



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**  
**DE INGENIERA MECÁNICA**

**TEMA:**

---

**“EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES  
COMPUESTOS FABRICADOS A PARTIR DE ENVASES PLÁSTICOS  
RECICLADOS Y GOMA DE NEUMÁTICOS PULVERIZADOS”**

---

**Autora:** Yessenia Patricia Aleaga Ulloa

**Tutor:** Ing. Pablo Raúl Valle Velasco, Ph. D.

**AMBATO - ECUADOR**

**Septiembre - 2023**

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniera Mecánica, con el tema: **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS FABRICADOS A PARTIR DE ENVASES PLÁSTICOS RECICLADOS Y GOMA DE NEUMÁTICOS PULVERIZADOS”**, elaborado por la Srta. Yessenia Patricia Aleaga Ulloa, portadora de la cédula de ciudadanía C.I. 1805201561, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, septiembre 2023



---

Ing. Pablo Raúl Valle Velasco, Ph. D.

TUTOR

## AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Yessenia Patricia Aleaga Ulloa, con C.I. 1805201561 declaro que todos los contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente Trabajo Experimental con el tema: **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS FABRICADOS A PARTIR DE ENVASES PLÁSTICOS RECICLADOS Y GOMA DE NEUMÁTICOS PULVERIZADOS”**, así como también los análisis estadísticos, criterios, tablas, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, septiembre 2023



**Yessenia Patricia Aleaga Ulloa**

**C.I.: 1805201561**

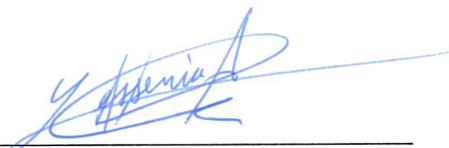
**AUTORA**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no ponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, septiembre 2023



---

**Yessenia Patricia Aleaga Ulloa**

**C.I.: 1805201561**

**AUTORA**

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental realizado por la estudiante Yessenia Patricia Aleaga Ulloa, de la Carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS FABRICADOS A PARTIR DE ENVASES PLÁSTICOS RECICLADOS Y GOMA DE NEUMÁTICOS PULVERIZADOS”**.

Ambato, septiembre 2023

Para constancia firman:



---

**Ing. Luis Eduardo Escobar Luna, Mg.**  
**MIEMBRO CALIFICADOR**



---

**Ing. Wilson Henry Vaca Ortega, Mg.**  
**MIEMBRO CALIFICADOR**

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar el presente trabajo principalmente a mis padres Luis Aleaga y Patricia Ulloa que me apoyaron durante mis años de estudio, a mi hermano Eduardo Aleaga por sus consejos, a Marcel Estacio por estar junto a mí en todo momento y a mis amigos por su compañía incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

Un profundo agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato por abrirme sus puertas y permitirme formar parte de esta prestigiosa Institución. A los docentes de la Facultad de la Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica por compartir sus conocimientos y sus valiosos consejos. Al Ph.D. Pablo Valle, por su tiempo y guía en el desarrollo de este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi familia y amigos por su apoyo incondicional durante mi carrera.

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
1.4.1. Ingeniería de materiales.....	5
1.4.1.1. <i>Materiales convencionales y sus limitaciones</i> .....	5
1.4.2. Materiales compuestos.....	5
1.4.3. Estructura de los materiales compuestos.....	6
1.4.3.1. <i>Matriz</i> .....	7
1.4.3.2. <i>Refuerzo</i> .....	9
1.4.3.3. <i>Interface</i> .....	9
1.4.4. Tipos de resinas.....	10
1.4.5. Resina epóxica como matriz.....	11
1.4.6. Fibras.....	12
1.4.6.1. <i>Cáñamo (Hemp)</i> .....	12
1.4.6.2. <i>Goma de neumáticos pulverizados</i> .....	15
1.4.6.3. <i>PET (Polietileno tereftalato)</i> .....	18
1.4.7. Ensayos mecánicos.....	20



1.4.7.1. Ensayo de compresión.....	20
1.4.7.2. Ensayo de flexión .....	20
1.4.7.3. Ensayo de tracción .....	21
<b>1.5. HIPÓTESIS.....</b>	<b>22</b>
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>2</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. MATERIALES.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
2.2.1. Tipos de investigación.....	26
2.2.1.1. Investigación exploratoria:.....	26
2.2.1.2. Investigación descriptiva: .....	26
2.2.1.3. Investigación bibliográfica: .....	26
2.2.1.4. Investigación experimental:.....	27
2.2.2. Población y muestra.....	27
2.2.2.1. Población .....	27
2.2.2.2. Muestra .....	27
2.2.3. Operacionalización de variables.....	28
2.2.3.1. Variables independientes .....	28
2.2.3.2. Variables dependientes.....	28
<b>2.3. DIAGRAMA DE OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.....</b>	<b>31</b>
2.4.1. Obtención de los materiales de refuerzo (cáñamo – PET – neumático).....	31
2.4.2. Determinación del volumen total.....	31
2.4.3. Fabricación del molde.....	32
2.4.4. Determinación de las fracciones volumétricas .....	33
2.4.5. Material compuesto 1 .....	34
2.4.5.1. Cálculo de la densidad del material compuesto 1 .....	34
2.4.5.2. Cálculo del volumen de la matriz (resina epóxica) .....	35
2.4.5.3. Cálculo del volumen del refuerzo (cáñamo) .....	35
2.4.5.4. Cálculo de la masa nominal de la matriz (resina epóxica).....	35
2.4.5.5. Cálculo de la masa nominal del refuerzo (cáñamo) .....	35
2.4.6. Material compuesto 2 .....	36
2.4.6.1. Cálculo de la densidad del material compuesto 1 .....	36
2.4.6.2. Cálculo del volumen de la matriz (resina epóxica) .....	36
2.4.6.3. Cálculo del volumen del refuerzo (cáñamo – PET – neumático).....	37

2.4.6.4. Cálculo de la masa nominal de la matriz (resina epóxica) .....	37
2.4.6.5. Cálculo de la masa nominal del refuerzo (cáñamo – PET – neumático) .....	38
<b>2.5. MOLDEO EN SISTEMA ABIERTO .....</b>	<b>38</b>
2.5.1. Preparación de la fibra .....	38
2.5.2. Preparación del molde .....	39
2.5.3. Elaboración de la mezcla (resina epóxica + endurecedor) .....	40
2.5.4. Distribución de la matriz y el refuerzo en el molde .....	41
2.5.5. Desmoldar el material compuesto .....	41
<b>2.6. DIMENSIONES DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7. CORTE DE LAS PROBETAS .....</b>	<b>43</b>
<b>2.8. TIPOS DE FALLAS .....</b>	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>24</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>24</b>
3.1.1. Tabulación de los resultados obtenidos en los ensayos .....	24
3.1.2. Prueba SEM .....	66
<b>3.2. ANÁLISIS DE LOS MATERIALES PROPUESTOS.....</b>	<b>67</b>
3.2.1. Método T-Student para el ensayo a flexión .....	69
3.2.2. Método T-Student para el ensayo a tracción.....	70
3.2.3. Método T-Student para el ensayo a compresión .....	72
3.2.4. Análisis de Varianza .....	73
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>77</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1. CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>4.2. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>80</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Tipos de Resinas [5] .....	10
<b>Tabla 2:</b> Impactos ambientales del Hemp Hurd [8] .....	14
<b>Tabla 3:</b> Materiales y equipos .....	2
<b>Tabla 4:</b> Variable independiente [17].....	28
<b>Tabla 5:</b> Variable dependiente [17].....	28
<b>Tabla 6:</b> Fracciones volumétricas .....	40
<b>Tabla 7:</b> Dimensiones para el ensayo de flexión.....	42
<b>Tabla 8:</b> Dimensiones para el ensayo de tracción .....	42
<b>Tabla 9:</b> Dimensiones para el ensayo de compresión .....	42
<b>Tabla 10:</b> Tipos de Fallas en el ensayo de tracción [22].....	45
<b>Tabla 11:</b> Tipos de fallas en el ensayo de flexión [22] .....	46
<b>Tabla 12:</b> Ficha técnica del ensayo de Flexión (Material Compuesto 1).....	48
<b>Tabla 13:</b> Ficha técnica del ensayo de flexión (Material compuesto 2).....	51
<b>Tabla 14:</b> Ficha técnica del ensayo de Tracción (Material Compuesto 1).....	54
<b>Tabla 15:</b> Ficha técnica del ensayo de Tracción (Material Compuesto 2).....	57
<b>Tabla 16:</b> Ficha técnica del ensayo de Compresión (Material Compuesto 1) .....	60
<b>Tabla 17:</b> Ficha técnica del ensayo de Compresión (Material Compuesto 2) .....	63
<b>Tabla 18:</b> Datos de esfuerzo de los Materiales Compuestos.....	69
<b>Tabla 19:</b> Datos de esfuerzo a tracción de los Materiales Compuestos .....	70
<b>Tabla 20:</b> Datos de esfuerzo a Compresión de los Materiales Compuestos .....	72
<b>Tabla 21:</b> Método .....	74
<b>Tabla 22:</b> Información del factor.....	74
<b>Tabla 23:</b> Análisis de varianza .....	74
<b>Tabla 24:</b> Resumen del modelo.....	74
<b>Tabla 25:</b> Medias.....	74
<b>Tabla 26:</b> Método de Turkey.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Partículas de neumáticos (A); Partículas de PET (B). [2].....	2
<b>Figura 2:</b> Conformación de un Material Compuesto [4].....	7
<b>Figura 3:</b> Cáñamo procesado [7].....	13
<b>Figura 4:</b> Partes del cáñamo -tallo, Hurd or Shiv, fibras [9].....	13
<b>Figura 5:</b> Hemp Hurd Grades: a) Fino, b) Medio, c) En rama (Puro o Crudo). [9]..	15
<b>Figura 6:</b> Hemp Fibre Grades: a) Fino, b) Medio, c) En rama (Puro o Crudo). [9]	15
<b>Figura 7:</b> Neumático pulverizado [10].....	16
<b>Figura 8:</b> Plástico PET triturado [11].....	19
<b>Figura 9:</b> Probeta del ensayo de compresión [13].....	20
<b>Figura 10:</b> Probeta para ensayo a flexión [14] .....	21
<b>Figura 11:</b> Ensayo de tracción [13].....	21
<b>Figura 12:</b> Distribución de las probetas en el molde (mm).....	32
<b>Figura 13:</b> Medidas de los elementos del molde en (mm) .....	33
<b>Figura 14:</b> Molde de acrílico.....	33
<b>Figura 15:</b> Preparación de la fibra.....	39
<b>Figura 16:</b> Molde de acrílico.....	39
<b>Figura 17:</b> Cera desmoldante .....	39
<b>Figura 18:</b> Preparación de la resina epóxica .....	40
<b>Figura 19:</b> Distribución de la matriz y el refuerzo en el molde .....	41
<b>Figura 20:</b> Desmoldar el material compuesto .....	41
<b>Figura 21:</b> Proceso de corte de las probetas.....	43
<b>Figura 22:</b> Probetas para ensayo de flexión .....	44
<b>Figura 23:</b> Probetas para ensayo de tracción (a) Material 1; (b) Material 2 .....	44
<b>Figura 24:</b> Probetas para ensayos de compresión .....	45
<b>Figura 25:</b> Prueba SEM, material compuesto .....	66
<b>Figura 26:</b> Distribución t-Student según el nivel de significancia y los grados de libertad.....	68
<b>Figura 27:</b> Gráfica de T- Student .....	69
<b>Figura 28:</b> Gráfica de intervalos .....	75
<b>Figura 29:</b> Gráfica de valores individuales .....	75
<b>Figura 30:</b> Gráfica de caja.....	76
<b>Figura 31:</b> Gráfica de residuos.....	76

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho_r$ : Densidad de la resina epóxica

$\rho_c$ : Densidad del cáñamo

$\rho_p$ : Densidad del plástico PET

$\rho_n$ : Densidad del neumático

$l$ : Largo

$a$ : Ancho

$e$ : Espesor

$V_T$ : Volumen total

### Material compuesto 1

$f_{r1}$ : Fraccionamiento de la resina epóxica

$f_{c1}$ : Fraccionamiento del cáñamo

$\rho_{MC1}$ : Densidad del material compuesto 1

$V_{r1}$ : Volumen de la resina epóxica en el material compuesto 1

$V_{c1}$ : Volumen de la fibra de cáñamo

$m_{r1}$ : Masa nominal de la resina epóxica

$m_{c1}$ : Masa nominal del cáñamo

### Material compuesto 2

$f_{r2}$ : Fraccionamiento de la resina epóxica

$f_{c2}$ : Fraccionamiento del cáñamo

$f_{p2}$ : Fraccionamiento del plástico PET

$f_{n2}$ : Fraccionamiento del neumático

$V_{r2}$ : Volumen de la resina epóxica en el material compuesto 2

$V_{c2}$ : Volumen del cáñamo en el material compuesto 2

$V_p$ : Volumen del plástico PET

$V_n$ : Volumen del neumático

$m_{r2}$ : Masa nominal de la resina epóxica del material compuesto 2

$m_{c2}$ : Masa nominal del cáñamo en el material compuesto 2

$m_p$ : Masa nominal del plástico PET

$m_n$ : Masa nominal de neumático

### **Método T-Student**

$H_i$ : Hipótesis nula

$H_o$ : Hipótesis alternativa

$\alpha$ : Margen de error

$X$ : Promedio del esfuerzo de los ensayos realizados en el Material 1

$Y$ : Promedio del esfuerzo de los ensayos realizados en el Material 2

$n_1$ : Número de probetas del material 1

$n_2$ : Número de probetas del material 2

$S_1^2$ : Varianza muestral Material 1

$S_2^2$ : Varianza muestral Material 2

$t$ : Valor t-student

$gl$ : Grados de libertad

**p-valor**: Probabilidad asignada a t-student valor

## RESUMEN EJECUTIVO

Esta innovadora técnica busca aprovechar los desechos plásticos y los neumáticos usados, brindando una alternativa sostenible y económica para su reutilización. La evaluación de las propiedades mecánicas es de suma importancia para determinar la viabilidad y el rendimiento de estos materiales compuestos.

