

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TENSIÓN DE UN
MATERIAL COMPUESTO LAMINAR DE FIBRA DE VIDRIO DE MATRIZ
POLIMÉRICA**

ERICK FABIÁN COSTO PRECIADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TENSIÓN DE UN
MATERIAL COMPUESTO LAMINAR DE FIBRA DE VIDRIO DE MATRIZ
POLIMÉRICA**

ERICK FABIÁN COSTO PRECIADO

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

DIRECTOR

OCTAVIO ANDRÉS GONZÁLEZ ESTRADA

Ingeniero Mecánico, PhD.

CO DIRECTOR

JUAN SEBASTIÁN LEÓN BECERRA

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

A mi padre Pablo Costo y a mi madre Nydia preciado que con su esfuerzo y sacrificio hicieron que este logro fuera posible, a mi hermana Paula Juliana quien siempre tuvo una voz de aliento y por ser muchas veces mi apoyo y confidente en los momentos más difíciles.

Gracias a ustedes hoy puedo decir lo logramos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	15
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 MATERIALES COMPUESTOS	16
2.2 FIBRA	17
2.3 MATRIZ.....	19
2.4. RESINAS	22
3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS.....	24
3.1 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	24
3.2 MECÁNICA DEL DAÑO CONTINUO (CDM)	30
3.3 CRITERIO DE MÁXIMA TENSIÓN	31
3.4 CRITERIO DE MÁXIMA DEFORMACIÓN	32
3.5 ANÁLISIS DE DAÑO EN LA FIBRA	32
3.6 ANÁLISIS DE DAÑO EN LA MATRIZ	33
3.7 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL DAÑO EN FIBRA Y MATRIZ.	33
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	34
4.1 RECURSOS Y MATERIALES.....	34
4.2 DISEÑO DE LA PROBETA	35

4.3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS	36
5. RESULTADOS.....	38
5.1 FIBRAS ORIENTADAS A 0°	38
5.2 FIBRAS ORIENTADAS A 45°	40
5.3 FIBRAS ORIENTADAS A 90°	43
5.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL COMPUESTO.....	45
5.5 MODELO NUMÉRICO DEL ENSAYO EN ANSYS.....	45
6. CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFÍA.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de las características específicas de diferentes fibras.....	17
Figura 2. Comportamiento de la matriz bajo cargas de compresión y tensión.....	20
Figura 3. MTS Bionix Servohydraulic test system, modelo 370.....	25
Figura 4. Gráfica tensión - deformación para materiales compuestos.	26
Figura 5. Gráfica tension-deformacion para materiales compuestos.	27
Figura 6. Dimensiones de las probetas de ensayo a tensión	35
Figura 7. Moldes para probetas.....	37
Figura 8. Gráfica esfuerzo vs deformación para el tejido a 0°.....	39
Figura 9. Gráfica esfuerzo vs deformación para el tejido a 45°.....	41
Figura 10. Gráfica esfuerzo vs deformación para tejido a 90°.....	43
Figura 11. Orientación de fibra a 45°.....	47
Figura 12. Esfuerzo Máximo.....	48
Figura 13. Deformación.....	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de fibras	18
Tabla 2. Composiciones de diferentes vidrios usados en la fabricación de fibra. ...	19
Tabla 3. Clasificación de matrices en materiales compuestos	21
Tabla 4. Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas	23
Tabla 5. Geometría recomendada para la probeta a tensión.	35
Tabla 6. Datos del ensayo de tensión en dirección de fibra de 0°	38
Tabla 7. Propiedades mecánicas del material para fibras orientadas a 0°	39
Tabla 8. Daño en fibra y matriz en orientación de fibra de 0°	40
Tabla 9. Datos del ensayo de tensión en dirección de fibra de 45°	41
Tabla 10. Propiedades mecánicas del material para fibras orientadas a 45°	42
Tabla 11. Daño en fibra y matriz en orientación de fibra de 45°	42
Tabla 12. Datos del ensayo de tensión en dirección de fibra de 90°	43
Tabla 13. Propiedades mecánicas del material para fibras orientadas a 90°	44
Tabla 14. Daño en fibra y matriz en orientación de fibra de 90°	44
Tabla 15. Modelo del material	46

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Determinación de cantidades de masa para fibra y resina

Anexo B. Calculo del módulo de elasticidad del material compuesto para las diferentes orientaciones de fibra.

Anexo C. calculo de tenacidad y energía total disipada del material compuesto para las diferentes orientaciones de fibra.

Anexo D. Ficha técnica del fabricante de la resina epoxi.

Nota: Ver anexos en carpeta adjunta

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TENSIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO LAMINAR DE FIBRA DE VIDRIO DE MATRIZ POLIMÉRICA*

AUTOR: ERICK FABIAN COSTO PRECIADO**

PALABRAS CLAVE: Material compuesto, fibra, matriz, orientaciones de fibra, esfuerzo, deformación, fallo, ASTM D3039.

DESCRIPCIÓN:

El requerimiento de nuevas combinaciones en las propiedades mecánicas de los materiales provoca el desarrollo y el estudio de materiales compuestos como el de fibra de vidrio de matriz polimérica, en este trabajo se investiga la caracterización del material compuesto de fibra de vidrio y matriz polimérica (epoxi) para orientaciones de refuerzo en el material de 0, 45 y 90 grados, se analiza el comportamiento mecánico del material utilizando los criterios de max stress y max strain y de la mecánica del daño continuo (continuum damage mechanics) haciendo énfasis en el modelo de falla propuesto por Hashin con el fin de observar el comportamiento de daño tanto en fibra como en la matriz del material, identificando los valores de fallo. El ensayo se realiza usando la máquina de ensayos MTS Bionix Servo hydraulic test system, model 370. Además de un modelo numérico en ANSYS que pueda recrear las condiciones del material y que puede ser base de futuras simulaciones para geometrías más complejas. Se realizaron ensayos de laboratorio de acuerdo con las condiciones que estipula la norma ASTM D3039 con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas del material a tensión para las diferentes orientaciones del refuerzo en el material compuesto.

* Trabajo de grado

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: OCTAVIO ANDRÉS GONZÁLEZ ESTRADA. Ing. Mecánico.

ABSTRACT:

TITIE: MECHANICAL CHARACTERIZATION TO TENSION OF A LAMINATED COMPOSITE MATERIAL OF FIBERGLASS OF POLYMERIC MATRIX*

AUTHOR: ERICK FABIAN COSTO PRECIADO**

KEYWORDS: Composite, glass, fiber, max stress, max strain.

DESCRIPTION:

Some of the modern technologies require materials with an unusual combination of properties, impossible to achieve with metals, ceramics and conventional polymers. The requirement of new combinations in the mechanical properties of materials causes the development and study of composite materials such as fiberglass polymer matrix, in this work we investigate the characterization of the composite material of fiberglass and polymeric matrix (epoxy) for reinforcement orientations in the material of 0, 45 and 90 degrees, analyzing the mechanical behavior of the material using the criteria of maximum stress and maximum strain and the continuum damage mechanics (CDM) in order to observe the behavior of damage in fiber and the matrix of the material, that identifies the values of failure in the material, in addition a computational model with the software ANSYS that can recreate the conditions of the material and that can be the basis of future simulations for more complex geometries. Laboratory tests were carried out in accordance with the conditions stipulated by ASTM D3039 using the machine MTS Bionix Servo hydraulic test system, model 370, with the objective of determining the stress mechanical properties of the material for the different orientations of the reinforcement in the composite material.

* Bachelor Thesis

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: OCTAVIO ANDRÉS GONZÁLEZ ESTRADA. Ing. Mecánico.

INTRODUCCIÓN

Algunas de las tecnologías modernas requieren materiales con una combinación inusual de propiedades, imposible de conseguir con los metales, los cerámicos y los polímeros convencionales. Esta necesidad es evidente en aplicaciones aéreo-espaciales, transporte y energías. En la aeronáutica, por ejemplo, se solicitan materiales de baja densidad y que sean rígidos, y resistentes al impacto, la corrosión y a la abrasión². Características fisicoquímicas deseadas en los materiales se han logrado con el surgimiento y desarrollo de los materiales compuestos. El requerimiento de nuevas combinaciones en las propiedades provoca el desarrollo y el estudio de materiales compuestos como el de fibra de vidrio de matriz polimérica, los cuales pueden responder a algunas de las necesidades que están limitando el avance de la industria moderna en algunos de sus procesos productivos y de desarrollo tecnológico.

