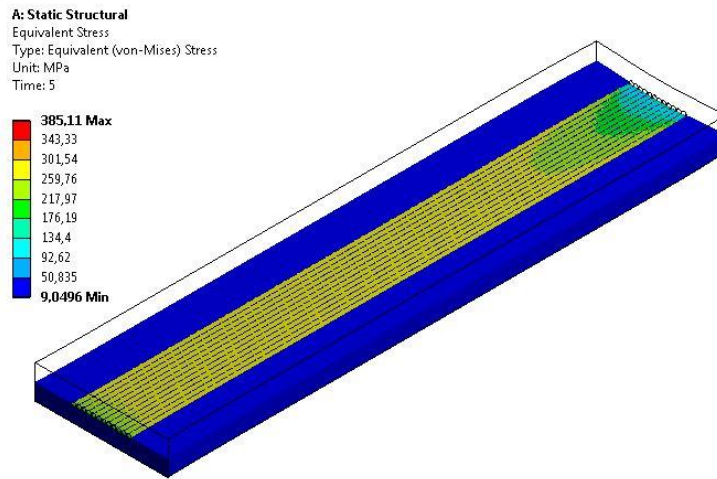


Elongación de las probetas MC1, MC2, MC3 sometidas a cargas de flexión.

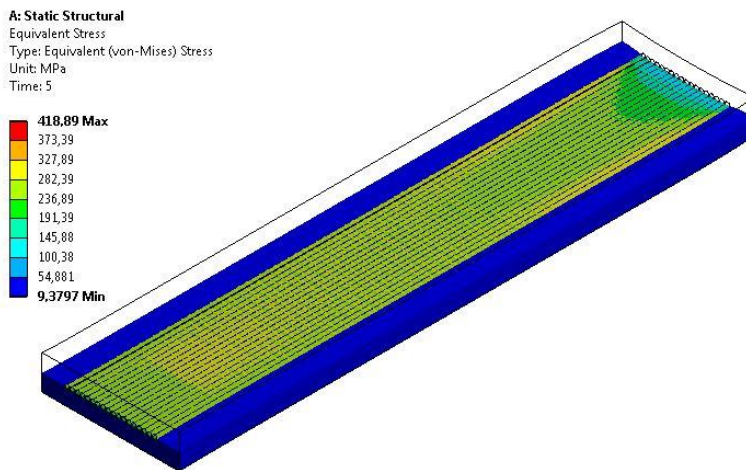
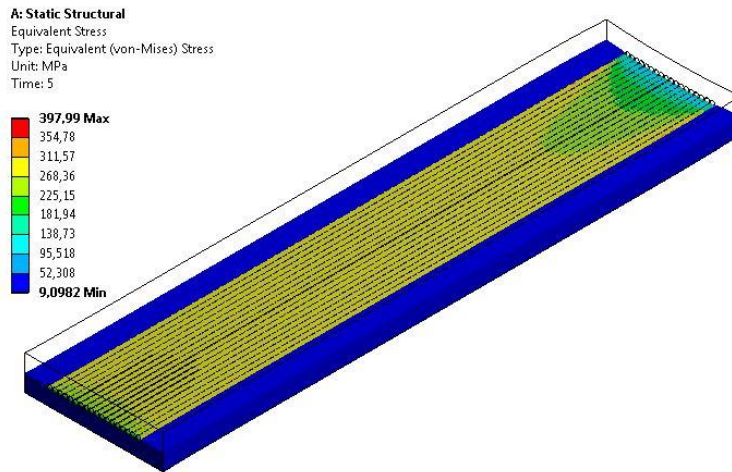
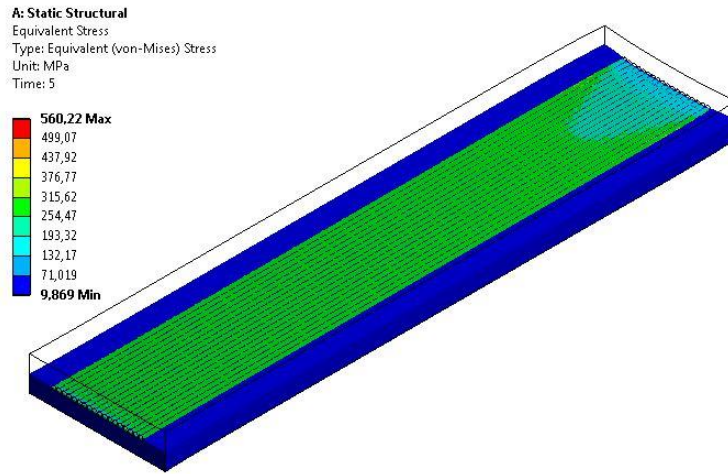
**Anexo E. Resultados del proceso de convergencia.**