El presente tema se enfoca en la evaluación de las propiedades mecánicas de un material compuesto con una matriz de resina, utilizando envases plásticos reciclados y goma de neumáticos pulverizados como refuerzo.

Se han llevado a cabo pruebas y análisis exhaustivos que abarcan la resistencia a la compresión, flexión, tracción y la Prueba SEM (microscopía electrónica de barrido). Estas pruebas permiten medir y comprender en profundidad las características mecánicas del material, es decir, su capacidad para soportar cargas, resistir deformaciones y cumplir con los requisitos de diseño específicos. La utilización de envases plásticos reciclados y goma de neumáticos pulverizados como refuerzo en la matriz de resina presenta un enfoque prometedor para mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto. Se espera que este tipo de materiales contribuya al desarrollo de productos más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, reduciendo la cantidad de desechos plásticos y neumáticos abandonados. Por lo tanto, la evaluación meticulosa de las propiedades mecánicas de estos materiales compuestos es esencial para asegurar su calidad y aplicabilidad en diversas industrias.

Los resultados obtenidos de estas pruebas permiten obtener información crucial para su implementación en el diseño y fabricación de productos más resistentes, eficientes y sostenibles en el futuro.

**Palabras claves:** Material compuesto, resina epóxica, plástico PET, Neumático, compresión, flexión, tracción y prueba SEM.

## ABSTRACT

This innovative technique seeks to take advantage of plastic waste and used tires, providing a sustainable and economical alternative for its reuse. The evaluation of mechanical properties is of paramount importance to determine the feasibility and performance of these composite materials.

This topic focuses on the evaluation of the mechanical properties of a composite material with a resin matrix, using recycled plastic containers and pulverized tire rubber as reinforcement.

Comprehensive tests and analyzes have been carried out covering compressive, flexural, tensile strength and SEM Test (Scanning Electron Microscopy). These tests allow us to measure and understand in depth the mechanical characteristics of the material, that is, its ability to support loads, resist deformation and meet specific design requirements. The use of recycled plastic packaging and pulverized tire rubber as reinforcement in the resin matrix presents a promising approach to improve the mechanical properties of the composite material. It is expected that this type of materials will contribute to the development of more sustainable and environmentally friendly products, reduce the amount of plastic waste and abandoned tires. Therefore, meticulous evaluation of the mechanical properties of these composite materials is essential to ensure their quality and applicability in various industries.

The results obtained from these tests allow us to obtain crucial information for its implementation in the design and manufacture of more resistant, efficient and sustainable products in the future.

**Keywords:** Composite material, epoxy resin, PET plastic, Tire, compression, flexion, traction and SEM test.



# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

**Tema:** “EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS FABRICADOS A PARTIR DE ENVASES PLÁSTICOS RECICLADOS Y GOMA DE NEUMÁTICOS PULVERIZADOS”

### 1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El desarrollo de nuevos materiales para la construcción es la base fundamental para la disminución de costos en los procesos de fabricación y el uso de, por ejemplo, materia prima reciclada y fibras naturales que puede mejorar las propiedades mecánicas. También son utilizados para el aislamiento eléctrico en algunas conexiones importantes. El sector de la construcción es de los mayores consumidores de energía con un porcentaje aproximado del 40%. De allí se emplea alrededor del 60% para calefacción y refrigeración en países en donde las condiciones ambientales son extremas en épocas del año específicas. [1] De esto se deriva que la demanda es alta y por lo tanto la contaminación proveniente del sector de la construcción y el sector de empresas u organizaciones que prevén la materia prima está en aumento. Pongamos el caso de Europa, allí el sector de la construcción provoca aproximadamente un tercio de los gases que producen el efecto invernadero y a nivel mundial se estima que provoca un 10% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. [1]

Actualmente la comunidad científica del mundo se encuentra en la búsqueda de materiales híbridos que replacen a la materia prima actual que genera gran cantidad de contaminación. Una muestra de ello es el reemplazo de materiales sintéticos por fibras naturales o el uso de materiales reciclados. Una muestra de ello es el uso de fibras naturales que, actualmente, ha llamado la atención para su uso en el área de la construcción. Un aspecto importante a tomar en consideración es que el comportamiento del material depende de la forma y el tamaño de las fibras que se adicionan en el concreto que puede ser utilizado para diferentes aplicaciones. Debido a su peso relativamente ligero es usado para aplicaciones más variadas fuera del campo de la construcción: aplicación como aislante eléctrico. [1]

Paralelamente, existen otro tipo de contaminantes que resultan conflictivos para el planeta. Este tipo de materiales denominados como desperdicios poliméricos (PET y goma de neumáticos), representan un porcentaje de contaminación relevante a nivel mundial. Una cifra estimada con respecto a los neumáticos es que 1 000 millones de estos elementos alcanzan su vida útil al finalizar cada año y con relación a las botellas PET en el año 2007 se registró un consumo de 250 000 millones. [2]



*Figura 1: Partículas de neumáticos (A); Partículas de PET (B). [2]*

Para este caso la investigación que se desarrollará se fundamenta en el uso de un material base que es la resina Epóxica y la aplicación de aditivos reciclados provenientes de botellas plásticas PET y neumáticos pulverizados. El desarrollo de los datos y los ensayos intrínsecos al tema de análisis prevén una mejora en el uso de materiales compuestos y el desarrollo de nuevas tecnologías que proceden de fuentes naturales y se complementen con materiales reciclados que actúan en el planeta como fuente principal de contaminación.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Uno de los problemas que ha afectado en mayor magnitud al país y al mundo es el incremento de desperdicios plásticos y basura. Los desperdicios plásticos son causados por falta de interés de las autoridades del país y también por la falta de hábito de los ciudadanos al momento de reciclar los materiales de desechos. Por lo que es importante buscar alternativas para utilizar cierta basura que se le puede dar una nueva vida útil.

La presente investigación busca disminuir la producción de desperdicios generados por envases plásticos y neumáticos al ser desechados, ya que producen contaminación por la forma en que se eliminan los residuos que ya no están en uso. Al eliminar los restos de plástico y llantas por lo general se utiliza la quema directa, lo que ha provocado daños graves al medio ambiente con las emisiones de gases que se producen. [1]

Otra de las formas de contaminación que puede provocar el aumento desmedido de desperdicios, es la proliferación de plagas como insectos y roedores lo que puede causar enfermedades dentro de la población cercana a los vertederos controlados sin tratar. Asimismo, desechar el plástico y los neumáticos en desuso sin un control adecuado puede contaminar los afluentes y canales de riego causando que se aumente la producción de larvas de zancudos que transmiten enfermedades a los seres humanos y animales.

Por lo que el proyecto busca generar un compuesto innovador a partir de los residuos del plástico PET y de los neumáticos, que combinados presenten propiedades mecánicas como la flexibilidad y la capacidad de absorción a vibraciones. El compuesto puede ser muy útil para varios ámbitos dentro de la industria. El tereftalato de polietileno (PET) es utilizado en la industria del embalaje y para producir botellas, por lo que va aumentando la demanda de uso del PET por la facilidad y lo ligero que es el material. Por esta razón es necesario considerar otros procesos de reciclaje para darle otro uso eficiente, realizando así elementos funcionales dentro de la industria. [2]

El plástico PET pertenece a los materiales termoplásticos por lo tanto son fáciles de reciclar ya que tienen la capacidad de fundirse con el calor, por lo que se puede moldear sin alterar sus propiedades mecánicas. Al realizar el material compuesto que tiene la resina como la matriz y de refuerzo tiene la fibra de cáñamo, el plástico triturado y el neumático pulverizado. Al compuesto se le realiza los ensayos para evaluar las propiedades mecánicas del material fabricado a partir de plástico PET y neumático.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar las propiedades mecánicas de materiales compuestos fabricados a partir de envases plásticos reciclados y goma de neumáticos pulverizados.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar los parámetros que intervienen en la evaluación de las propiedades mecánicas en materiales compuestos.

**Justificación:** Mediante la investigación de material bibliográfico se podrá identificar los parámetros para realizar el ensayo de las propiedades mecánicas del material compuesto.

- Realizar los ensayos para la evaluación de las propiedades mecánicas en materiales compuestos mediante el uso de normativas ASTM D3039 o referencias bibliográficas validas.

**Justificación:** Uso de normativas, instrucciones de trabajo en el laboratorio, uso de equipos correspondientes para ensayos de compresión, flexión, tracción y pruebas SEM aplicando aditivos para la generación de un material compuesto.

- Evaluar los resultados generados a posteriori de la culminación de los ensayos de evaluación de propiedades mecánicas en materiales compuestos, mediante la aplicación de la técnica de diseño de experimentos.

**Justificación:** Mediante la aplicación de un software para el estudio estadístico se realizará un análisis de los resultados y los valores estándar de la resistencia a la compresión, flexión, tracción y pruebas SEM, de igual manera, se aplicará una metodología y la interpretación del coeficiente de determinación mediante la aplicación de la técnica de diseño de experimentos.

## **1.4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **1.4.1. Ingeniería de materiales**

#### ***1.4.1.1. Materiales convencionales y sus limitaciones***

La descripción de las características de los materiales resulta difícil, ya que al evaluar las fortalezas y debilidades son relativas, hablando de los compuestos con metales, plásticos y cerámicos. Cada uno de los materiales engloba una amplia gama de compuestos que posee propiedades diversas. No obstante, al realizar una comparación en términos generales, es posible identificar algunas de las ventajas y desventajas que posee cada material. A continuación, se presenta las características principales: [3]

- Los plásticos exhiben una baja densidad y presentan una buena resistencia química. El material se destaca por su asequibilidad, esto se debe principalmente a su precio bajo y la baja energía que se necesita para la transformación. Las propiedades de los polímeros pueden ser modificados mediante la incorporación de aditivos, refuerzos, mezclas y otras variaciones en los procesos de fabricación. Por lo que presentan excelentes características como aislantes eléctricos, térmicos y acústicos. [3]
- Los cerámicos tienen una baja densidad, aunque algunas son altamente densas. Poseen una gran estabilidad térmica y resisten la mayoría de formas de deterioro como: abrasión, desgaste y corrosión. Aunque son fuertes y rígidas debido a sus enlaces químicos, son quebradizas y su conformación y moldeado resultan difíciles. [3]
- Los metales tienen una densidad de media a alta, siendo el magnesio, el aluminio y el berilio los únicos que pueden competir con los plásticos en términos de baja densidad. Muchos metales presentan una buena estabilidad térmica y se pueden formar aleaciones para mejorar su resistencia a la corrosión. Además, ofrecen propiedades mecánicas favorables y alta tenacidad. Son relativamente fácil de unir, gracias a su ductilidad y resistencia a la fractura. [3]

#### **1.4.2. Materiales compuestos**

Cuando se analiza la extensión del refuerzo de materiales tradicionales, ya se ha explorado las funciones desempeñadas por la matriz en un material compuesto, así

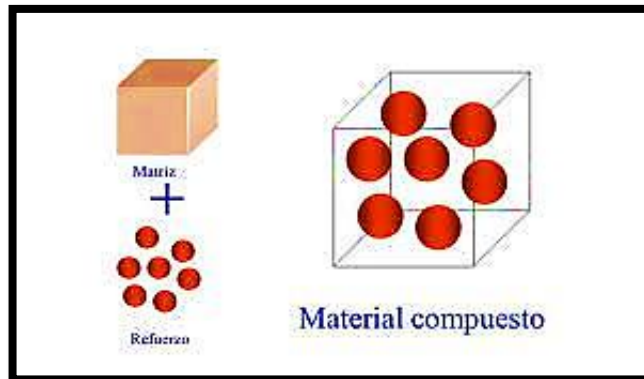
como la naturaleza general de los filamentos de refuerzo disponibles. El desafío que se presenta al fabricante de materiales compuestos consiste en desarrollar métodos apropiados para combinar la matriz como el refuerzo, de manera que se logre la forma deseada del componente con propiedades adecuadas a los requisitos del diseño. [3]

La arquitectura del refuerzo es fundamental para determinar las propiedades de carga de un compuesto de fibra. Lo notable del diseño y los métodos de fabricación de los compuestos modernos es que, en muchos casos, tanto en el material compuesto como el componente final pueden ser creados y completados en una única pieza. Se utiliza una preforma de pieza, que es una estructura esquelética con la forma aproximada del componente final, donde las fibras se disponen según los requisitos de diseño. Esta preforma se coloca en un molde cerrado y se inyecta una resina precatalizada. La resina se cura rápidamente y, una vez retirado el molde, el componente finalizado solo necesita un último proceso de limpieza. De esta manera, el compuesto, el material y el artículo terminado se forman en una sola operación. [3]

Las posibilidades disponibles para los fabricantes a menudo se ven limitadas por las formas de refuerzos útiles. Sin embargo, la mayoría de los refuerzos delgados y continuos se fabrican en forma de estopas continuas que contienen numerosas fibras individuales. Estas estopas pueden ser manipuladas utilizando técnicas textiles bien establecidas. Pueden ser cortadas en trozos más pequeños para mezclarse mecánicamente con resinas de matriz, o pueden ser tejidas en una variedad de telas y trenzas, permitiendo que las fibras se coloquen efectivamente en las direcciones requeridas por el diseñador. En diseños simples, esto puede lograrse utilizando tejidos lisos comunes o tejidos satinados, sin necesidad de técnicas más complejas. [3]