Este tipo de materiales compuestos presentan comportamiento mecánico complejo y modos de fallo variados debido a que se debe poder asociar una buena interacción entre fibra y matriz, y una adecuada orientación de las fibras de refuerzo del material, haciendo que el proceso de diseño de estos materiales se vuelva problemático. Por lo tanto, una caracterización adecuada del material, y teniendo en cuenta que no existe una teoría de falla que otorgue todas las respuestas, ni un acuerdo de cuál deba ser la utilizada, hace que el estudio de un criterio en particular como el de la mecánica del daño continuo (CDM) identificando la manera en cómo interactúa fibra y la matriz³ en el material compuesto, alimente el conocimiento y la

² PARIS CARBALLO, Federico; CAÑAS DELGADO, Jose y MARIN VALLEJO, Juan Carlos, Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos, 2006.

³ PEDRAZA ROSAS, Sandra Liliana; TOLOZA MEZA, Sergio Andres. Estudio del comportamiento mecánico a tensión de un material compuesto con matriz polimérica de resina epóxi reforzado con fibras de carbono de alta resistencia con un tejido cuatriaxial, Universidad Industrial de Santander, 2016

información en aspectos importantes sobre las propiedades del material y
complemente el análisis de los materiales compuestos.

1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar las propiedades mecánicas de un material compuesto de fibra de vidrio y matriz de resina poliéster bajo el criterio de la mecánica del daño continuo, contribuyendo con la misión del programa de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander en la construcción, aplicación y divulgación de conocimiento; la investigación, el desarrollo y transferencia de tecnologías.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar los ensayos de tensión del material compuesto bajo los parámetros que indica la norma ASTM D3039.
- Determinar las propiedades mecánicas del material tales como el módulo de elasticidad, la energía total disipada y la tenacidad del material compuesto obtenidas en el ensayo de tracción, para configuraciones de fibra de 90°, 45° y 0°.
- Determinar las propiedades de falla tales como esfuerzo y deformación última del material compuesto a tensión para aplicar los criterios de falla de max stress, max strain, además de la variable de daño de la fibra a tensión (dft) y la variable de daño en la matriz a tensión (dmt).
- Realizar el modelo numérico del experimento de las probetas en ANSYS.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

Se denominan materiales compuestos a la combinación de dos o más materiales que dan lugar a la formación de uno con propiedades y características que no es posible obtener con los materiales originales. La mayor parte de los materiales compuestos fabricados están formados por uno o más refuerzos y una matriz continua que rodea todo el conjunto.

A pesar de que se utiliza el concepto de material fabricado, en la naturaleza existen ejemplos asociados a materiales compuestos cuyas agrupaciones de diferentes elementos hacen que funcionen como conjunto, el bambú o la madera son claros ejemplos de estos.

El material compuesto, tiene como objetivo tanto el obtener propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de los constituyentes actuando aisladamente, como aunar las propiedades individuales de dichos constituyentes en un solo material⁴.

Las propiedades que suelen ser de interés en estos materiales son: resistencia, mecánica, rigidez, resistencia a corrosión, resistencia a la abrasión, vida a fatiga, aislamiento térmico.

Estas propiedades de interés en los materiales compuestos están sujetas a la manera como interactúen elementos claves en su fabricación como lo son las propiedades de la matriz y del refuerzo, el contenido de refuerzo, la orientación del refuerzo y el método de fabricación.

En los materiales compuestos, además de la matriz y las fibras cabe destacar la interfase, parte de la matriz que rodea la superficie de las fibras y que presenta

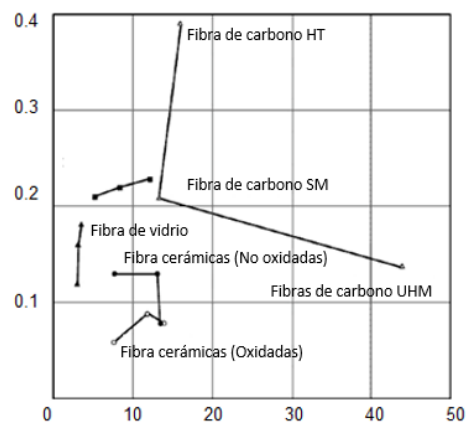
⁴ PARIS CARBALLO, Federico. Op. cit.

propiedades locales diferentes al resto de la matriz. Su tamaño y tipo varía dependiendo de la naturaleza y superficie de las fibras y de la matriz empleada⁵.

2.2 FIBRA

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Aporta elementos como resistencia mecánica, rigidez y dureza y es determinante para la obtención de las principales propiedades mecánicas del nuevo material. Las características más sobresalientes de las fibras en los materiales compuestos son su resistencia a la tracción específica y su elevado módulo de específico.

Figura 1. Comparación de las características específicas de diferentes fibras



Los tipos de fibras de refuerzo se pueden clasificar según su origen. Las fibras pueden ser de origen mineral y de origen orgánico

⁵ PEDRAZA ROSAS, Sandra Liliana. Op. cit.

Tabla 1. Tipos de fibras

Fibras de origen mineral	Fibras cerámicas (Carburo de silicio, Aramida)
	Fibras Metálicas
	Fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio, Boro)
Fibras de origen orgánico	Aramida, Polietileno

Fuente: MARAVETE. Antonio, et al. Materiales compuestos. Barcelona: Editorial reverté, 2007. p.2.

Las más usadas son las de carbono, vidrio, boro (en menor medida) y las orgánicas (registradas como Kevlar).

2.2.1 Fibra de vidrio. La fibra de vidrio es de origen mineral, es decir inorgánico. Se fabrica moldeando o soplando el vidrio fundido hasta formar hilos. Con ellos se elaboran diversos tipos de refuerzos para diferentes aplicaciones.

En lo que se refiere a las fibras de vidrio, se han usado muchas combinaciones de vidrios minerales todas tienen como base sílice ($Si O_2$) con adiciones de óxidos de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio. La Tabla 2 presenta las combinaciones más usadas en la fabricación de fibra de vidrio.

Tabla 2. Composiciones de diferentes vidrios usados en la fabricación de fibra.

	Vidrio E	Vidrio C	Vidrio S
<i>SiO₂</i>	52.4	64.4	64.4
<i>Al₂O₃, Fe₂O₃</i>	14.4	4.1	25.0
<i>CaO</i>	17.2	13.4	-
<i>MgO</i>	4.6	3.3	10.3
<i>Na₂O, K₂</i>	0.8	9.6	0.3
<i>Ba₂O₃</i>	10.6	4.7	-
<i>BaO</i>	-	0.9	-

Fuente: PARÍS, F. CAÑAS, J. MARÍN, J.C. Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos. Sevilla. Universidad de Sevilla, 2006. P.6.

El diámetro de las fibras de vidrio oscila entre 8 y 15 μm . A diferencia de las fibras de carbono, las fibras de vidrio son isótropas (sus propiedades mecánicas son diferentes en diferentes direcciones)⁶.

La fibra de vidrio tipo E es la más usada, presenta una elevada resistencia a la tracción y gran elasticidad, posee además excelente estabilidad química, fuerza, resistencia al fuego, al agua y también resistencia a la corrosión y a la intemperie⁷.

2.3 MATRIZ

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda embebido. Tanto materiales metálicos, como cerámicos o resinas orgánicas pueden cumplir con este

⁶ PARIS CARBALLO, Federico; Op. cit.

⁷ NAVARRO, Osvaldo; RAMIREZ, Andrés. Evaluación de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibra de fique y fibra de vidrio en una matriz de resina epóxica., 2014. p. 120.

papel. A excepción de los cerámicos, el material que se elige matriz no es, en general, tan rígido ni tan resistente como el material de refuerzo.