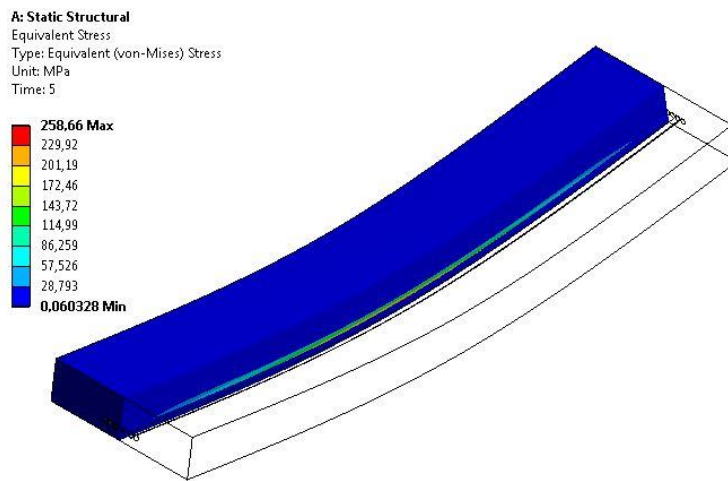
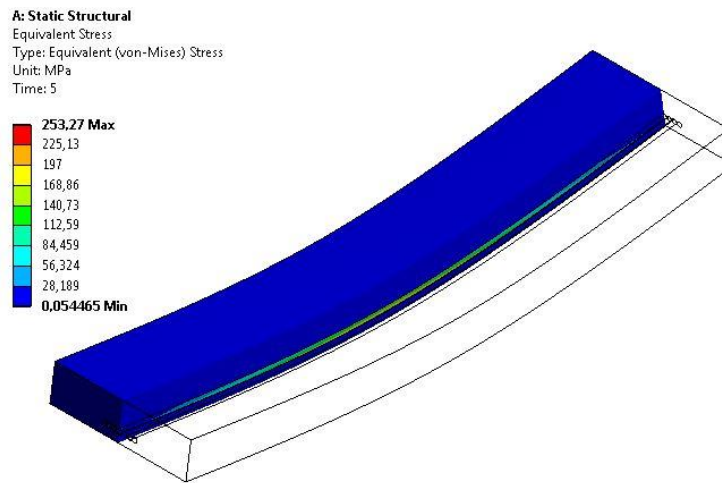
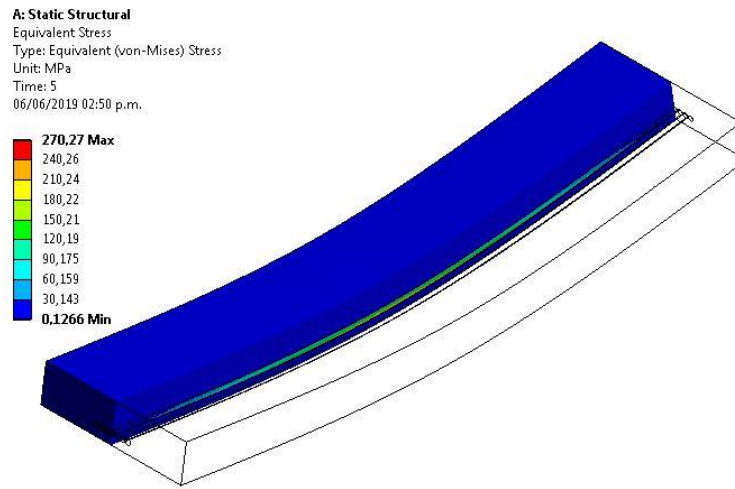
Convergencia del modelo de la probeta MC1 expuesto a cargas de tracción.