### **1.4.3. Estructura de los materiales compuestos**

Los compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales distintos que están separados por una interfaz. Como resultado, estos materiales son heterogéneos, lo que significa que sus propiedades no son uniformes en todo el volumen. Aunque algunos materiales compuestos existen de forma natural, como la madera o hueso, la mayoría de los materiales compuestos utilizados en la actualidad son diseñados y fabricados por el ser humano. [4]



*Figura 2: Conformación de un Material Compuesto [4]*

La creación de los materiales compuestos surge de la necesidad de obtener materiales con una combinación de propiedades que difícilmente se encuentran en cerámicas, plásticos o metales por sí solos. Por ejemplo, en la industria del transporte se requieren materiales que sean ligeros, rígidos, resistentes al impacto, la flexión, la compresión, a la corrosión y al desgaste. A pesar de que se han logrado desarrollar materiales compuestos con propiedades excepcionales, su utilización en aplicaciones prácticas no siempre es factible por el costo y dificultades asociadas con su fabricación. Todos los materiales compuestos comparten una característica común, que es la presencia de dos componentes que son: la matriz y el refuerzo. [4]

#### **1.4.3.1. Matriz**

La matriz actúa como una fase continua en la que el refuerzo se encuentra incrustado, cumple un papel crucial en los materiales compuestos. Se pueden seleccionar diversos materiales, como metales, cerámicos o resinas orgánicas, para desempeñar este papel de matriz. Sin embargo, a excepción de los materiales cerámicos, la matriz no es tan rígida ni resistente como el material de refuerzo. [4]

Las funciones principales de la matriz son múltiples y abarcan lo siguiente: En primer lugar, la matriz define las propiedades físicas y químicas del material compuesto. Además, se encarga de transmitir las cargas del refuerzo, protegerlo y proporcionarle cohesión. Asimismo, las propiedades de la matriz también influirán en la conformidad y el acabado superficial del material compuesto. En otras palabras, la capacidad del material compuesto para ser conformado en geometrías complejas en procesos de fabricación generalmente no requerirá etapas adicionales de acabado y dependerá de las propiedades de la matriz. [4]

La matriz desempeña diferentes roles al someter el material compuesto a distintos tipos de cargas mecánicas. En el caso de cargas de compresión, la matriz es la responsable de soportar el esfuerzo, dado que actúa como la fase continua del material. En cambio, bajo cargas de tracción, la matriz transfiere la carga aplicada sobre la pieza de cada una de las fibras o partículas, de manera que sean estas las que soporten el esfuerzo. Para lograr esto, es fundamental contar con una excelente adhesión entre la matriz y el refuerzo. Además, en muchas ocasiones, es la matriz la que determina la resistencia al impacto del material compuesto. [4]

### **Propiedades de las matrices**

La matriz de un material compuesto cumple diversas funciones esenciales en su desempeño. Se encarga de sostener las fibras en su posición correcta, garantizando la distribución. Además, transfiere la carga a las fibras resistentes, permitiendo que estas soporten el esfuerzo aplicado. La matriz también protege las fibras durante el proceso de fabricación y durante el uso del material. Asimismo, previene la propagación de grietas a lo largo del compuesto. [4]

Matriz polimérica: Otra de las funciones que tiene la matriz dentro de un material compuesto es el control sobre las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y la resistencia a altas temperaturas. En general, las matrices poliméricas son las más utilizadas en la fabricación de los materiales compuestos. Tanto los polímeros termoplásticos como los termoestables se encuentran disponibles en el mercado y se utilizan comúnmente con el agregado de fibras de vidrio cortas como refuerzo. [4]

Matriz metálica: Los compuestos de matriz metálica, por su parte, involucran materiales como aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos reforzados con fibras cerámicas y metálicas. Estos compuestos encuentran aplicaciones en la industria aeroespacial y automotriz. La matriz metálica permite el funcionamiento a altas temperaturas, aunque a menudo la producción de piezas con este tipo de materiales compuestos es más costosa en comparación con los compuestos de matriz polimérica. [4]

Matriz cerámica: Por otro lado, los materiales cerámicos frágiles también pueden utilizarse como matriz en los materiales compuestos. Los compuestos de matriz cerámica ofrecen buenas propiedades a altas temperaturas, llegando incluso a resistir



temperaturas de varios miles de grados centígrados. Además, son más ligeros que los compuestos de matriz metálica a temperaturas equivalentes. [4]

#### ***1.4.3.2. Refuerzo***

El refuerzo es la fase adicional que se incorpora a la matriz con el fin de otorgar al compuesto propiedades que la matriz por sí sola no posee. Por lo general, el refuerzo se utiliza para aumentar la resistencia y rigidez mecánicas, aunque también se emplea para mejorar el comportamiento a altas temperaturas. El refuerzo puede adoptar diferentes formas, ya sea en partículas o en forma de fibras. En general, se considera más efectivo cuando las partículas son de menor tamaño y se distribuyen de manera homogénea en la matriz. [4]

En la mayoría de los compuestos reforzados con fibras, estas son resistentes, rígidas y ligeras. En caso de que el compuesto deba ser utilizado a altas temperaturas, las fibras también deben tener una temperatura de fusión elevada. Por lo tanto, la resistencia específica y el módulo específico de la fibra son características importantes a tener en cuenta. Las fibras de vidrio, carbono y aramida son las más comúnmente empleadas en los materiales compuestos. Estos tres materiales exhiben una notable resistencia a la tracción, aunque esta característica no es tan evidente al considerarlos como sólidos compactos. [4]

#### ***1.4.3.3. Interface***

En materiales donde la respuesta mecánica depende de cargas compartidas entre dos o más constituyentes separados o 'fases' y donde los caminos para la propagación de grietas se verán afectados por las diferentes propiedades mecánicas de los componentes, la forma en que estos se adhieren entre sí se convierte en una consideración importante. Cuando analicemos la resistencia y tenacidad de los compuestos, veremos que la resistencia de la unión interfacial entre las fibras y la matriz puede marcar la diferencia entre un material satisfactorio y uno inadecuado. [3]

Sería incorrecto considerar únicamente las fibras y la matriz como los únicos componentes importantes de un material compuesto, incluso en aquellos casos simples de dos fases donde no hay ningún otro componente presente de manera intencional. La interfase entre dos sólidos, especialmente cuando se han utilizado

procesos térmicos o químicos para unirlos, rara vez es un límite simple entre dos materiales con características muy distintas. Esta región, a menudo llamada "interfase", puede tener dimensiones moleculares o alcanzar varias micras. A veces, esta modificación ocurre de manera accidental, como cuando los dos componentes de un compuesto de matriz cerámica, que requiere una cocción a alta temperatura para lograr la compactación, reaccionan químicamente entre sí, mientras que en otros casos puede haber sido diseñada de manera intencional. Independientemente del origen de esta región, la interfase es importante porque sus propiedades determinan cómo se transfieren las tensiones desde la matriz hacia las fibras, lo que a su vez afecta muchas de las propiedades químicas, físicas y mecánicas del compuesto en sí. El control de esta interfase, o región de interfaz, es una preocupación fundamental para los fabricantes y proveedores de materiales compuestos comerciales. [3]

#### 1.4.4. Tipos de resinas

El término "resina" se utiliza para referirse a una amplia gama de materiales, ya sean resinas naturales modificadas químicamente o polímeros sintéticos. Estos materiales incluyen tanto termoplásticos, como el polivinilo, poliestireno y polietileno, así como termoestables, como los poliésteres, epóxidos y siliconas. Estas resinas se utilizan en combinación con estabilizadores, pigmentos y otros componentes para formar plásticos. Cada tipo de resina tiene sus propias propiedades específicas y se utiliza en diversas aplicaciones. [5]

*Tabla 1: Tipos de resinas [5]*

Tipos de resinas	Propiedades	Aplicaciones
<b>Resina poliéster</b>	Buena resistencia química, durabilidad, rigidez	Construcción de barcos, tanques de almacenamiento, paneles laminados
<b>Resina epóxica</b>	Alta resistencia mecánica, excelente adhesión, resistencia a altas temperaturas	Aeroespacial, industria automotriz, recubrimientos protectores
<b>Resina de poliuretano</b>	Flexibilidad, resistencia a la abrasión, resistencia a los impactos	Fabricación de espumas, recubrimientos, adhesivos
<b>Resina de vinil éster</b>	Buena resistencia química, resistencia al fuego, baja contracción durante el curado	Industria química, aplicaciones marinas, componentes eléctricos
<b>Resina de fenol</b>	Excelente resistencia	Aislamiento eléctrico,

<b>Formaldehído</b>	térmica, resistencia al fuego, rigidez	componentes de alta temperatura, materiales compuestos estructurales
<b>Resina de poliamida</b>	Alta resistencia al impacto, buen aislante eléctrico, estabilidad dimensional	Componentes electrónicos, aplicaciones de ingeniería, envases de alimentos

#### 1.4.5. Resina epóxica como matriz

Existen varias razones por las cuales las resinas son consideradas una matriz para algunos materiales compuestos gracias a sus grandiosas propiedades mecánicas. Estas razones incluyen:

- Excelente adherencia: Las resinas epóxicas tienen una gran capacidad para adherirse a una amplia variedad de rellenos, agentes de refuerzo y también sustratos. Esto significa que pueden formar enlaces fuertes, con mejoradas propiedades y materiales más duraderos. Lo que resulta en una excelente transferencia de carga entre fibras naturales o artificiales y la matriz polimérica. [6]
- Versatilidad en propiedades: Existe una amplia variedad de resinas epóxicas disponibles en el mercado, junto con diferentes agentes de secado o curado, lo que permite formular compuestos con una amplia gama de propiedades después del curado. Esto significa que las resinas pueden adaptarse para cumplir con requisitos específicos de procesamiento y propiedades deseadas. [6]
- Baja liberación de compuestos volátiles: La reacción química entre la resina epóxica y el agente de curados que en este caso es el catalizador no produce liberación de compuestos volátiles o agua. Esto es beneficioso tanto para la seguridad del operador como para la calidad del producto final, ya que no es un material invasivo y no produce daños en los materiales de refuerzo. También evita la creación de burbujas o problemas de porosidad en el curado, lo que ayuda a que sea un compuesto lizo y con grandes propiedades mecánicas. [6]
- Resistencia química: Las resinas epóxicas curadas son conocidas por su excelente resistencia a una amplia gama de productos químicos. la resistencia química de las resinas epoxi ayuda a que el material sea adecuado para el uso

en entornos agresivos donde otros materiales podrían verse afectados por la corrosión o la degradación química. [6]

- Buen aislamiento eléctrico: Las resinas epóxicas curadas ofrecen buenas propiedades de aislamiento eléctrico. Lo que las convierte en una opción ideal para aplicaciones que requieren materiales aislantes, como componentes eléctricos y sistemas conexión de cables. [6]

#### **1.4.6. Fibras**

##### ***1.4.6.1. Cáñamo (Hemp)***

El término “Cáñamo” es utilizado para describir una variedad proveniente del Cannabis. Los productos que se generan a partir de esta planta pueden ser en varias presentaciones: semillas o fibras y aceites. En contraste al uso industrial que se le pueda dar a esta materia prima, se la utiliza de forma recreacional es por ello que en varios países del mundo su cultivo y eventual consumo está prohibido. [7]

En el Ecuador, por ejemplo, actualmente se está utilizando el Cannabis para uso medicinal y para productos como jabones, cremas y aceites. A nivel industrial y en específico para el sector de la construcción no se observa aún productos para la venta.

El cáñamo utilizado a nivel industrial es una cepa proveniente del Cannabis y posee como una particularidad un porcentaje de 0.3% de tetrahidrocannabinol; sin embargo, y según el **artículo 127 de la Ley Orgánica Reformatoria al Código Orgánico Integral Penal**, en el Ecuador es permitido que el porcentaje de tetrahidrocannabinol se encuentre por debajo del 1% en peso seco. En general, en el país está permitido su cultivo con fines medicinales y para productos de uso personal. [7]

En particular, el cáñamo puede ser utilizado para cubrir varios aspectos de la vida de las personas: vivienda, alimentación y vestimenta. Varios investigadores y emprendedores fabrican productos de uso diario. [7]

El cáñamo es un material muy versátil y se lo puede aplicar, como materia prima, para varios productos en distintas presentaciones: semillas, aceites, combustible, prendas de vestir y resinas, además que su uso es vasto para el sector de la construcción. [7]

La presentación en la cual se utiliza el cáñamo para el sector de la construcción es en fibras pequeñas o alargadas. Sus aplicaciones van, en efecto, desde un componente dentro del proceso productivo y como un material relevante para la estructura. Su uso es mayormente utilizado como aislante en climas fríos o como un importante aislante acústico. [7]



*Figura 3: Cáñamo procesado [7]*

El cáñamo está constituido por elementos denominados como “Hurd” o “Shiv” y son el núcleo de la planta de cáñamo que, además, poseen una consistencia leñosa. Porcentualmente, constituyen del 60% al 70% del tallo, mientras que el porcentaje faltante es un contenido de fibra que va del 30% al 40%. Y ya sea que el cultivo de la planta se realice como fibra o semilla el cáñamo, en un contexto general, se considera como un subproducto. [8]



*Figura 4: Partes del cáñamo -tallo, Hurd or Shiv, fibras [9]*

Varios análisis químicos muestran que los denominados “Hurds” del cáñamo se componen de varios elementos: alfa celulosa 44%, hemicelulosa 25%, lignina 23%, extractos 4% -aceites, aminoácidos, proteínas y pectina-; finalmente tiene porcentaje de ceniza de 1.2%. [8]

Existe una discrepancia con respecto a la inclusión de fibras con el Hurd del cáñamo para formar el compuesto. En general, según lo indica **Magwood C. (2016)**, el contenido de fibra de cáñamo que sobrepase un valor del 10% al 20% dificulta en gran medida el proceso de mezclado de los materiales, aumenta el tiempo de secado y la densidad. [8]

*Tabla 2: Impactos ambientales del Hemp Hurd [8]*

<b>Impactos al ecosistema</b>	<b>Energía incorporada</b>	<b>Huella de carbono</b>	<b>Ambiente interior</b>	<b>Residuos</b>
<b>Bajo</b>	<b>Muy baja</b>	<b>Baja</b>	<b>Baja</b>	<b>Baja</b>
La producción de cáñamo involucra el uso de pesticidas o herbicidas en pequeñas proporciones, eventualmente el uso de estos químicos puede ser nulo. Además, el cultivo de cáñamo se lo realiza en locaciones alejadas.	1.0-6.19 MJ/kg  Valor de referencia de energía que se aporta para la producción de Hemp Hurd.	0.56  kgCO2/kg	No existe evidencia de toxinas en el material o emisión de gases.	Hemp Hurd sin uso inicial puede almacenarse de forma indefinida. De igual manera, una vez realizada la mezcla para formar hempcrete es posible reciclar para formar nuevamente el compuesto.