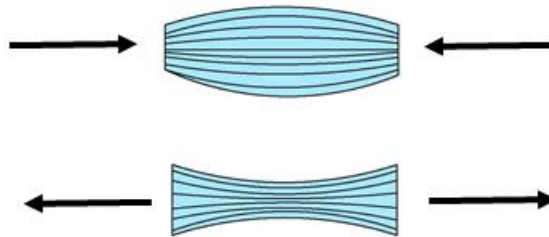
La matriz de un material compuesto:

- Soporta las fibras manteniéndolas en su posición correcta.
- Transfiere la carga a las fibras fuertes.
- Las protege de sufrir daños durante su manufactura y uso.
- Evita la propagación de grietas en las fibras a todo lo largo del compuesto.
- La matriz, por lo general, es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.

Al someter al material compuesto a diferentes tipos de cargas mecánicas la matriz juega diferentes roles:

1. Bajo cargas compresivas: es la matriz la que soporta el esfuerzo, ya que se trata de la fase continua.
2. En tracción: la matriz transfiere la carga aplicada sobre la pieza a cada una de las fibras o partículas, de manera que éstas sean las que soporten el esfuerzo. Para ello es necesaria una excelente adhesión entre la matriz y el refuerzo.

Figura 2. Comportamiento de la matriz bajo cargas de compresión y tensión



Fuente: STUPENEGO, Franco. Materiales y materias primas. Buenos Aires: Encuentro, 2011. Cap 10. p.8.

Además, muchas veces es la matriz la que determina la resistencia al impacto y la encargada de detener la propagación de fisuras⁸. En la Tabla 3 nos referimos a las principales matrices utilizadas para la formación de los materiales compuestos.

Tabla 3. Clasificación de matrices en materiales compuestos

	CEMENTO, GEOPOLIMEROS, YESO
INORGÁNICAS	MATRICES CERÁMICAS
	MATRICES METÁLICAS
ORGÁNICAS	TERMOESTABLES
	Epoxi, Viniléster
	Poliéster, Fenólica,
	Esteres Cianato,
	Bismaldeias,
	Polimidas
	Polieteramida
	TERMOPLÁSTICAS
	Policloruro De Vinilo
	(Pvc) Copolímeros De
Estireno (Abs, San),	
Polietileno (Pe),	
Polipropileno (Pp),	

Fuente: MARAVETE. Antonio, *et al.* Materiales compuestos. Barcelona: Reverté, 2007. p.45.

⁸ STUPENENGO, Franco, Materiales compuestos. Materiales y Materias primas, 2011. pp. 7–11.

De acuerdo con esta clasificación basada en las matrices, podemos encontrar en cada grupo numerosos materiales que puedan ser utilizados como elemento aglutinante.

2.4. RESINAS

La resina es el material utilizado para la creación de la matriz del material compuesto, el tipo de resina más importante utilizado son las resinas líquidas termoestables, algunas veces llamadas químico-estables. Existen dos grandes grupos de resinas que son usadas generalmente en la industria, las resinas de poliéster y las resinas epóxicas. Se fabrican a partir de precursores líquidos o semi-sólidos que endurecen irreversiblemente; esta reacción química es conocida como policondensación, polimerización o curado, que al final del proceso la resina líquida se convierte en un sólido duro. Las unidades moleculares que conforman la resina y la densidad de esta influirán en las propiedades mecánicas del material. La reacción es irreversible no se funde, pero si la temperatura se incrementa lo suficiente comienza a degradarse y descomponerse⁹.

2.4.1 Resina epoxi. Las resinas epoxi son las resinas más utilizadas en los materiales compuestos de alta calidad, fundamentalmente por que poseen mejores propiedades físicas y mecánicas que las resinas de poliéster y viniléster. Si sumamos a esto su buena capacidad de adhesión sobre una gran cantidad de materiales de refuerzo, se obtienen como resultado laminados con un elevado contenido de fibra. La reacción de curado se realiza por medio de catalizadores y aceleradores. Las características finales de la resina dependerán del tipo de epóxido

⁹ Ibíd., p

y del agente de reticulación (resistencia térmica, modo de endurecimiento y ductilidad).

Poseen las mejores propiedades mecánicas, una mayor resistencia térmica y una buena resistencia a la abrasión; baja contracción durante el curado (0-1%), buenas propiedades eléctricas y térmicas, y buena resistencia al ataque de agentes químicos. Las propiedades mecánicas pueden modificarse por adición de sustancias inertes. Y la contracción puede anularse mediante aditivos o con una adecuada combinación con la fibra de refuerzo. También se pueden conseguir elongaciones superiores a las del poliéster mediante la utilización de aditivos.

Su utilización es frecuente en estructuras que requieran máxima resistencia con el mínimo de peso, como por ejemplo embarcaciones de regata, aplicaciones aeroespaciales, eléctricas, electrónicas, adhesivos y tuberías¹⁰.

La mayoría de las resinas epoxi están basadas en estructuras químicas: TGMDA (dianilina tetraglicidil metileno), DGEBA (diglicidil éter de bisfenol A), y fenolformaldehído. La principal diferencia entre las moléculas radica en un curado mucho más rápido, presentando valores de módulo de Young más altos como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4. Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas

	TGMDA	DGEBA
Módulo de Young (Mpa)	3800-4500	2750-3450
Deformación a rotura (%)	1-2	5-8
Tg (°C)	175-235	120-175
Absorción de agua (%)	4-6	2-3

Fuente: MIRAVETE. Antonio, *et al.* Materiales compuestos. Barcelona: Reverté, 2007. p.51.

¹⁰ BESEDNJAK, Alejandro. Los materiales compuestos. Materiales compuestos. 2005. pp. 15–22.

3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS.

Los compuestos reforzados con fibras manifiestan anisotropía. Esto es, algunas propiedades varían dependiendo del eje geométrico o plano a lo largo del cual fueron examinadas. Hacer del material compuesto un material anisotrópico en una dirección en particular crea la posibilidad de orientar las fibras en la dirección en que se aplicará la mayor carga, lo cual incrementa la eficiencia del refuerzo ante la carga.

La orientación de las fibras, su cantidad y distribución tienen una influencia significativa en la resistencia mecánica y en otras propiedades de los materiales compuestos. Cuando se trabaja con fibra continua y alineada, las propiedades mecánicas dependerán principalmente del ángulo formado entre la dirección de aplicación de la carga y la dirección de la fibra¹¹.

3.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

Con el fin de evaluar las diferentes propiedades mecánicas del material compuesto en tensión, las probetas son ensayadas en el laboratorio de caracterización de materiales, en cuanto a los materiales compuestos reforzados con fibras, el ensayo de tracción se lleva a cabo bajo las condiciones de la norma ASTM D3039, utilizando la máquina MTS Bionix Servo hydraulic test system, modelo 370 (Figura 3), integrada con una celda de carga de 25kN, con una velocidad de prueba de 4 [mm/min], el equipo proporciona información acerca de la cantidad de carga axial aplicada a la probeta y deformación axial

Durante el proceso de ensayo, la máquina guarda un registro de la carga aplicada a lo largo del tiempo, así como del desplazamiento producido por el pistón.

¹¹ CALLISTER, William. Materials science and engineering: an introduction, 2007. vol. 94.

Figura 3. MTS Bionix Servohydraulic test system, modelo 370.



3.1.2 Curva tensión deformación de materiales compuestos. A fin de comprender de una mejor manera los efectos que produce la aplicación de una determinada carga sobre un material se han desarrollado curvas características como la ya conocida esfuerzo ingenieril vs deformación ingenieril y así obtener información sobre el comportamiento mecánico del material.

En el análisis de los materiales compuestos se utilizan dos hipótesis esenciales¹² para conocer cómo se produce la rotura en estos:

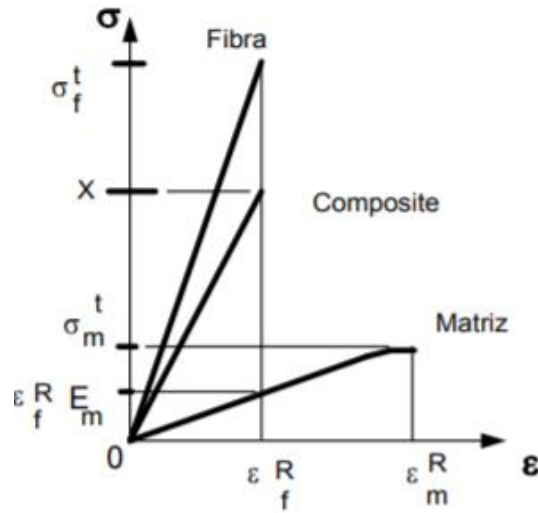
- La fibra posee una deformación de rotura inferior a la de la matriz.