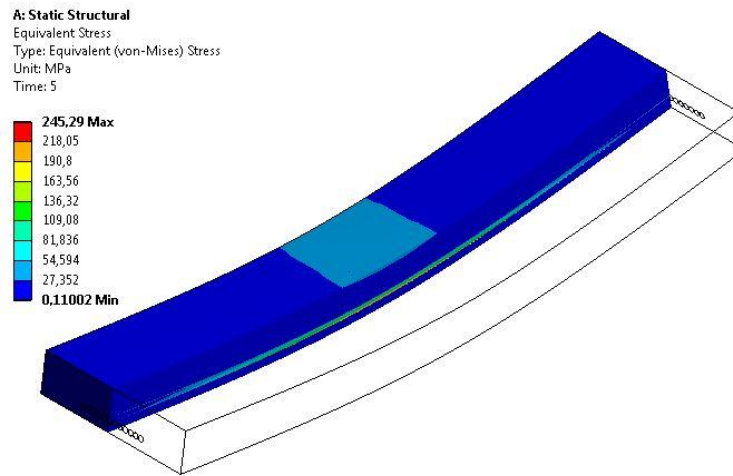
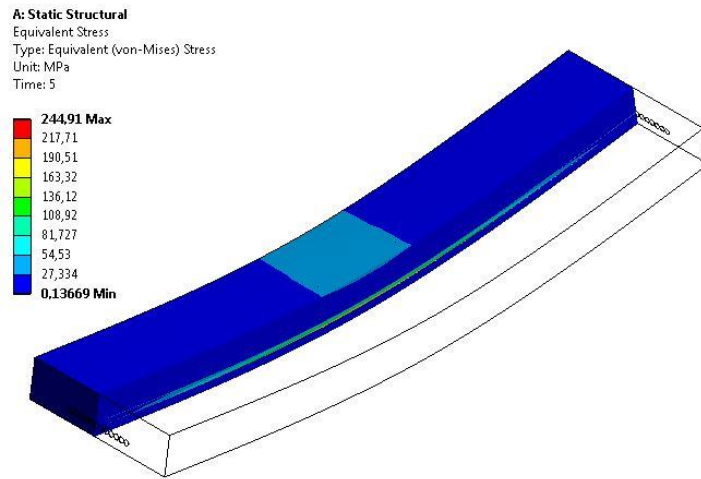
Convergencia del modelo de la probeta MC2 expuesto a cargas de tracción.



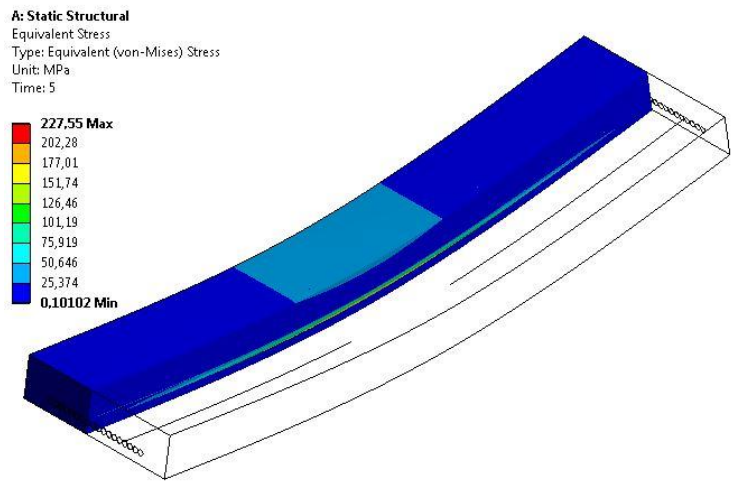
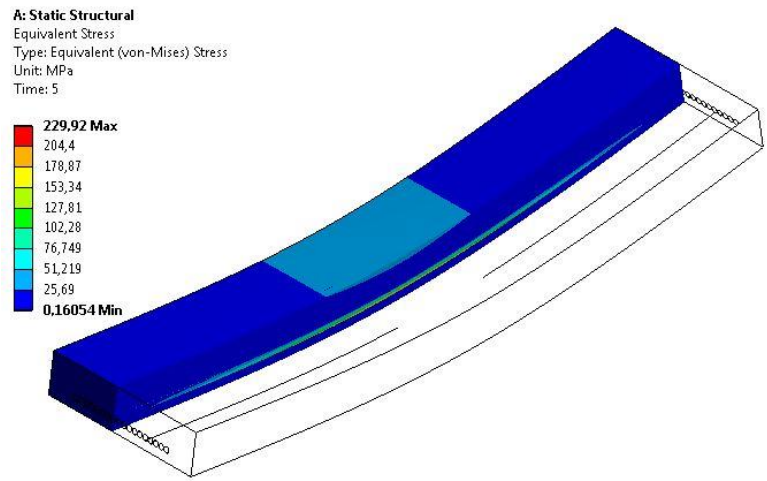
Convergencia del modelo de la probeta MC3 expuesto a cargas de tracción.



Convergencia del modelo de la probeta MC1 expuesto a cargas de flexión.



Convergencia del modelo de la probeta MC2 expuesto a cargas de flexión.



Convergencia del modelo de la probeta MC3 expuesto a cargas de flexión.