## Hemp Hurd

Para obtener el Hemp Hurd proveniente de área interna del tallo que forma parte de la planta del cáñamo, se procede a realizar un proceso de decorticación que consiste en separar las fibras del núcleo. Tradicionalmente se lo utiliza como material para construcción por sus propiedades inherentes: alta resistencia al fuego y aislante. [9]



*Figura 5: Hemp Hurd Grades: a) Fino, b) Medio, c) En rama (Puro o Crudo). [9]*

## Hemp Fibre

Para obtener el Hemp Fibre proveniente de área externa del núcleo del tallo que forma parte de la planta del cáñamo, se procede a realizar un proceso de decorticación que consiste, de igual manera, en separar las fibras del núcleo leñoso. Una característica importante de estas fibras es que son de las más fuertes alrededor del mundo. [9]



*Figura 6: Hemp Fibre Grades: a) Fino, b) Medio, c) En rama (Puro o Crudo). [9]*

### 1.4.6.2. Goma de neumáticos pulverizados

Los neumáticos que son parte integral de los automóviles resultan una fuente de desecho una vez que culmina su vida útil y, en general, el uso que se podría dar con un tratamiento adecuado es muy variado. El uso puede ir desde el sector textil hasta aplicaciones enfocadas en la construcción. [10]

El reciclaje de neumáticos es un tema a tratar y resulta de gran preocupación debido a la complejidad de su estructura y composición química ya que contiene elementos tóxicos y metales pesados que son difíciles de tratar. En Estados Unidos, por ejemplo, anualmente se generan aproximadamente 270 millones de neumáticos. Esto, en consecuencia, promueve la necesidad de buscar una forma de tratar estos desechos y aprovecharlos de una mejor manera por lo que se busca, a nivel mundial, procesos factibles para reutilizar o tratar los neumáticos provenientes de automóviles. En el mercado del reciclaje se han instaurado metodologías para reutilizar las llantas con la finalidad de disminuir la contaminación que producen. [10]



*Figura 7: Neumático pulverizado [10]*

Los métodos de reciclado se realizan de distintas maneras: reencauchado, incineración y trituración para la producción de partículas de tamaño reducido que se pueden utilizar como matrices en materiales compuestos, en el sector de la construcción en el asfalto y el hormigón y con polímeros. [10]

El caucho del neumático se compone de una mezcla de caucho natural o caucho sintético, junto con otros aditivos y compuestos químicos. Estos aditivos pueden incluir agentes de relleno, que mejora la resistencia al desgaste y proporciona una mejor tracción en diferentes condiciones de la carretera. También pueden incorporarse agentes de refuerzo, antioxidantes y plastificantes, entre otros, para mejorar la estabilidad, la resistencia y la flexibilidad del caucho. El neumático pulverizado se refiere al material resultante de la trituración o molienda de neumáticos usados. Consiste en partículas pequeñas de caucho provenientes de los neumáticos que han sido sometidos a un proceso de desmenuzados. [10]

El caucho reciclado tiene diversas aplicaciones en diferentes industrias. En el ámbito de la construcción, se utiliza como relleno en superficies de asfalto para mejorar la



resistencia y la durabilidad de las carreteras. También se emplea en la fabricación de pisos deportivos y en campos de césped artificial, donde proporciona una superficie elástica y amortiguadora. [10]

En la industria del caucho, el neumático pulverizado se utiliza como un componente en la producción de nuevos productos de caucho, como alfombras, suelas de zapatos, tapetes y productos moldeados. Además, se utiliza en la fabricación de productos como aislantes acústicos, pisos de seguridad y productos de caucho moldeado. El uso de neumáticos contribuye a la reutilización y el reciclaje de los neumáticos usados, lo que ayuda a reducir el impacto ambiental y la acumulación de residuos. [10]

### **Reencauchado**

El proceso de reencauchado es útil para prolongar la vida útil del neumático que ya fue utilizado. Se realiza quitando la capa superior del neumático y reemplazándola por una nueva que se adhiere a la base mediante un proceso de acoplamiento que puede ser en frío o en caliente. [10]

Uno de los limitantes para poner en práctica este proceso es que solo se solo puede utilizar si la totalidad de la llanta se encuentra en buen estado posterior a una inspección. [10]

Es rentable la aplicación de esta práctica debido a que es ecológicamente eficiente y no genera desperdicios en una cantidad mínima que, eventualmente, pueden ser utilizados en matrices para producir materiales compuestos con polímeros y concreto. La desventaja proveniente de esta práctica son la calidad del producto final que provoca, de igual manera, un bajo nivel de seguridad para los automóviles que los utilizan a altas velocidades. Esto limita de cierta forma su uso para vehículos que transportan personas. [10]

### **Incineración**

El proceso de incineración se inicia al superar los 400 grados centígrados. Todo lo que se recupera de este proceso se lo utiliza para la producción de pinturas y tintas. Los beneficios que provoca la incineración son el bajo costo de aplicación la recuperación de energía. En contraste, la incineración genera contaminación atmosférica. [10]

### **Neumático como material compuesto**

Los neumáticos contienen fibras naturales y sintéticas que son adecuadas como refuerzos en matrices de materiales compuestos. El uso de neumáticos con productos base disminuyen en gran volumen el costo de producción final. Un claro ejemplo de ellos en el sector de la construcción es la adición de neumáticos triturados en el asfalto para carreteras. El uso de este material deja una mejor superficie, produce una mayor estabilidad térmica en el material final y el más resistente. [10]

Otro uso, en el sector de la construcción, que se le da a este material es al mezclarlo con cemento para producir hormigón, mejoran así sus propiedades y características propias: mayor resistencia a la flexión, cargas dinámicas y disminución del agrietamiento. Estos materiales compuestos provocan varias reacciones en la mezcla final: mejora el aislamiento térmico del producto, mejoramiento en las propiedades acústicas, permeabilidad y humedad. Finalmente pueden ser utilizados para fabricar alfombras, espacios para juegos, pistas deportivas y elementos para automóviles. [10]

Los neumáticos triturados con pequeños tamaños ayudan a mejorar la distribución de la matriz y provoca, de igual forma, una mejor unión entre los elementos. El proceso de triturado se puede realizar de varias formas mediante criogenia, en el ambiente y mediante un proceso denominado como húmedo. El tamaño de las partículas puede variar entre 50 y 300 mm hasta un valor menor a 500 micras. Es importante mencionar que el tamaño de las partículas tiene un efecto directo en el comportamiento del producto final y en sus propiedades inherentes. [10]

El proceso de molienda convencional o de ambiente se basa en la aplicación de presión entre rodillos para que, de esta manera, disminuya el tamaño de las partículas del neumático. El aumento de pasos de las partículas en este proceso disminuye consecuentemente su tamaño aumentando, de esta manera, el costo de la producción. [10]

#### **1.4.6.3. PET (Polietileno tereftalato)**

El plástico Tereftalato de polietileno también conocido por sus siglas en inglés PET, es un material ampliamente empleado para la fabricación de botellas para bebidas, jugos, detergentes y otros. Pero su uso puede conllevar un desafío en términos de la contaminación ambiental. La mayoría de los residuos que se depositan en los

vertederos de la ciudad no son biodegradables, incluyendo el PET que es principalmente utilizado en botellas para embazar bebidas. El PET tiene un tiempo de descomposición más largo en comparación con otros componentes. Esta problemática nos lleva a considerar la posibilidad de utilizar este material junto con otros en el ámbito de la construcción como una opción más rentable y sostenible. [11]



*Figura 8: Plástico PET triturado [11]*

Este tipo de plástico se obtiene mediante la polimerización del etilenglicol y el ácido tereftálico. El resultado es una resina fuerte y liviana que se moldea fácilmente en diferentes formas y tamaños. El PET es ampliamente utilizado en la industria de bebidas, en botellas de agua, refrescos y envases para alimentos. También se utiliza en la fabricación de fibras textiles, como el poliéster, que se utiliza en prendas de vestir, alfombras y textiles para el hogar. [11]

El plástico PET tiene características como material individual que va a ayudar a la fabricación del material compuesto. Por lo que el tereftalato de polietileno tiene las siguientes propiedades mecánicas, térmicas y químicas. [12]

**Tabla 4.** Ratios de aglutinante. Fuente: [12]

<b>Datos técnicos del Polietileno tereftalato (PET)</b>		
<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>		
<b>Peso específico</b>	gr/cm <sup>3</sup>	139
<b>Resistencia a la tracción</b>	kg/cm <sup>2</sup>	900
<b>Resistencia a la flexión</b>	kg/cm <sup>2</sup>	1450
<b>Alargamiento a la rotura</b>	%	15
<b>Módulo de elasticidad</b>	kg/cm <sup>2</sup>	37000
<b>Resistencia al desgaste por roce</b>	MUY BUENA	
<b>Temperatura de fusión</b>	°C	255
<b>Conductividad térmica</b>	Baja	

<b>Temperatura de deformabilidad por calor</b>	°C	170
<b>Coefficiente de dilatación lineal de 23 a 100°C</b>	mm por °C	0.00008
<b>PROPIEDADES ELÉCTRICAS</b>		
<b>Absorción de humedad</b>	%	0.25
<b>PROPIEDADES QUÍMICAS</b>		
<b>Comportamiento a la combustión</b>	Arde con mediana dificultad	
<b>Propagación de llama</b>	Mantiene la llama	
<b>Comportamiento al quemado</b>	Gotea	

#### 1.4.7. Ensayos mecánicos

##### 1.4.7.1. Ensayo de compresión

Para llevar a cabo el ensayo según las directrices establecidas en la norma ASTM D695, se deben emplear las especificaciones y medidas correspondientes para fabricar una probeta con las dimensiones adecuadas requeridas para la realización del ensayo. Los ensayos de compresión constituyen una valiosa herramienta para evaluar la seguridad, durabilidad e integridad de materiales y componentes, aspectos de suma importancia para un análisis exhaustivo del material en cuestión. Estos ensayos permiten obtener información precisa y relevante acerca de las propiedades y comportamiento del material bajo cargas de compresión, lo que contribuye a una mejor comprensión de su desempeño y aplicaciones potenciales. [13]

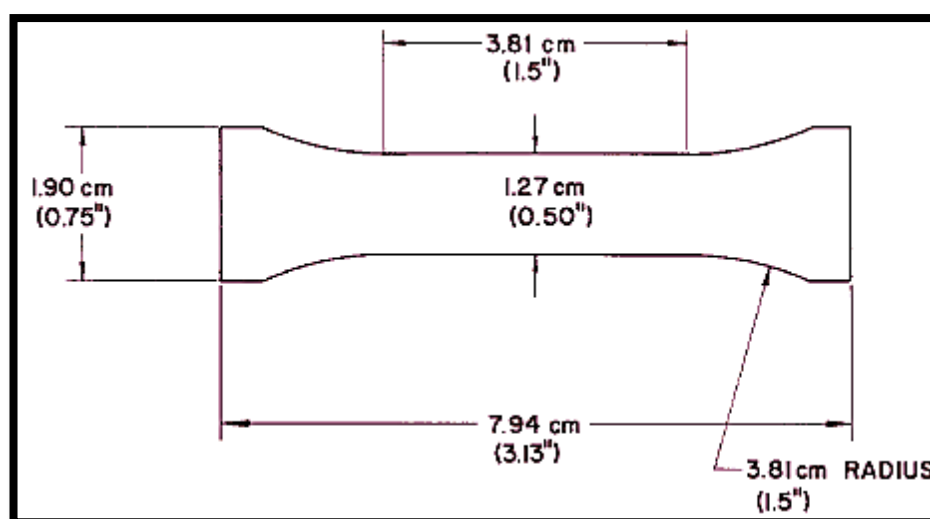


Figura 9: Probeta del ensayo de compresión [13]

##### 1.4.7.2. Ensayo de flexión

Utilizando el procedimiento descrito en la Norma ASTM D7264, es posible determinar la rigidez a flexión y la resistencia a la deflexión de un material

compuesto. Este método implica el uso de una máquina universal, donde se ajustan los parámetros específicos establecidos en la normativa correspondiente. Es importante destacar que el material compuesto debe estar compuesto por una matriz polimérica con fibras como refuerzo, y las probetas utilizadas deben ser fabricadas de acuerdo con el esquema gráfico proporcionado. [14]