¹² BESEDNJAK, Alejandro. Op. cit

- La matriz posee una deformación de rotura inferior a la de la fibra.

Para el primer caso tenemos que $\epsilon_f^R < \epsilon_m^R$, donde ϵ_f^R , ϵ_m^R son las deformaciones de rotura de la fibra y la matriz en tracción y su comportamiento se ve reflejado en la Figura 4.

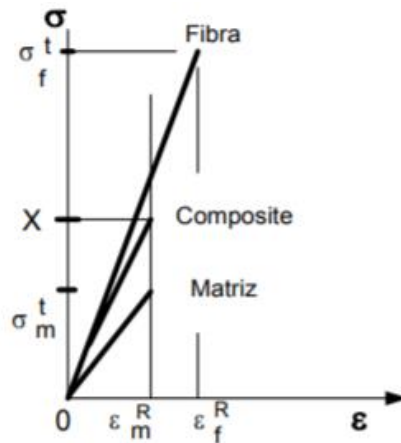
Figura 4. Gráfica tensión - deformación para materiales compuestos.



Donde σ_f^R y σ_1^R representan la tensión de rotura de la fibra y la lámina y σ_m representa la tensión a la que se encuentra la matriz en el momento de la rotura y que es inferior a su tensión de rotura.

Para el caso en que $\epsilon_m^R < \epsilon_f^R$, las curvas de tensión-deformación son como se presentan en la Figura 5.

Figura 5. Gráfica tensión-deformación para materiales compuestos.



3.1.3 Esfuerzo Ingenieril. Se define como la relación de la carga aplicada F con el área transversal A del espécimen.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

El esfuerzo ingenieril máximo se conoce como resistencia a la tensión o esfuerzo último del material¹³.

Dónde:

σ = Esfuerzo ingenieril, lb/pul^2 (MPa)

F = Fuerza aplicada en el ensayo, lb (N)

A = Área original del espécimen de prueba, pul^2 (mm^2).

¹³ Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 5th ed. 2008.

3.1.4 Deformación ingenieril. La deformación ingenieril en cualquier punto del ensayo está dada por:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

Dónde:

ε = Deformación ingenieril, *pul/pul* (mm/mm)

L = longitud en cualquier punto durante la elongación, *pul* (mm)

L_0 =longitud original de calibración, *pul* (mm).

Las unidades de la deformación ingenieril están dadas en *pul/pul* (mm/mm), pero podemos considerar que representa la elongación por unidad de longitud, sin unidades¹⁴.

3.1.5 Módulo de elasticidad. La relación del esfuerzo a la deformación en la región elástica se conoce como el módulo de elasticidad E , o módulo de Young.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Es esencialmente una medida de la pendiente de la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación y por lo tanto de la rigidez del material¹⁵.

¹⁴ GROOVER, Mikel. Fundamentos de manufactura moderna," Mexico: Prentice-Hall, 1997, pp. 45–46.

¹⁵ Kalpakjian, Serope Op. cit.

3.1.6 Energía total disipada. En la mecánica del daño continuo las energías disipadas por unidad de área G_c se especifican individualmente para todos los modos de daño (tensión de la fibra, compresión de la fibra, tensión de la matriz y compresión de la matriz). Para un modo de daño específico, G_c está dado por:

$$G_c = \int_0^{u_e^f} \sigma_e du_e \quad (4)$$

Donde:

σ_e = Esfuerzo equivalente. Para el estado de esfuerzo uniaxial simple, la tensión equivalente es la tensión real.

u_e = Desplazamiento equivalente. Para el estado de esfuerzo uniaxial simple, $u_e = \varepsilon * L_c$ (donde, L_c es la longitud del elemento en la dirección de la tensión)

u_e^f = Desplazamiento equivalente final, donde la rigidez total del material se pierde para el modo específico.

3.1.7 Tenacidad. La tenacidad cuantifica la energía total de un material hasta la fractura o entalla, corresponde al área bajo la curva de un ensayo de tracción entre la deformación nula y la deformación correspondiente al límite de rotura.

La tenacidad puede medirse como:

$$T = \int_{00}^{\varepsilon_R} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

Donde:

σ = Es la tensión del material

ε_R = Es la deformación máxima del material

ε = Es la deformación del material

3.2 MECÁNICA DEL DAÑO CONTINUO (CDM)

Son muchos los mecanismos de daño que se pueden observar en un material compuesto laminar, incluidos el agrietamiento de la matriz, la rotura de fibras, el despegue fibra-matriz, etc. Se han realizado muchos estudios tratando de cuantificar cada uno de estos mecanismos de fallo, su evolución con respecto a la carga, la tensión, el tiempo, número de ciclos, etc. La Mecánica del Daño Continuo (Continuum Damage Mechanics, CDM) permite predecir todos estos mecanismos de fallo¹⁶.

Por otro lado, los modelos CDM presentan la dificultad de no poder describir exactamente el efecto local de la interacción entre varios modos de daño y el efecto local de la reducción de rigidez en el área dañada¹⁷. El daño del laminado se representa mediante una variable de estado 'continua' d , también llamada variable de daño, la cual representa la pérdida de rigidez (degradación de propiedades mecánicas)¹⁸. Dicha variable es un escalar y toma dos valores extremos: $d = 0$ si no hay daño, es decir el material conserva intactas sus propiedades mecánicas y la estructura correspondiente su capacidad portante, y $d = 1$ si el material está totalmente dañado¹⁹, en la actualidad existe una gran variedad de criterios de fallo, los cuales están expresados en términos de deformaciones o de tensiones. Para el

¹⁶ MOURE CUADRADO, Marta María. Análisis de la Evolución del Daño en Laminados con Agujero Empleando la Mecánica del Daño Discreto," Universidad Carlos III de Madrid, 2016.

¹⁷ SWINDEMAN, Michael; et al. Strength prediction in open hole composite laminates by using discrete damage modeling. AIAA J., 2013. vol. 51, no. 4, pp. 936–945.

¹⁸ BARBERO, Ever Finite element analysis of composite materials. Boca Raton: CRC Press, 2007.

¹⁹ GUILL, Teresa; CUEVAS, Reinoso. Formulación de un modelo de daño anisótropo tridimensional para materiales compuestos basado en la teoría de invariantes. 2016.

desarrollo de la evaluación de falla en la fibra y en la matriz se utiliza la metodología que desarrolla Matzenmiller²⁰, en la cual se expresan el daño indicando que cuando el valor de daño es mayor o igual que cero se presenta la falla, y cuando el valor de daño es menor que cero no se presenta falla pues el material aún se encuentra en el rango del límite elástico

3.3 CRITERIO DE MÁXIMA TENSIÓN

Considera que el material falla cuando el mismo supera una cierta tensión límite en una zona determinada. Este método tiene el inconveniente que al manejar las tensiones en forma separada no permite observar la interacción entre las tensiones en distintas direcciones. Es el criterio más sencillo y al suponer que no existe interacción entre los diferentes mecanismos de fractura tiende a sobreestimar la carga de rotura²¹

$$|\sigma_{11}| < X_t \quad (\sigma_{11} > 0) \quad (6)$$

$$|\sigma_{22}| < Y_t \quad (\sigma_{22} > 0) \quad (7)$$

X_t = Resistencia del material en dirección longitudinal, expresada en términos de tensiones, y a tracción.

Y_t = Resistencia del material en dirección transversal, expresada en términos de tensiones y a tracción.

²⁰ MATZENMILLER, A; LUBLINER, J y TAYLOR, R. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. Mech. Mater., 1995. vol. 20, no. 2, pp. 125–152.

²¹ MOLINIER, Matías. Análisis de los criterios de falla aplicados a los laminados compuestos. Ser. Monogr. en Mecánica Laminados Compuestos. Buenas Aires.