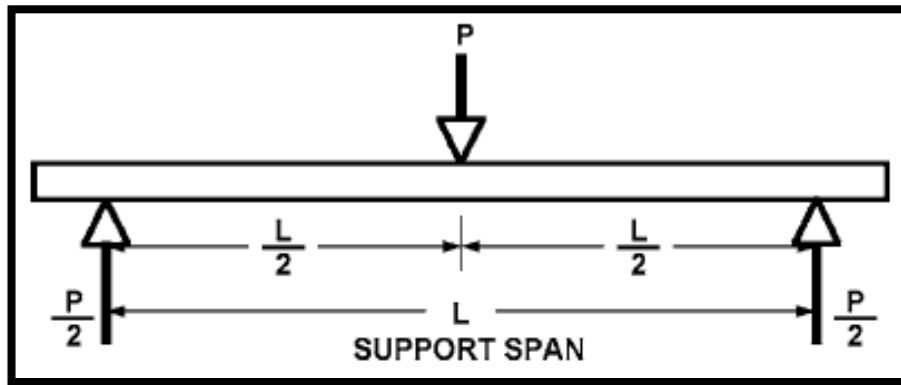


Figura 10: Probeta para ensayo a flexión [14]

#### 1.4.7.3. Ensayo de tracción

A través de la realización de este ensayo, es posible evaluar diversas propiedades de la muestra, como resistencia, ductilidad y elasticidad, entre otras, que son relevantes para el análisis. Este ensayo se rige por la norma ASTM D3039, la cual proporciona los parámetros necesarios tanto para la preparación de las muestras del material como para la calibración de la máquina de ensayos. [13]

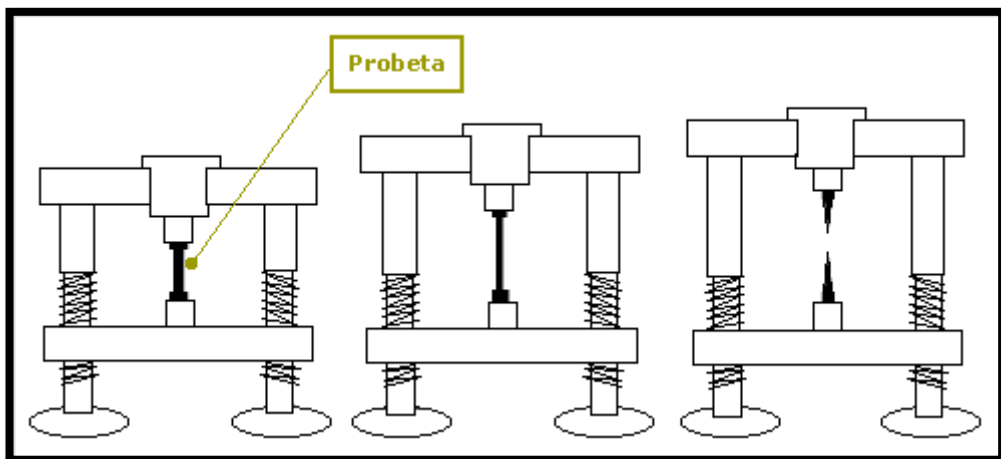


Figura 11: Ensayo de tracción [13]

#### ***1.4.7.4. Prueba SEM***

El ensayo SEM (Microscopía Electrónica de Barrido) es una técnica de imagen avanzada utilizada en la investigación y análisis de materiales y muestras biológicas. Consiste en un microscopio que emplea un haz de electrones para explorar la superficie de la muestra y generar imágenes de alta resolución en tres dimensiones. Esta técnica permite observar con gran detalle la morfología y estructura superficial de diferentes materiales, revelando características como la forma, el tamaño y la distribución de las partículas y componentes. [15]

Esta técnica se utiliza ampliamente en diversas áreas de investigación, como la ciencia de materiales, la biología, la geología y la ingeniería. El ensayo SEM permite obtener información valiosa sobre la microestructura de los materiales, la calidad de las superficies, la presencia de contaminantes y la identificación de elementos presentes en la muestra. Debido a su capacidad para revelar detalles a nivel microscópico, el ensayo SEM es una herramienta fundamental en la caracterización y análisis de diversos materiales y muestras, contribuyendo al avance científico y tecnológico en numerosos campos. [15]

### **1.5. HIPÓTESIS**

Se plantea que el material compuesto 2, con una matriz de resina epóxica y un refuerzo de 35% compuesto por cáñamo, plástico PET y neumático, exhibirá un rendimiento mecánico superior en comparación con el material compuesto 1, que emplea exclusivamente con un 35% de cáñamo como material de refuerzo.

## CAPITULO II





### METODOLOGÍA

#### 2.1. MATERIALES





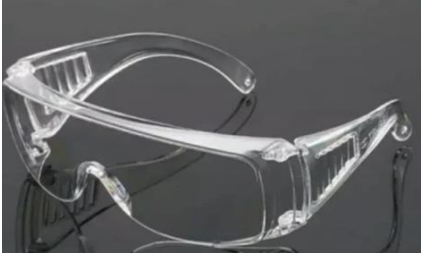
En la siguiente tabla se especifica los materiales y equipos que se utilizan para la elaboración del material compuesto:



*Tabla 3: Materiales y equipos*

Material	Descripción	Fotografía
<b>Fibra de cáñamo</b>	Hemp Fibre que es la fibra del cáñamo proveniente de la parte externa del núcleo del tallo, con la textura obtenida al realizar un proceso de decorticación que consiste en separar las fibras del núcleo leñoso.	
<b>Plástico PET triturado</b>	Es un tipo de polímero termoplástico que se utiliza comúnmente en la fabricación de envases y botellas. Es conocido por su alta transparencia, resistencia al impacto y rigidez.	
<b>Neumático pulverizado</b>	El neumático pulverizado se refiere al material resultante de la trituración o molienda de neumáticos usados	

<p><b>Resina epóxica</b></p>	<p><b>Resina epóxica de uso industrial y de alto rendimiento a fase de polímero. Parte A de la mezcla.</b></p>	
<p><b>Endurecedor</b></p>	<p>Parte B de la mezcla que funciona como endurecedor. Se mezcla con una relación 2:1, es decir dos partes de resina y una parte de endurecedor.</p>	
<p><b>Embaces plásticos</b></p>	<p>Embaces plásticos para pesar la cantidad de resina y de endurecedor según los cálculos realizados. Utilizando la relación 2:1.</p>	
<p><b>Cera desmoldante</b></p>	<p>Cera utilizada para poner en el molde antes de colocar la resina y los componentes de refuerzo, para que al momento de retirar el material compuesto no se pegue al molde de acrílico.</p>	



<p><b>Molde</b></p>	<p>Molde fabricado con acrílico transparente. Armado con silicona caliente para desmoldar con más facilidad.</p>	
<p><b>Calibrador pie de rey</b></p>	<p>Herramienta de medición de alta precisión utilizada para medir dimensiones, por lo que se utiliza para medir el espesor de las probetas.</p>	
<p><b>Guaípe</b></p>	<p>El guaípe se utiliza para la limpieza de las herramientas utilizadas en la preparación de las probetas.</p>	
<p><b>Guantes</b></p>	<p>El uso de guantes es importante ya que se utiliza resina epóxica y puede ser perjudicial al contacto directo.</p>	
<p><b>Gafas</b></p>	<p>Las gafas se utilizan como equipo de protección para evitar que salpique algún material que sea nocivo para la vista.</p>	

<p><b>Mascarilla</b></p>	<p>Al utilizar mascarilla evitamos inhalar agentes nocivos que puedan emanar al realizar la mezcla de la resina o al colocar la cera desmoldante.</p>	
<p><b>Balanza electrónica</b></p>	<p>Instrumento de medición utilizado para determinar la masa de un objeto con precisión. Utilizado para medir las cantidades exactas de los materiales utilizados.</p>	

Fuente: Autor

## 2.2. MÉTODOS

### 2.2.1. Tipos de investigación

#### 2.2.1.1. Investigación exploratoria:

En este proyecto, se utilizó un enfoque de investigación exploratoria para determinar las fracciones volumétricas y la configuración de refuerzo más adecuadas con el fin de analizar el comportamiento mecánico del material compuesto. [16]

#### 2.2.1.2. Investigación descriptiva:

Este estudio se enmarca en una investigación descriptiva, ya que su objetivo es describir las diferentes propiedades mecánicas que presenta el material compuesto después de realizar los ensayos de flexión, compresión y tracción, así como el proceso de elaboración de las probetas. [16]

#### 2.2.1.3. Investigación bibliográfica:

La información utilizada en este trabajo experimental se recopiló a través de tesis, libros, artículos científicos, páginas web y otras fuentes secundarias, como resúmenes y artículos técnicos actualizados. [16]

#### ***2.2.1.4. Investigación experimental:***

Este proyecto se basa en una investigación experimental, ya que, mediante la fabricación de probetas para realizar diferentes ensayos y el análisis de los resultados obtenidos, se pudo determinar la aplicabilidad industrial de este nuevo material compuesto. [16]

#### **2.2.2. Población y muestra**

##### ***2.2.2.1. Población***

En el proyecto se utiliza como población el material compuesto propuesto para la investigación que están formados por: el **material compuesto 1** por resina epóxica más fibra de cáñamo, y el **material compuesto 2** fabricado con resina epóxica más fibra de cáñamo, plástico triturado y con neumático pulverizado. Indicando cada una de sus fracciones volumétricas y las configuraciones de los refuerzos según la norma utilizada. [17]

- **Material 1:** 65% de matriz (resina epóxica) – 35% de refuerzo (cáñamo).
- **Material 2:** 65% de matriz (resina epóxica) – 35% de refuerzo (20% cáñamo – 10% de plástico PET triturado – 5% de neumático pulverizado).

##### ***2.2.2.2. Muestra***

En las normas ASTM indican que se realizan por lo menos 5 probetas de cada ensayo para obtener resultados factibles por lo que el número de probetas que se va a realizar para los dos materiales y cada ensayo quedaría así: [17]

**Material 1:** (resina epóxica + cáñamo)

- Para ensayos de compresión 5 probetas
- Para ensayos de tracción 5 probetas
- Para ensayos de flexión 5 probetas

**Material 2:** (resina epóxica + cáñamo + PET triturado + neumático pulverizado)

- Para ensayos de compresión 5 probetas
- Para ensayos de tracción 5 probetas
- Para ensayos de flexión 5 probetas

A las probetas se le realizan ensayos a compresión utilizando la Norma ASTM D695, para el ensayo a tracción se utiliza la Norma ASTM D3039 y en el caso del ensayo flexión se usa la Norma ASTM D7264. Y finalmente se comparan los resultados y se selecciona el material con mejores propiedades mecánicas. [17]

### 2.2.3. Operacionalización de variables

#### 2.2.3.1. Variables independientes

Tabla 4: Variable independiente [17]

<b>V.I.: Cábano, envases plásticos PET, goma de neumáticos pulverizados</b>				
Conceptualización	Categorías	Indicadores	Índice	Instrumentos
Material híbrido a partir de la resina epóxica como matriz del compuesto y de refuerzo la fibra de cáano con envases plásticos PET triturado y goma de neumáticos pulverizados	Material híbrido	Porcentaje de envases plásticos PET	10% - 15%	Normas Especificaciones Investigaciones previas Revisión de literatura Análisis bibliográfico Observación <i>In Situ</i>
		Porcentaje de goma de neumáticos pulverizados	5% - 10%	
	Optimización	DOE	Varianza	Software Estadístico

Fuente: Autor

#### 2.2.3.2. Variables dependientes

Tabla 5: Variable dependiente [17]

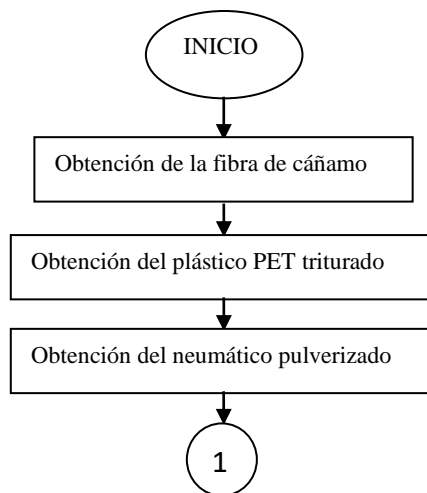
<b>V.D.: Propiedades mecánicas</b>				
Conceptualización	Categorías	Indicadores	Índice	Instrumentos
Al añadir material de refuerzo a la resina epóxica que influyan en sus características de comportamiento ante una acción externa es requirente que se analice a partir del	Compresión	Resistencia a la compresión	110 MPa	Norma ASTM D695 Revisión de literatura Análisis bibliográfico Observación <i>In Situ</i> Ensayo de compresión

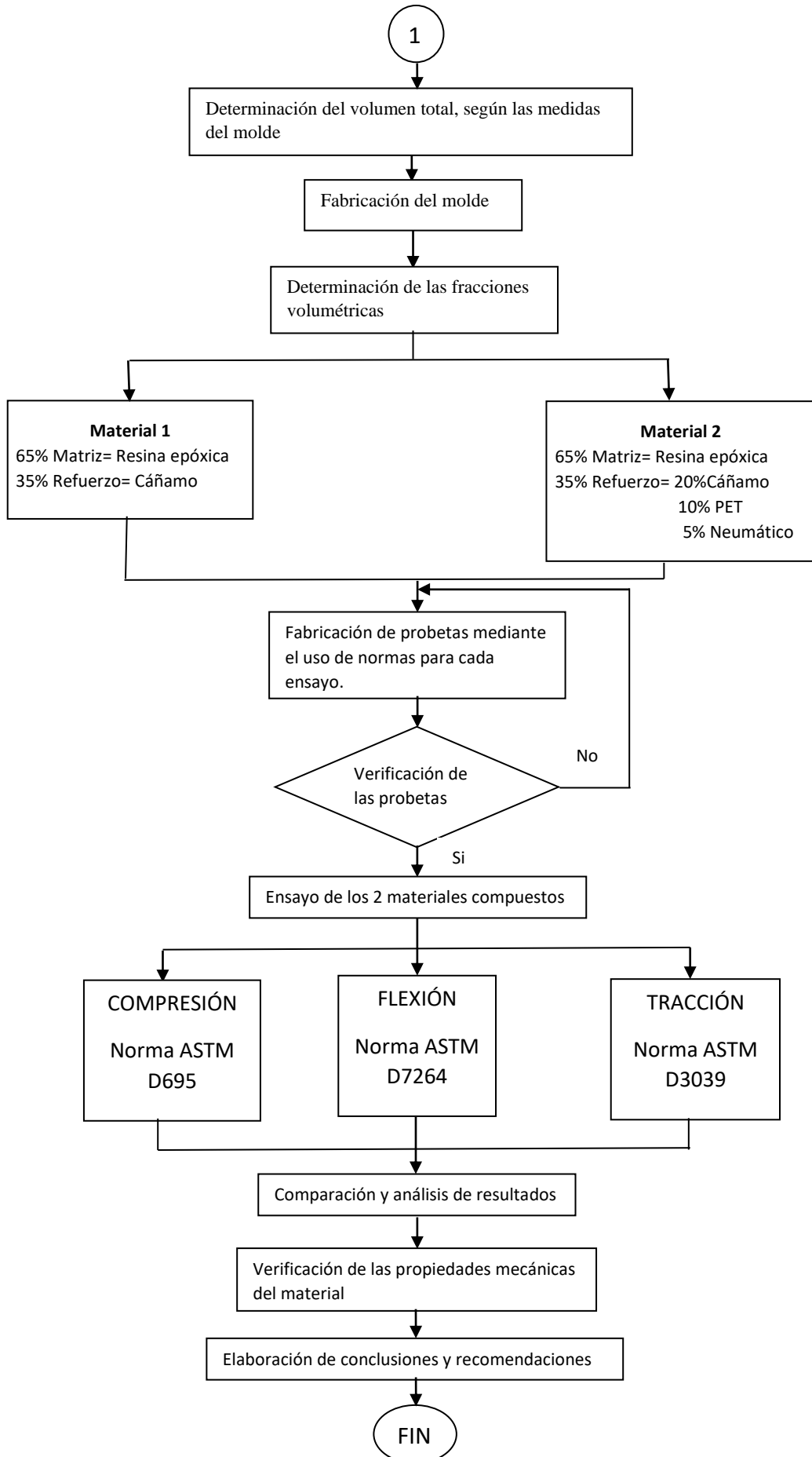
uso de normativas y/o material bibliográfico relevante que asevere las nuevas propiedades que obtendrá el material	Flexión	Resistencia a la flexión	130 MPa	Especificaciones Investigaciones Norma ASTM D7264
	Tracción	Resistencia a la tracción	80 MPa	Especificaciones Investigaciones previas al ensayo Análisis bibliográfico Norma ASTM D3039
	Microscopios electrónicos de barrido Pruebas SEM	Estructuras superficiales	¿Cuál es la Estructura Superficial?	Revisión de literatura Análisis bibliográfico
	Optimización	Coefficiente de determinación	0-100%	Software estadístico

Fuente: Autor

### 2.3. DIAGRAMA DE OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

Con el fin de llevar a cabo de manera adecuada el trabajo experimental, es esencial desarrollar un diagrama de proceso correspondiente que detalle de manera organizada los pasos a seguir, desde la obtención de los materiales hasta llegar a una conclusión a través del análisis de la investigación. [18]





## **2.4. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO**

### **2.4.1. Obtención de los materiales de refuerzo (cáñamo – PET – neumático)**

El cáñamo se obtiene del tallo de planta Cannabis Sativa, se consigue cuando cortan los tallos y los dejan secar. La extracción de la fibra de cáñamo se realiza mediante un proceso llamado decorticación, que consiste en separar la fibra externa de la fibra leñosa del tallo de la planta. La fibra resultante es larga, fuerte y duradera. [19]

Para obtener el plástico PET triturado se inicia con el reciclaje de botellas que en su mayoría son fabricadas por tereftalato de polietileno. Luego, los envases reciclables se someten a un proceso de separación y limpieza para eliminar etiquetas, tapas y cualquier otro material no deseado. Una vez limpio y separado, el PET se tritura en pequeños fragmentos mediante máquinas especiales. Estos fragmentos, conocidos como escamas de PET. [20]

El Caucho Pulverizado es el producto final obtenido durante el proceso de reciclaje de neumáticos, mediante la reducción de su tamaño. En esta etapa, el caucho se tritura hasta obtener un polvo fino, mientras se separa casi por completo el acero y las fibras textiles. El caucho pulverizado tiene diversas aplicaciones secundarias, como en productos moldeados por inyección, recubrimientos, materiales para techos y en distintas aplicaciones en la industria del asfalto. [21]

### **Densidad de la matriz y de los materiales de refuerzo**

Según lo indicado por las fichas técnicas e investigaciones previas de los materiales se determina los siguientes datos de la densidad de cada material utilizado para realizar los materiales compuestos. [22]

- Densidad de la resina epóxica:  $\rho_r = 1.06 \text{ gr/cm}^3$
- Densidad del cáñamo:  $\rho_c = 0.08 \text{ gr/cm}^3$
- Densidad del plástico PET:  $\rho_p = 1.38 \text{ gr/cm}^3$
- Densidad del neumático:  $\rho_n = 0.5 \text{ gr/cm}^3$

### **2.4.2. Determinación del volumen total**

De acuerdo al número de probetas de cada ensayo y a las medidas de las probetas según las normas ASTM utilizadas, se puede calcular el volumen total. Tomando en

cuenta un exceso de medida a lo largo y ancho del molde para realizar el corte de cada probeta. El espesor se colocó de 5 mm ya que, según las normas utilizadas para realizar las probetas, la medida del espesor es menor de 5 mm por lo que se puede lijar y pulir para llegar a la medida especificada. [22]

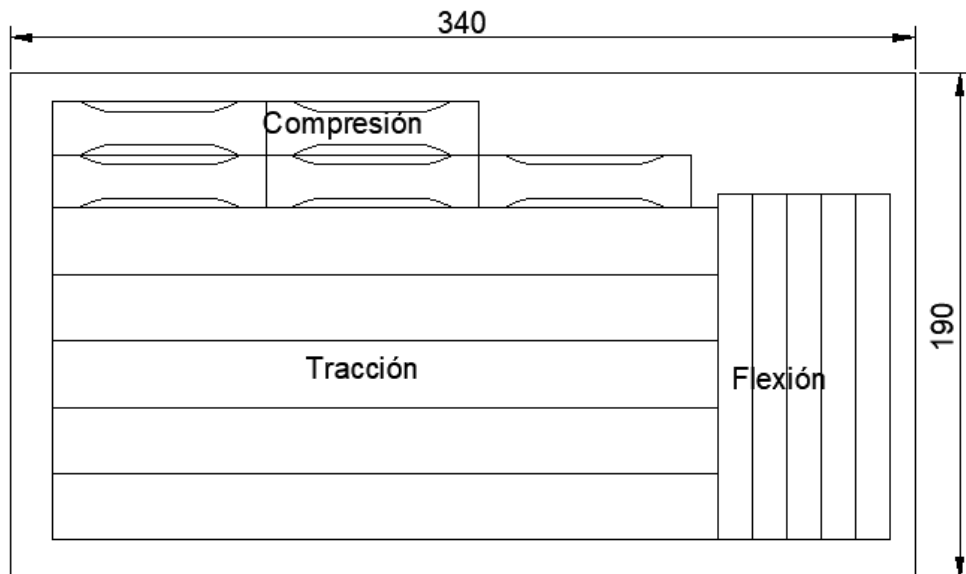
Datos de las dimensiones del molde:

- Largo:  $l = 340mm$
- Ancho:  $a = 190mm$
- Espesor:  $e = 5mm$

$$V_T = l * a * e \quad (1)$$

$$V_T = 340mm * 190mm * 5mm$$

$$V_T = 323 \text{ cm}^3$$

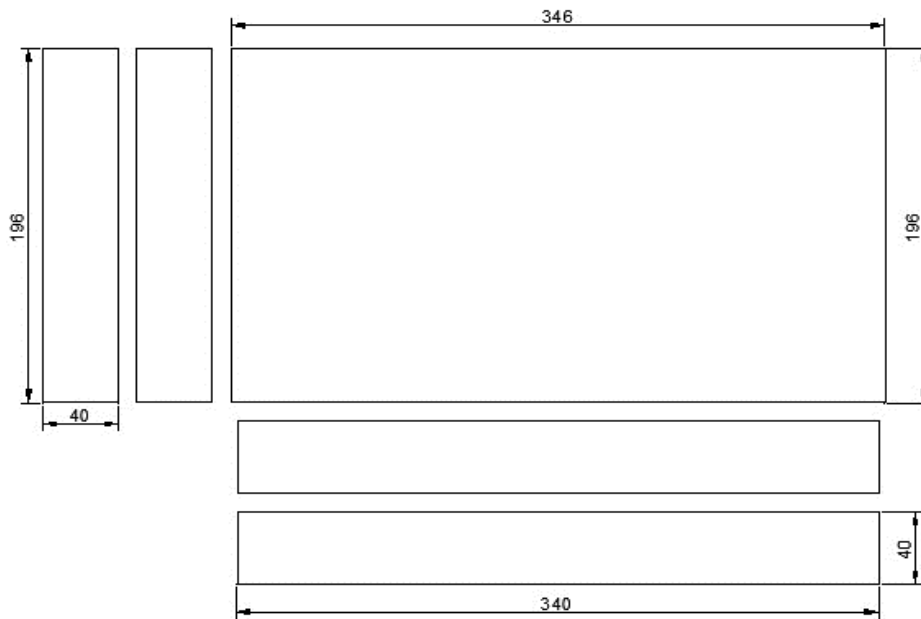


*Figura 12: Distribución de las probetas en el molde (mm)*

### 2.4.3. Fabricación del molde

Para la fabricación del molde se utilizó acrílico transparente de 3 mm para desmoldar con mayor facilidad, con las medidas exactas de la distribución de probetas se realiza el diseño del molde y se deja un excedente en la medida de la base para poder desarmar y armar de nuevo el molde. Se procede a cortar el acrílico con máquina de corte laser para asegurar la precisión de las medidas del molde. [22]





**Figura 13:** Medidas de los elementos del molde en (mm)

Una vez que el diseño ha sido completado en el software, el siguiente paso es materializarlo cortando las piezas en acrílico de 3 mm de espesor. Estas piezas son ensambladas utilizando silicona como adhesivo para facilitar su posterior desmontaje.



**Figura 14:** Molde de acrílico

#### **2.4.4. Determinación de las fracciones volumétricas**

La determinación de las fracciones volumétricas de un material compuesto es un proceso fundamental en la caracterización y análisis de estos materiales. Consiste en

calcular la proporción de cada componente presente en la mezcla y expresarla en términos de porcentaje. La información resultante es de gran importancia para evaluar las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas del material, así como para optimizar su rendimiento y diseñar nuevos materiales compuestos con características. [22]

- **Material 1:**

Fraccionamiento de la resina epóxica:  $f_{r1} = 65\%$

Fraccionamiento del cáñamo:  $f_{c1} = 35\%$

- **Material 2:**

Fraccionamiento de la resina epóxica:  $f_{r2} = 65\%$

Fraccionamiento del cáñamo:  $f_{c2} = 20\%$

Fraccionamiento del plástico PET:  $f_{p2} = 10\%$

Fraccionamiento del neumático:  $f_{n2} = 5\%$

### 2.4.5. Material compuesto 1

#### 2.4.5.1. Cálculo de la densidad del material compuesto 1

Datos conocidos.

$$\rho_r = 1.06 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_c = 0.08 \text{ gr/cm}^3$$

$$f_{r1} = 65\%$$

$$f_{c1} = 35\%$$

Cálculo de la densidad del material compuesto 1 conformado por: resina epóxica y fibra de cáñamo:

$$\rho_{MC1} = f_{r1} * \rho_r + f_{c1} * \rho_c \quad (2)$$

$$\rho_{MC1} = 0.65 * 1.06 \text{ gr/cm}^3 + 0.35 * 0.08 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_{MC1} = 0.717 \text{ gr/cm}^3$$