3.4 CRITERIO DE MÁXIMA DEFORMACIÓN

Considera que el material falla cuando el mismo supera una cierta deformación límite en una zona determinada. No se considera la interacción entre las deformaciones combinadas sobre la lámina analizada²².

$$|\sigma_{11}| < X\varepsilon_t \quad (\varepsilon_{11} > 0) \quad (8)$$

$$|\sigma_{22}| < Y\varepsilon_t \quad (\varepsilon_{22} > 0) \quad (9)$$

X_t = Resistencia del material en dirección longitudinal, expresada en términos de deformaciones y a tracción.

Y_t = Resistencia del material en dirección transversal, expresada en términos de deformaciones y a tracción.

3.5 ANÁLISIS DE DAÑO EN LA FIBRA

La rotura de la fibra es causada principalmente por tensiones de tracción σ_{11} en la dirección de la fibra. La falla se inicia por un número de roturas de fibra en la vecindad de la otra. El desprendimiento de fibras rotas del material de matriz y las cavidades se forma entre los extremos del material. El parámetro de resistencia X_t , asociado con la carga crítica, se rige por la resistencia a la tracción de las fibras y la relación de volumen de la matriz de fibra.

²² MOLINIER, Matías Ibíd., p

3.6 ANÁLISIS DE DAÑO EN LA MATRIZ

La falla en el sentido del agrietamiento de la matriz depende fundamentalmente de la resistencia a la tracción Y_t . Ambos parámetros de resistencia son aproximadamente proporcionales a la resistencia a la tracción y cortante de la resina o a la fuerza de unión fibra-matriz. La no linealidad del diagrama de tensión-deformación es generalmente pequeña y la mecánica de daños entra en juego para modelar la falla posterior rango de respuesta de tensión-deformación similar a la falla en la fibra²³.

3.7 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL DAÑO EN FIBRA Y MATRIZ.

La metodología desarrollada por Matzenmiller se usa con el propósito de encontrar los criterios de falla en los modos de falla descritos anteriormente para la fibra y la matriz. El criterio de falla general se aplica a los modos de matriz y fibra, proporcionando dos expresiones algebraicas diferentes. En cada criterio para matriz y fibra solo aparecen aquellos invariantes que dependen de los componentes de tensión de uno de los conjuntos mencionados anteriormente.

Los coeficientes de los polinomios cuadráticos se relacionan con los cuatro parámetros de fuerza X_t, Y_t disponibles a partir de pruebas uniaxiales simples de tensión se reducen a las siguientes formas simples:

Daño de la fibra a tensión

$$dft = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t} \right)^2 - 1 \left\{ \begin{array}{l} \geq 0 \text{ Fallo} \\ < 0 \text{ Elastico} \end{array} \right\} \quad (10)$$

²³ MATZENMILLER, A. Op.cit.

Daño de la matriz a tensión

$$dmt = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{Fallo} \\ < 0 & \text{Limite elástico} \end{cases} \quad (11)$$

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 RECURSOS Y MATERIALES

Se citan a continuación los materiales empleados en la fabricación de las probetas para los ensayos de tracción en fibras orientadas a 90°, 45° y 0°.

- Resina Epoxi
- Endurecedor epóxido para epoxi.
- Brochas
- Balanza
- Gel desmoldeante
- Guantes
- Hilo de fibra de vidrio tipo E
- Cinta de enmascarar
- Tapa bocas
- Molde
- Jeringa

4.2 DISEÑO DE LA PROBETA

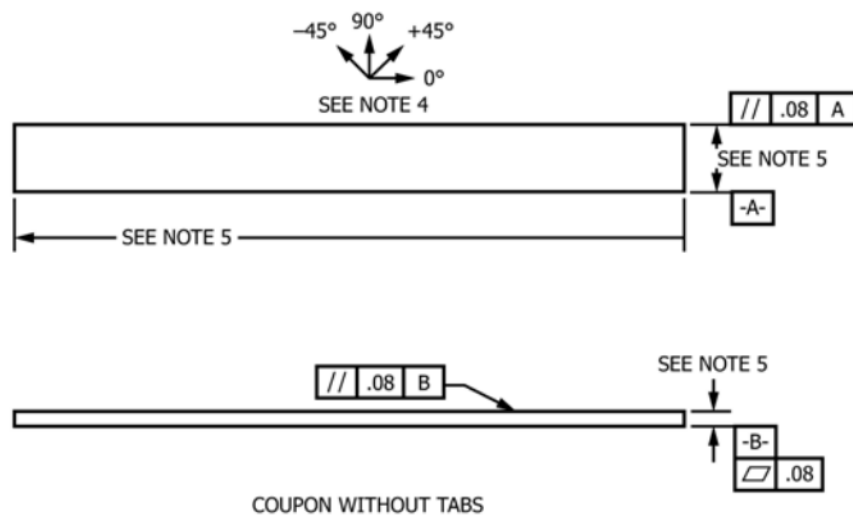
Según la norma ASTM D 3039 a continuación se muestra la tabla con las medidas recomendadas y sus correspondientes planos.

Tabla 5. Geometría recomendada para la probeta a tensión.

Orientación	Ancho, mm [in]	Longitud total, mm [in]	Espesor, mm [in]
0° Unidireccional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]
90° Unidireccional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]
Equilibrado y Simétrico	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]
Aleatorio-descontinuo	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]

Fuente: ASTM D 3039. 2000. Standard test method for tensile Properties of polymer Matrix Composite Materials. Estados Unidos, Julio 2000. P6.

Figura 6. Dimensiones de las probetas de ensayo a tensión



Fuente: ASTM D 3039. 2000. Standard test method for tensile Properties of polymer Matrix Composite Materials. Estados Unidos, Julio 2000. P7.

4.3 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

1. Ubicar en la todos los elementos y los materiales necesarios (fibra de vidrio, resina, endurecedor, molde, etc.), en la zona de trabajo.
2. La superficie en donde se ubica el molde debe de estar limpia y seca, de manera que se pueda aplicar de manera eficiente el desmoldante y garantizar un correcto desmolde luego del curado de la resina.
3. Se determina la masa de resina, de fibra y de endurecedor, con relación a las dimensiones de los moldes (Anexo A) que está en función de la cantidad de probetas a extraer. Dichas cantidades son determinadas en base a la recomendación del fabricante SUMUNGLAS S.A (Anexo D)
4. Se ubica el molde sobre la superficie con desmoldeante y se ubican los hilos previamente pesados de fibra de vidrio en la dirección deseada, procurando mantener una distribución uniforme de fibra sobre el molde.
5. Se prepara la resina con las cantidades anteriormente descritas y se aplica de manera uniforme en el molde ayudado por una brocha, de forma que todas las fibras sean recubiertas por la resina, buscando una completa adhesión entre fibra y resina.
6. Una vez impregnados los moldes con la resina, esperar el proceso de curado, que es de 24 horas y posteriormente proceder al desmolde.
7. Luego del proceso de curado y desmolde, se procede a cotar el material compuesto en función de las dimensiones recomendadas por la norma ASTM D3039.

Nota: Se recomienda que el lugar en donde se va a realizar el curado sea un espacio asilado de manera que no caigan sobre la resina fresca elementos extraños que puedan quedar fusionados durante el proceso de curado.

Figura 7. Moldes para probetas



(a)



(b)



(c)

(a) Molde para orientación de fibra a 0° , (b) molde para orientación de fibra a 90° , (c) molde para orientación de fibra a 45° .

5. RESULTADOS

Se realizaron ensayos en tensión para un material compuesto laminar de fibra de vidrio de matriz polimérica con resina epoxi, con fibras orientadas en direcciones de 90°, 45° y 0°, con el fin de evaluar sus propiedades mecánicas, para ello fueron ensayadas 5 probetas para cada dirección de fibra.

A continuación, se muestran los valores obtenidos en el ensayo a tensión además de las propiedades mecánicas halladas para la caracterización del material compuesto.