#### 2.4.5.2. Cálculo del volumen de la matriz (resina epóxica)

Una vez obtenido el volumen total y la fracción volumétrica de la matriz, se procede a calcular el volumen nominal necesario de la matriz. [22]

$$V_T = 323 \text{ cm}^3$$

$$f_{r1} = 65\%$$

Volumen de la resina epóxica  $V_{r1} = ?$

$$\frac{323 \text{ cm}^3}{V_{r1}} \times \frac{100\%}{65\%} \quad (3)$$

$$V_{r1} = 209.95 \text{ cm}^3$$

#### 2.4.5.3. Cálculo del volumen del refuerzo (cáñamo)

Con el volumen total y la fracción volumétrica del refuerzo del material compuesto, se procede a calcular el volumen nominal necesario del cáñamo. [22]

$$V_T = 323 \text{ cm}^3$$

$$f_{c1} = 35\%$$

Volumen de la fibra de Cáñamo  $V_{c1} = ?$

$$\frac{323 \text{ cm}^3}{V_{c1}} \times \frac{100\%}{35\%} \quad (4)$$

$$V_{c1} = 113.05 \text{ cm}^3$$

#### 2.4.5.4. Cálculo de la masa nominal de la matriz (resina epóxica)

$$m_{r1} = \rho_r * V_{c1} \quad (5)$$

$$m_{r1} = 1.06 \text{ gr/cm}^3 * 209.95 \text{ cm}^3$$

$$m_{r1} = 222.55 \text{ gr}$$

#### 2.4.5.5. Cálculo de la masa nominal del refuerzo (cáñamo)

$$m_{c1} = \rho_c * V_{c1} \quad (6)$$

$$m_{c1} = 0.08 \text{ gr/cm}^3 * 113.05 \text{ cm}^3$$

$$m_{c1} = 113.05 \text{ gr}$$

## 2.4.6. Material compuesto 2

### 2.4.6.1. Cálculo de la densidad del material compuesto 1

Datos conocidos.

$$\rho_r = 1.06 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_c = 0.08 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_p = 1.38 \text{ gr/cm}^3$$

$$\rho_n = 0.5 \text{ gr/cm}^3$$

$$f_{r2} = 65\%$$

$$f_{c2} = 20\%$$

$$f_p = 10\%$$

$$f_n = 5\%$$

Cálculo de la densidad del material compuesto 2 conformado por: resina epóxica, fibra de cáñamo, plástico PET triturado y neumático pulverizado:

$$\rho_{MC2} = f_{r2} * \rho_r + f_{c2} * \rho_c + f_p * \rho_p + f_n * \rho_n \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho_{MC2} &= 0.65 * 1.06 \text{ gr/cm}^3 + 0.2 * 0.08 \text{ gr/cm}^3 + 0.10 * 1.38 \text{ gr/cm}^3 \\ &\quad + 0.05 * 0.5 \text{ gr/cm}^3 \\ \rho_{MC2} &= 0.868 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

### 2.4.6.2. Cálculo del volumen de la matriz (resina epóxica)

Con el volumen total y la fracción volumétrica de la matriz, se calcula el volumen nominal necesario de la matriz. [22]

$$V_T = 323 \text{ cm}^3$$

$$f_{r2} = 65\%$$

Volumen de la resina epóxica  $V_{r2} = ?$

$$\frac{323 \text{ cm}^3}{V_{r2}} \times \frac{100\%}{65\%} \quad (8)$$

$$V_{r2} = 209.95 \text{ cm}^3$$

#### 2.4.6.3. Cálculo del volumen del refuerzo (cáñamo – PET – neumático)

Con el volumen total y la fracción volumétrica del refuerzo del material compuesto, se procede a calcular el volumen nominal necesario del cáñamo, del plástico PET y del neumático. [22]

$$V_T = 323 \text{ cm}^3$$

$$f_{c2} = 20\%$$

$$f_p = 10\%$$

$$f_n = 5\%$$

Volumen de la fibra de cáñamo  $V_{c2} = ?$

$$\frac{323 \text{ cm}^3}{V_{c2}} \times \frac{100\%}{20\%} \quad (9)$$

$$V_{c2} = 64.6 \text{ cm}^3$$

Volumen del plástico PET triturado  $V_p = ?$

$$\frac{323 \text{ cm}^3}{V_p} \times \frac{100\%}{10\%} \quad (10)$$

$$V_p = 32.3 \text{ cm}^3$$

Volumen del neumático pulverizado  $V_n = ?$

$$\frac{323 \text{ cm}^3}{V_n} \times \frac{100\%}{5\%} \quad (11)$$

$$V_n = 16.15 \text{ cm}^3$$

#### 2.4.6.4. Cálculo de la masa nominal de la matriz (resina epóxica)

$$m_{r2} = \rho_r * V_{c1} \quad (12)$$

$$m_{r2} = 1.06 \text{ gr/cm}^3 * 209.95 \text{ cm}^3$$

$$m_{r2} = 222.55 \text{ gr}$$

#### 2.4.6.5. Cálculo de la masa nominal del refuerzo (cáñamo – PET – neumático)

- Cáñamo

$$m_{c2} = \rho_c * V_{c2} \quad (13)$$

$$m_{c2} = 0.08 \text{ gr/cm}^3 * 64.6 \text{ cm}^3$$

$$m_{c2} = 5.17 \text{ gr}$$

- PET

$$m_p = \rho_p * V_p \quad (14)$$

$$m_p = 1.38 \text{ gr/cm}^3 * 32.3 \text{ cm}^3$$

$$m_p = 44.57 \text{ gr}$$

- Neumático

$$m_n = \rho_c * V_n \quad (15)$$

$$m_n = 0.5 \text{ gr/cm}^3 * 16.15 \text{ cm}^3$$

$$m_n = 8.08 \text{ gr}$$

## 2.5. MOLDEO EN SISTEMA ABIERTO

Una vez que el molde ha sido fabricado y las fracciones volumétricas han sido determinadas, es decir, la cantidad de fibra de cáñamo, plástico PET triturado, neumático pulverizado, resina epoxi y endurecedor a utilizar, se inicia el proceso de elaboración de las probetas destinadas a los ensayos mecánicos subsiguientes. Para llevar a cabo la elaboración de las probetas, se sigue un procedimiento previamente establecido, el cual se detalla a continuación: [23]

### 2.5.1. Preparación de la fibra

En el caso del cáñamo, se consiguió una mezcla del Hemp Hurd (tallo) y del Hemp Fibre (Fibra fina y dispersa), por lo que se separó el Cáñamo (Hemp fibre) para la fabricación del material compuesto. [9]



**Figura 15:** Preparación de la fibra

### **2.5.2. Preparación del molde**

Después de cortar y pesar la fibra, se procedió a la preparación del molde, la cual involucra una limpieza minuciosa del molde, asegurándose de que estén libres de cualquier tipo de impurezas o contaminantes.



**Figura 16:** Molde de acrílico

Posteriormente, se aplica un total de tres capas de agente desmoldante a la superficie del molde, siempre que este sea nuevo; en caso contrario, solo se requiere una capa de cera.



**Figura 17:** Cera desmoldante

### 2.5.3. Elaboración de la mezcla (resina epóxica + endurecedor)

En este caso, se siguió las instrucciones proporcionadas por el fabricante que indicaban una proporción de mezcla de 2:1, lo que significa que la masa total requerida para la resina se divide en tres partes, dos partes corresponden a la resina y una parte al endurecedor. De esta manera, se realizó el cálculo necesario para determinar la cantidad exacta de resina epoxi y endurecedor necesarios para la mezcla. [3]

Masa de la resina epóxica 65%  $m_{r1} = 222.55 \text{ gr}$

$$222.55 \text{ gr} \div 3 = 74.18 \text{ gr} \quad (16)$$

Masa de la resina = 148.36 gr

Masa del endurecedor = 74.18gr



*Figura 18: Preparación de la resina epóxica*

Utilizando la balanza eléctrica se pesó la resina y el endurecedor para realizar la mezcla correcta para cada configuración de los materiales compuestos.

*Tabla 6: Fracciones volumétricas*

	Elementos	Fracciones volumétricas (%)	Volumen ( $cm^3$ )	Masa (gr)
Material 1	Resina Epóxica	65%	209.95	222.55
	Cáñamo	35%	113.05	113.05
Material 2	Resina Epóxica	65%	209.95	222.55
	Cáñamo	20%	64.6	5.15
	PET	10%	32.3	44.57
	Neumático	5%	16.15	8.08



#### 2.5.4. Distribución de la matriz y el refuerzo en el molde

Inicialmente, se coloca una capa de resina sobre el molde y luego se extiende uniformemente para liberar las burbujas de aire atrapadas en la mezcla. Esta técnica se emplea para evitar la formación de porosidad en el material compuesto, como se muestra en la figura. [22]



*Figura 19: Distribución de la matriz y el refuerzo en el molde*

Después de colocar la fibra de cáñamo, se elimina cualquier burbuja de aire atrapada en el proceso para que no perjudique el material compuesto. [22]

- En el caso del Material 1 solo se aplica la última capa de resina epóxica para que todas las fibras se queden contenidos en la resina.
- En el Material 2 se mezcla el plástico PET triturado con el neumático pulverizado para esparcir en el molde de manera uniforme y finalmente se le coloca la última capa de resina epóxica.

#### 2.5.5. Desmoldar el material compuesto

Al cabo de 72 horas aproximadamente de haber permitido el proceso de curado, el material compuesto es cuidadosamente extraído del molde. Antes de proceder a cortar las probetas con las medidas necesarias hay que lijar para eliminar ciertos desperfectos del material compuesto. [22]



*Figura 20: Desmoldar el material compuesto*

## 2.6. DIMENSIONES DE LAS PROBETAS PARA LOS ENSAYOS

El dimensionamiento de las muestras para los distintos ensayos mecánicos se llevó a cabo siguiendo las directrices establecidas por las normas ASTM, y se encuentra detallado en las tablas correspondientes. [22]

**Flexión:** Según la Norma ASTM D7264 que especifica el método estándar para ensayo de flexión en un material compuesto de matriz polimérica. [13]

*Tabla 7: Dimensiones para el ensayo de flexión*

	Configuración	Número de probetas	Ensayo	Dimensión (mm)
Material 1	aleatorio-discontinuo	5	Flexión	130 x 13 x 4.0
Material 2	aleatorio-discontinuo	5	Flexión	130 x 13 x 4.0

Fuente: Autor

**Tracción:** Según la Norma ASTM D3039 que especifica el método estándar para ensayo de tracción en un material compuesto de matriz polimérica. [13]

*Tabla 8: Dimensiones para el ensayo de tracción*

	Configuración	Número de probetas	Ensayo	Dimensión (mm)
Material 1	aleatorio-discontinuo	5	Tracción	250 x 25 x 2.5
Material 2	aleatorio-discontinuo	5	Tracción	250 x 25 x 2.5

Fuente: Autor

**Compresión:** Según la Norma ASTM D695 que especifica el método estándar para ensayo a compresión en un material compuesto de plástico rígido. [13]

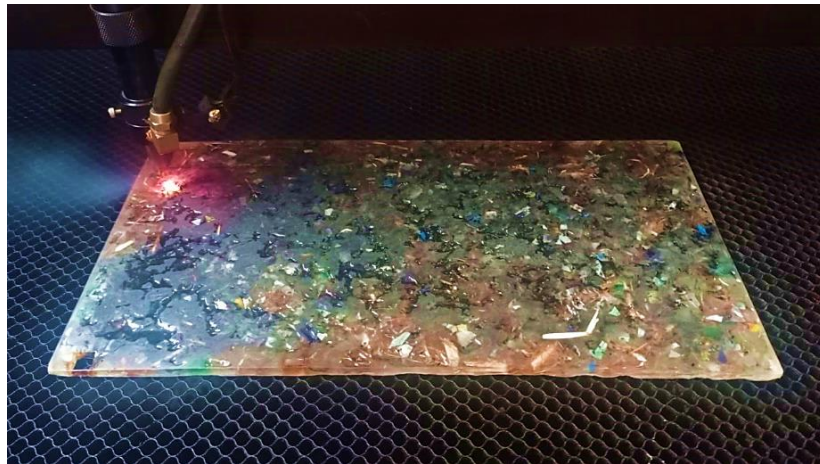
*Tabla 9: Dimensiones para el ensayo de compresión*

	Configuración	Número de probetas	Ensayo	Dimensión externa (mm)
Material 1	aleatorio-discontinuo	5	Compresión	79.4 x 19 x 3.2
Material 2	aleatorio-discontinuo	5	Compresión	79.4 x 19 x 3.2

Fuente: Autor

## 2.7. CORTE DE LAS PROBETAS

Después de dimensionar las muestras, se procede a cortar el material compuesto para llevar a cabo los diversos ensayos mecánicos mencionados anteriormente. Este proceso de corte se realiza utilizando una máquina láser, como se muestra en la figura ilustrativa. [22]



*Figura 21: Proceso de corte de las probetas*

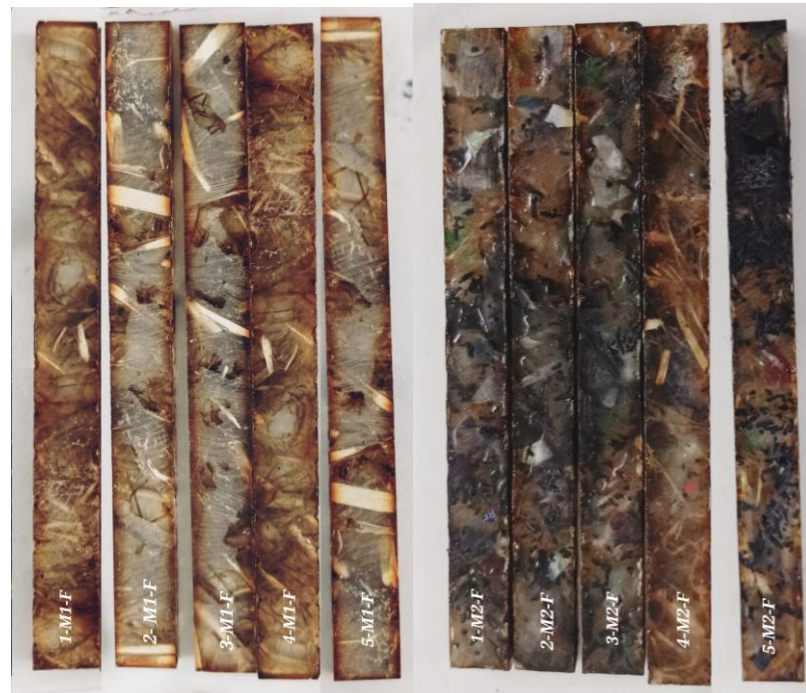
### Identificación de cada probeta

Ya que tenemos dos materiales con los cuales vamos a realizar 5 probetas de cada ensayo se coloca una identificación a cada probeta como se muestra a continuación. Para identificar cada probeta se colocó una serie de letras y números combinados, el primer es el número de probeta, continua con la M1 que significa el Material compuesto 1 o M2 que sería el Material compuesto 2 y la última letra es la denominación de los ensayos realizados F para flexión, T de ensayo de tracción y C para el ensayo de Compresión. [22]