5.1 FIBRAS ORIENTADAS A 0°

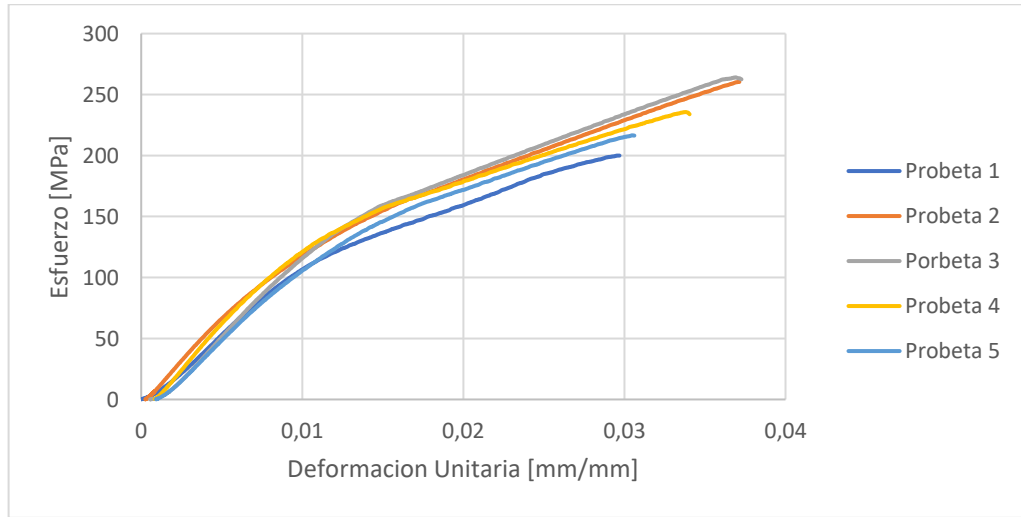
Una vez realizado el ensayo a tensión se obtuvieron los siguientes resultados de fuerza máxima y desplazamiento para cada una de las probetas con orientación de fibra a 0°.

Con los datos de desplazamiento y carga de rotura obtenidos de la prueba y conociendo previamente la geometría de la probeta para la orientación de 0°, se calcularon por medio de la ecuación 1 el esfuerzo ingenieril, deformación unitaria ecuación 2 .

Tabla 6. Datos del ensayado de tensión en dirección de fibra de 0°

	Deformación [mm]	Esfuerzo [MPa]
Probeta 1	0,030	199,968
Probeta 2	0,037	260,381
Probeta 3	0,037	262,576
Probeta 4	0,034	233,929
Probeta 5	0,031	216,345
Promedio	0,034	234,640

Figura 8. Gráfica esfuerzo vs deformación para el tejido a 0°.



El módulo de elasticidad (ecuación 3) (anexo B), tenacidad ecuación 4 y energía total disipada ecuación 5. que se presentan en la Tabla 7. Siguiendo el mismo método de evaluación se obtuvieron los resultados para las probetas con orientaciones de fibra de 45° y 90° respectivamente.

Tabla 7. Propiedades mecánicas del material para fibras orientadas a 0°.

0°	Módulo de Elasticidad [GPa]	Tenacidad	Energía total disipada
Probeta 1	12,81	4,166	833,225
Probeta 2	12,84	6,122	1224,336
Probeta 3	11,42	7,147	1429,369
Probeta 4	12,63	5,963	1203,807
Probeta 5	10,60	4,650	870,292
Promedio	12,06	5,609	1112,21
Desviación estándar	1,01	1,200	253,92

Se presentan además los datos de los resultados de la evaluación de la información para la estimación del daño en la fibra y matriz utilizando las ecuaciones 6 y 7 en la Tabla 8

Tabla 8. Daño en fibra y matriz en orientación de fibra de 0°.

0°	Daño en la fibra	Daño en la matriz
Probeta 1	0,377	0,721
Probeta 2	0,188	0,015
Probeta 3	0,201	0,002
Probeta 4	0,006	0,258
Probeta 5	0,176	0,470
Promedio	0,190	0,293
Desviación estándar	0,131	0,307

5.2 FIBRAS ORIENTADAS A 45°

Una vez realizado el ensayo a tensión se obtuvieron los siguientes resultados de fuerza máxima y desplazamiento para las probetas ensayadas con orientación de fibra a 45°.

Tabla 9. Datos del ensayo de tensión en dirección de fibra de 45°

45°	Deformación [mm]	Esfuerzo [MPa]
Probeta 1	0,112	13,080
Probeta 2	0,128	8,894
Probeta 3	0,080	12,722
Probeta 4	0,100	13,241
Probeta 5	0,128	11,701
Promedio	0,110	11,927

Figura 9. Gráfica esfuerzo vs deformación para el tejido a 45°.

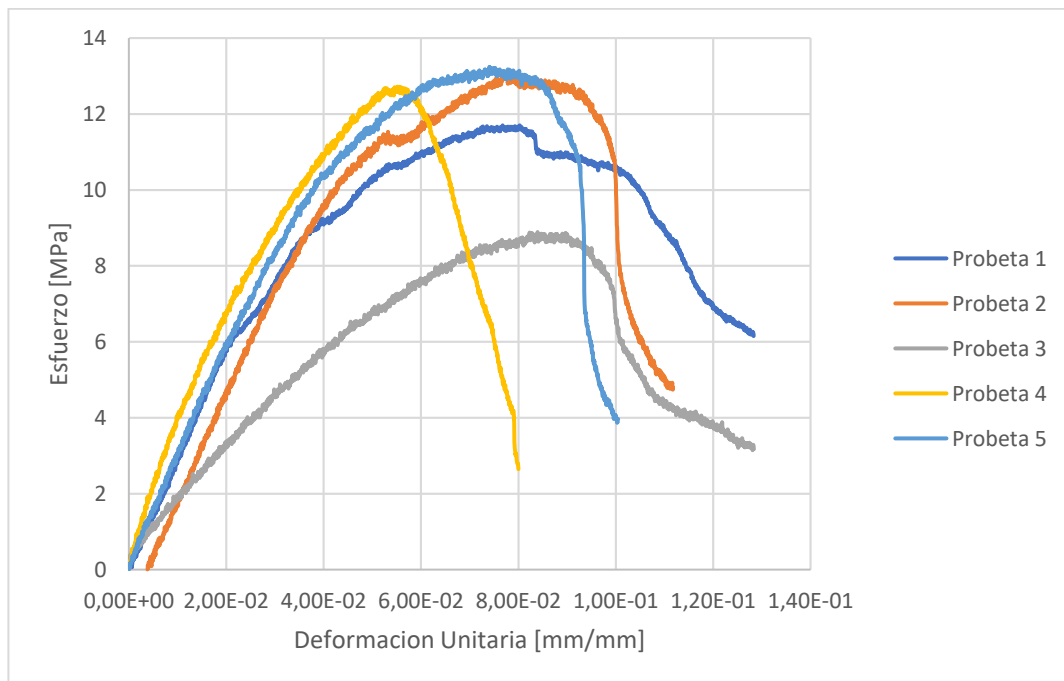


Tabla 10. Propiedades mecánicas del material para fibras orientadas a 45°.

45°	Módulo de Elasticidad [MPa]	Tenacidad	Energía Total Disipada
Probeta 1	522,18	0,0868	5,204
Probeta 2	620,79	0,0257	5,144
Probeta 3	573,63	0,0192	3,843
Probeta 4	609,55	0,0334	6,683
Probeta 5	613,14	0,0217	4,335
Promedio	581,54	0,0413	5,219
Desviación estándar	40,956	0,0281	1,080

Se presentan además los datos de los resultados de la evaluación de la información para la estimación del daño en la fibra y matriz utilizando las ecuaciones 6 y 7 en la Tabla 11

Tabla 11. Daño en fibra y matriz en orientación de fibra de 45°.

45°	Daño en la fibra	Daño en la matriz
Probeta 1	0,028	0,222
Probeta 2	-0,550	0,300
Probeta 3	0,080	0,170
Probeta 4	0,004	0,246
Probeta 5	0,921	1,171
Promedio	0,096	0,422
Desviación estándar	0,527	0,422

5.3 FIBRAS ORIENTADAS A 90°.

Una vez realizado el ensayo a tensión se obtuvieron los siguientes resultados de fuerza máxima y desplazamiento.

Tabla 12. Datos del ensayado de tensión en dirección de fibra de 90°.

90°	Deformación [mm]	Esfuerzo [MPa]
Probeta 1	0,014	4,362
Probeta 2	0,018	4,907
Probeta 3	0,012	3,902
Probeta 4	0,012	5,265
Probeta 5	0,009	4,605
Promedio	0,014	4,609

Figura 10. Gráfica esfuerzo vs deformación para tejido a 90°.

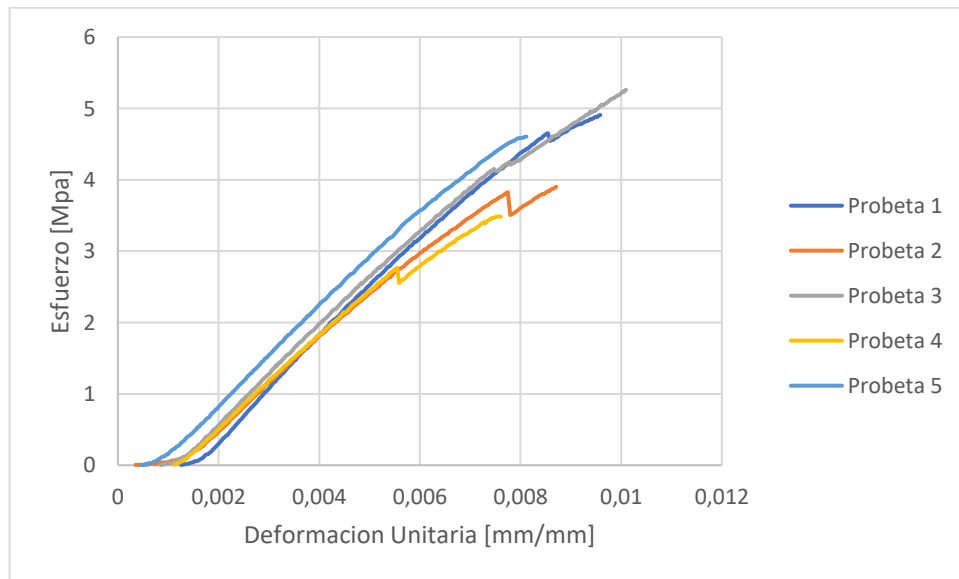


Tabla 13. Propiedades mecánicas del material para fibras orientadas a 90°.

90°	Módulo de elasticidad [MPa]	Tenacidad	Energía total disipada
Probeta 1	522,18	0,0868	5,204
Probeta 2	620,79	0,0257	5,144
Probeta 3	573,63	0,0192	3,843
Probeta 4	609,55	0,0334	6,683
Probeta 5	613,14	0,0217	4,335
Promedio	581,54	0,0413	5,219
Desviación estándar	40,956	0,0281	1,080

Se presentan además los datos de los resultados de la evaluación de la información para la estimación del daño en la fibra y matriz utilizando las ecuaciones (citar ecuaciones) en la Tabla 14.

Tabla 14. Daño en fibra y matriz en orientación de fibra de 90°.

90°	Daño en la fibra	Daño en la matriz
Probeta 1	-0,104	0,146
Probeta 2	-0,134	0,384
Probeta 3	-0,283	0,033
Probeta 4	-0,305	0,555
Probeta 5	-0,002	0,248
Promedio	-0,166	0,273
Desviación estándar	0,127	0,204

5.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL COMPUESTO

En la Figura 8 se puede observar el comportamiento de las probetas de ensayo para la orientación de fibra a 0° , las fibras están orientadas en la dirección que se aplica la mayor carga lo cual incrementa la eficiencia del refuerzo ante la carga haciendo que sus prestaciones mecánicas sean las mejores para las tres orientaciones de fibra analizadas. Sin embargo, si la carga es perpendicular a las fibras, la orientación origina propiedades mucho menores como se pueden observar en la Figura 10 en donde el refuerzo está orientado de esta manera. La Figura 9 representa un grado de orientación de fibra intermedio pero sus propiedades no son significativamente mayores a las que se presentan en la Figura 10, esto se puede explicar debido a una pérdida de adhesión y un desplazamiento con una gran pérdida de energía por fricción, esto se ve reflejado en la Tabla 10, que muestra la energía que puede disipar el material, en comparación con las otras dos orientaciones de fibra en donde la diferencia es muy poca respecto a la orientación de fibra a 90° (Tabla 13) grados pues en esta se presenta el mismo fenómeno, pero una gran diferencia respecto a la orientación de fibra a 0° (Tabla 7) que nuevamente es quien mejores prestaciones mecánicas presentó durante los ensayos.

5.5 MODELO NUMÉRICO DEL ENSAYO EN ANSYS

El modelo se realiza con la finalidad de poder replicar el ensayo que se realizó con el material compuesto, se realiza para la orientación de fibra a 45° (Figura 11), dado que los resultados de orientación de fibra a 0° y 90° proveen los datos de los valores que requiere ANSYS para poder realizar el modelo bajo la rutina de la mecánica del daño continuo (CMD) utilizando las mismas dimensiones de las probetas. Para el desarrollo de la simulación se utiliza las rutinas relacionadas con el inicio y la evolución del daño en el material. Se definen los datos en tensión de la ley de

evolución del daño de material (o la forma en que un material se degrada) en la Tabla 15 y que fueron hallados anteriormente.

Este tipo de análisis puede ser usado en un futuro cuando se quieran hacer análisis para geometrías más complejas (open hole test) para citar un ejemplo o para laminados en diferentes orientaciones de fibra, etc.

Tabla 15. Modelo del material

Constantes		$TBOPT = 2$ or CDM
		$NPTS = 8$
C1	Energía disipada por unidad de área debido al daño de la fibra de tracción	
C2	Coeficiente de amortiguación viscoso para daños a la fibra de tracción	
C3	Energía disipada por unidad de área debido al daño de la fibra de compresión	
C4	Coeficiente de amortiguación viscoso para daños a la fibra de compresión	
C5	Energía disipada por unidad de área del daño de la matriz de tensión	
C6	Coeficiente de amortiguación viscoso para daño de la matriz de tracción	
C7	Energía disipada por unidad de área del daño de la matriz de compresión	
C8	Coeficiente de amortiguación viscoso para daños en la matriz de compresión	

Una vez realizada la simulación de la prueba para la orientación fibra a 45 se obtiene un resultado de tensión máxima de 13.024 MPa (Figura 12), con una deformación máxima de 0.18 mm (Figura 13), esto corresponde a un valor máximo de fuerza soportada de 651.2 N, que comparado con los resultados de las pruebas realizadas en la probetas con la misma orientaciones fibra Tabla 9 fue en promedio de 11.927 MPa para el esfuerzo máximo, y de 0.110 mm para la deformación máxima, con valores promedio de fuerza máxima de 596.35, obteniendo un error del 8.44% entre la prueba realizada en la máquina de ensayos y la simulación realizada en ANSYS.

Figura 11. Orientación de fibra a 45°.

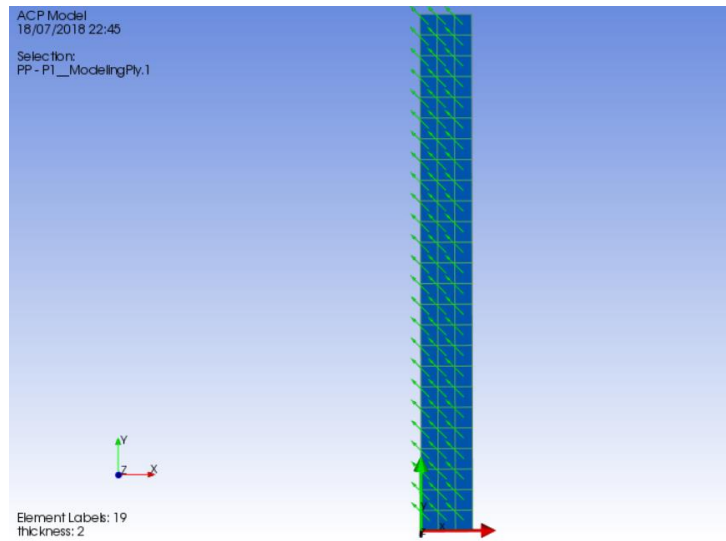


Figura 12. Esfuerzo Máximo.

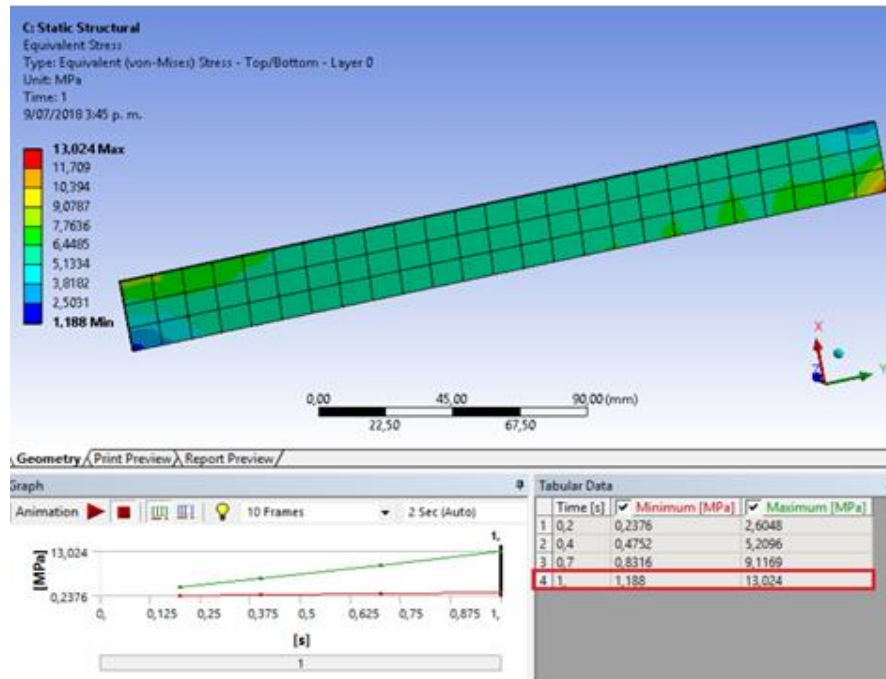
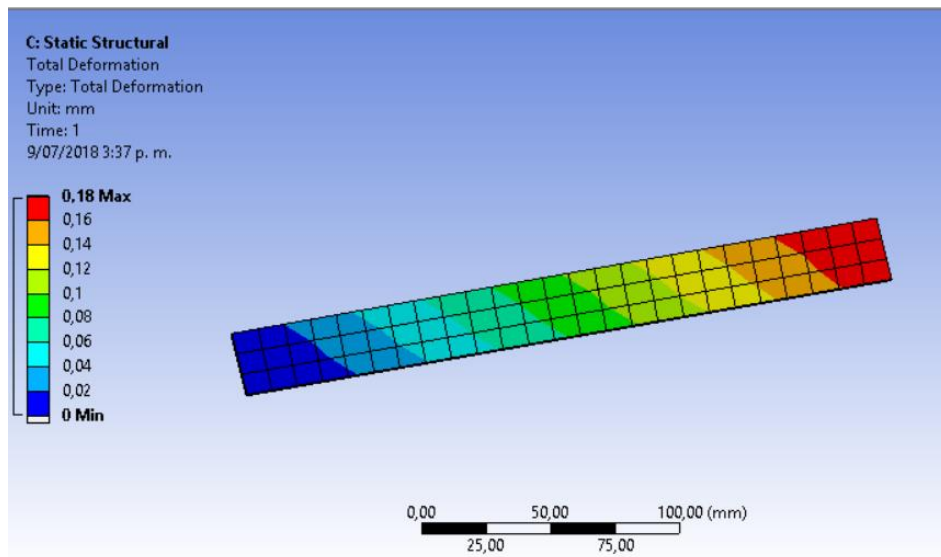


Figura 13. Deformación.



6. CONCLUSIONES

Como resultado del estudio del comportamiento a tensión de un material compuesto con matriz polimérica reforzada con fibras de vidrio realizado bajo la norma ASTM D3039 se puede concluir que:

Los materiales compuestos mejoran sus propiedades mecánicas cuando se usan de manera adecuada lo cual es equivalente a conocer de antemano los esfuerzos a los cuales va a ser sometido el material, a manera de ubicar las fibras en dirección del esfuerzo, pues son las fibras las encargadas de proporcionar rigidez y resistencia, teniendo mejores propiedades mecánicas cuando el esfuerzo es paralelo a la dirección del refuerzo, teniendo así mejores resultados en orientaciones de fibra a 0° , 45° y 90° respectivamente.

Para el ensayo en orientaciones de fibra a 45° , la degradación de las propiedades mecánicas una vez alcanzado el límite elástico del material, se ve caracterizado por el proceso de iniciación y crecimiento del daño en el material, observado en la gráfica esfuerzo deformación, para efectos de esta investigación no corresponde analizar dichos procesos, pero si se puede evidenciar que ocurre la falla una vez ocurre el daño en fibra y matriz, con valores promedio de daño en fibra de 0.096 y 0.422 para daño en matriz.

Cuando las fibras no están orientadas en la dirección de la carga ocasionan pérdida en las propiedades mecánicas en el material compuesto, y como la matriz es la encargada de transmitir la carga a la fibra, para orientaciones de fibra a 90° , se puede evidenciar que el fallo en el material ocurre únicamente debido al daño presentado en la matriz, mientras que la fibra aún se encuentra dentro de su límite

elástico, esto debido a la poca resistencia a la tracción que presenta la matriz en relación con la fibra.

El modelo numérico nos da una aproximación al comportamiento del material compuesto, el modelo se ve limitado en cuanto a que algunos de las constantes que requiere el programa para realizar la simulación presentan un grado de dificultad experimental alto para hallar dichos valores, de manera que se hace difícil proveer esta información y se toman valores teóricos.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM, Astm D3039/D3039M, Annu. B. ASTM Stand., pp. 1–13, 2014
- BARBERO, Ever Finite element analysis of composite materials. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- BESEDNJAK, Alejandro. Los materiales compuestos. Materiales compuestos. 2005. pp. 15–22.
- CALLISTER, William. Materials science and engineering: an introduction, 2007. vol. 94.
- GROOVER, Mikel. Fundamentos de manufactura moderna,” Mexico: Prentice-Hall, 1997, pp. 45–46.
- GUILL, Teresa; CUEVAS, Reinoso. Formulación de un modelo de daño anisótropo tridimensional para materiales compuestos basado en la teoría de invariantes. 2016.
- Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 5th ed. 2008.
- MATZENMILLER, A; LUBLINER, J y TAYLOR, R. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. Mech. Mater., 1995. vol. 20, no. 2, pp. 125–152.

- MIRAVETE, Arturo, et al. Materiales compuestos. Barcelona: Reverté, 2007.
- MOLINIER, Matías. Análisis de los criterios de falla aplicados a los laminados compuestos. Ser. Monogr. en Mecánica Laminados Compuestos. Buenos Aires.
- MOURE CUADRADO, Marta María. Análisis de la Evolución del Daño en Laminados con Agujero Empleando la Mecánica del Daño Discreto,” Universidad Carlos III de Madrid, 2016.
- NAVARRO, Osvaldo; RAMIREZ, Andrés. Evaluación de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibra de fique y fibra de vidrio en una matriz de resina epóxica., 2014. p. 120.
- PARIS CARBALLO, Federico; CAÑAS DELGADO, Jose y MARIN VALLEJO, Juan Carlos, Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos, 2006.
- PEDRAZA ROSAS, Sandra Liliana; TOLOZA MEZA, Sergio Andres. Estudio del comportamiento mecánico a tensión de un material compuesto con matriz polimérica de resina epóxi reforzado con fibras de carbono de alta resistencia con un tejido cuatriaxial, Universidad Industrial de Santander, 2016.
- STUPENENGO, Franco, Materiales compuestos. Materiales y Materias primas, 2011. pp. 7–11.

- SWINDEMAN, Michael; et al. Strength prediction in open hole composite laminates by using discrete damage modeling,” AIAA J., 2013. vol. 51, no. 4, pp. 936–945.