- **1-M1-F** = Probeta 1 - Material Compuesto 1 – Ensayo de Flexión
- **1-M2-F** = Probeta 1 - Material Compuesto 2 – Ensayo de Flexión
- **1-M1-T** = Probeta 1 - Material Compuesto 1 – Ensayo de Tracción
- **1-M2-T** = Probeta 1 - Material Compuesto 2 – Ensayo de Tracción
- **1-M1-C** = Probeta 1 - Material Compuesto 1 – Ensayo a Compresión
- **1-M2-C** = Probeta 1 - Material Compuesto 2 – Ensayo de Compresión

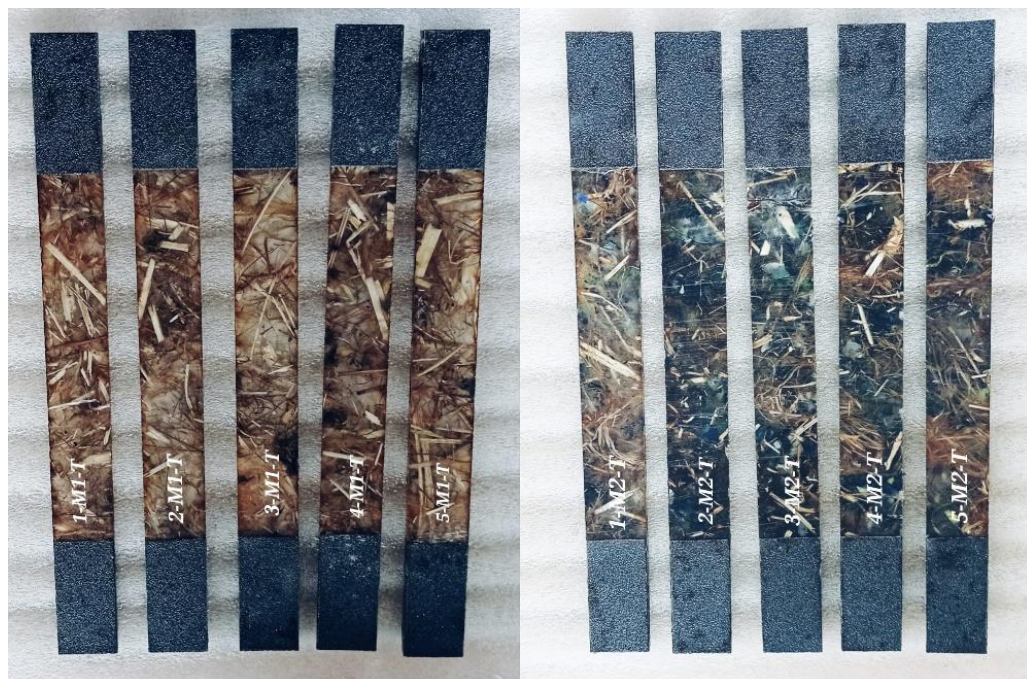


## PROBETAS PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN



*Figura 22: Probetas para ensayo de flexión*

## PROBETAS PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN



*Figura 23: Probetas para ensayo de tracción (a) Material 1; (b) Material 2*

## PROBETAS PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN



*Figura 24: Probetas para ensayos de compresión*

## 2.8. TIPOS DE FALLAS

### Tipos de fallas para ensayos de tracción:

Las categorías de fallas están compuestas por tres letras, donde la primera describe la forma de la falla, la segunda indica la región donde ocurre la falla, y la tercera letra señala la ubicación específica donde se produce dicha falla.

*Tabla 10: Tipos de Fallas en el ensayo de tracción [22]*

Primera letra		Segunda letra		Tercera letra	
<b>A</b>	Angular	<b>I</b>	Dentro	<b>B</b>	Fondo
<b>D</b>	De laminación de borde	<b>A</b>	Al agarre	<b>T</b>	Superior
<b>G</b>	Agarre	<b>W</b>	<1w de agarre	<b>L</b>	Izquierda
<b>L</b>	Lateral	<b>G</b>	Zona calibrada	<b>R</b>	Derecha
<b>M</b>	Modo múltiple	<b>M</b>	Varias áreas	<b>M</b>	Media
<b>S</b>	A lo largo	<b>V</b>	Varios	<b>V</b>	Varios
<b>X</b>	Explosivo	<b>U</b>	Desconocido	<b>U</b>	Desconocido
<b>O</b>	Otro	-	-	-	-

**Tipos de fallas para ensayos de flexión:**

*Tabla 11: Tipos de fallas en el ensayo de flexión [22]*

Primera letra		Segunda letra		Tercera letra	
<b>T</b>	Tensión	A	En el punto de carga	T	Parte superior
<b>C</b>	Compresión	B	Entre la carga	B	Fondo
<b>B</b>	Pandeo	S	Entre los soportes	L	Izquierdo
<b>S</b>	Cizalla	L	Entre la cara y el punto de apoyo	R	Derecho
<b>M</b>	Múltiple	U	Desconocido	M	Medio
<b>O</b>	Otros			V	Varios
				U	Desconocido

## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

La interpretación adecuada de los resultados obtenidos en los ensayos de flexión, tracción y compresión es de suma importancia. Estos resultados se presentan detalladamente en fichas técnicas que contienen datos reales obtenidos de cada prueba, y, además, se asigna una codificación específica a cada ficha según el caso correspondiente. Esta documentación es esencial para analizar y comprender de manera precisa el comportamiento del material en diferentes condiciones de carga y evaluar su rendimiento en diversas aplicaciones.




##### **3.1.1. Tabulación de los resultados obtenidos en los ensayos**

Los ensayos de flexión se realizaron en base a la Norma ASTM D7264 /D7264M-07, para los ensayos a tracción se utilizó la Norma ASTM D3039/ D3039M y finalmente para realizar los ensayos a compresión se utilizó la Norma ASTM D 695 – 02a. Las normas nos indican las medidas exactas de las probetas y también nos mencionan que debemos considerar 5 muestras de cada material para validar el análisis de resultados.

A continuación, se detalla en las siguientes fichas técnicas los resultados obtenidos del ensayo a flexión de 3 puntos, del ensayo a tracción y a compresión en el Material compuesto 1 y Material compuesto 2.

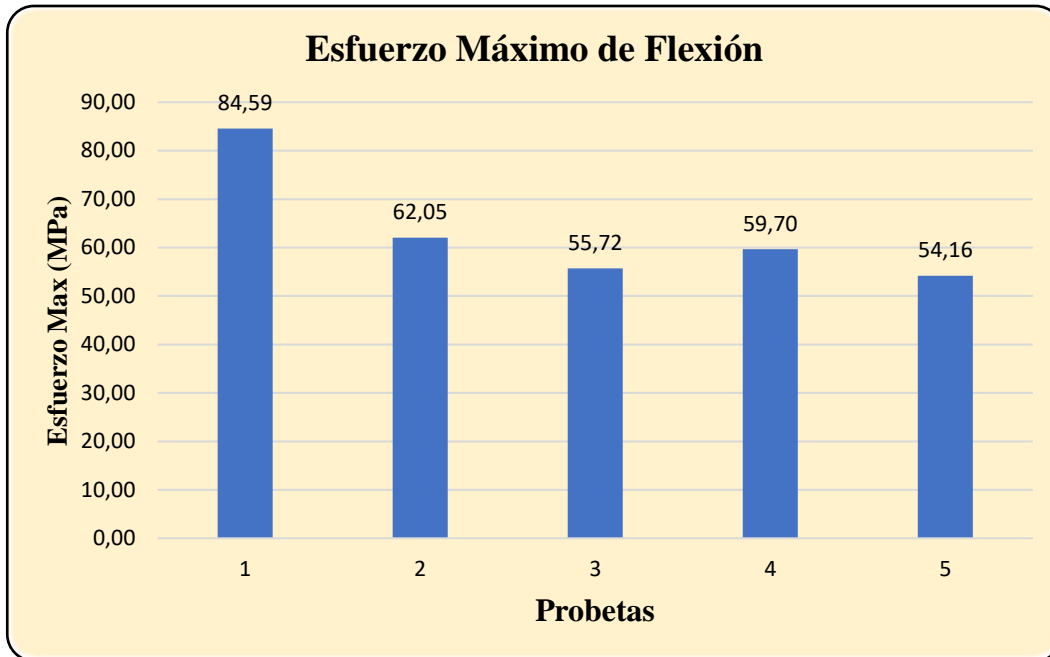


Tabla 12: Ficha técnica del ensayo de Flexión (Material Compuesto 1)

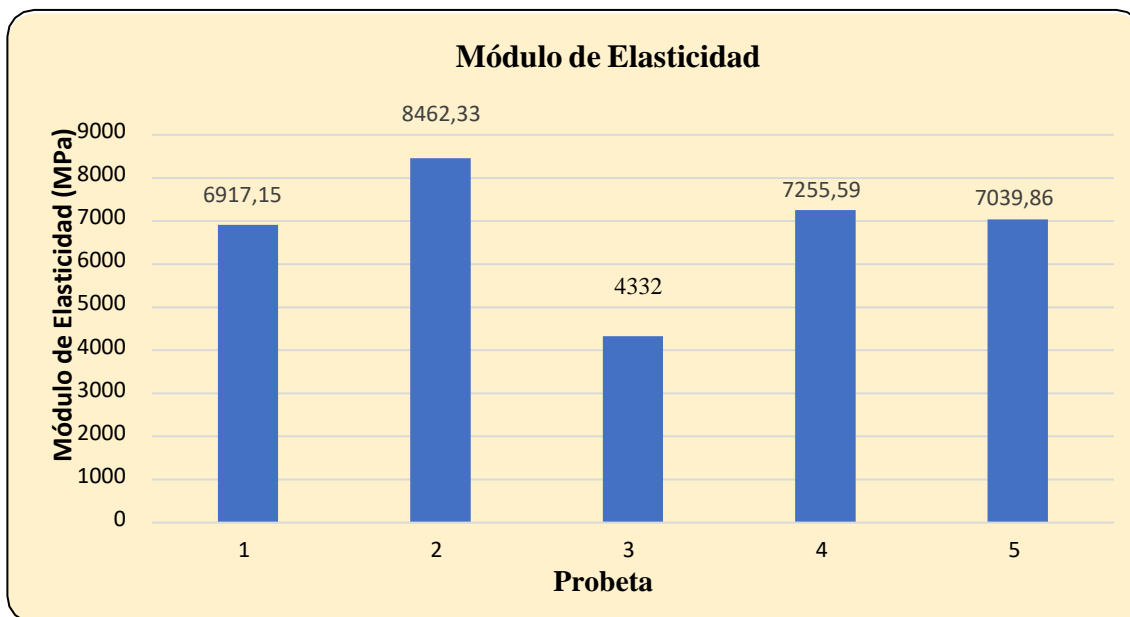
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Ficha de recolección y tabulación de datos</p> </div>  </div>					
ENSAYO DE FLEXIÓN					
ASTM D7264/D7264M-07		<b>Tipo de ensayo:</b>		Flexión de 3 puntos	
Datos informativos					
<b>Fecha:</b>	15/6/2023	<b>Ciudad:</b>	Ambato		
<b>Lugar:</b>	Taller de Innovación y Desarrollo Tecnológico FICM - UTA				
<b>Equipo:</b>	Máquina universal de polímeros	<b>Modelo:</b>	shimadzu ags-x 50 kN		
<b>Elaborado por:</b>	Yessenia Aleaga	<b>Revisado por:</b>	Ing. Pablo Valle		
<b>Tipo de estudio:</b>	Experimental	<b>Norma:</b>	ASTM D7264/D7264M-07		
Material Compuesto 1					
Parámetros de ensayo					
<b>Refuerzo:</b>	Cáñamo		<b>Probetas ensayadas:</b>	5	
<b>Matriz:</b>	Resina Epóxica	<b>Dimensiones (mm):</b>	130x13x4	<b>Peso de la matriz:</b>	222,55 gr
<b>Marca:</b>	Wesco 2:1	<b>Tiempo de curado:</b>	72 horas	<b>Peso de la fibra:</b>	113,05 gr
<b>Orientación de fibra:</b>	aleatorio-discontinuo	<b>Velocidad de ensayo:</b>	1mm/min	<b>Espesor promedio:</b>	4,22 mm
Resultados					
Probetas	Carga Max (N)	espesor (mm)	Esfuerzo de flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (Mpa)	Deformación Max (%)
1	183,28	4,1	84,59	6917,15	1,02041
2	134,44	4,3	62,05	8462,33	0,96841
3	120,727	4,5	55,72	4332	0,72905
4	129,35	4	59,70	7255,59	0,979
5	117,35	4,2	54,16	7039,86	0,86518
<b>Promedio:</b>	<b>137,0294</b>	<b>4,22</b>	<b>63,24</b>	<b>6801,386</b>	<b>0,91241</b>
Fotografías de los ensayos					
					



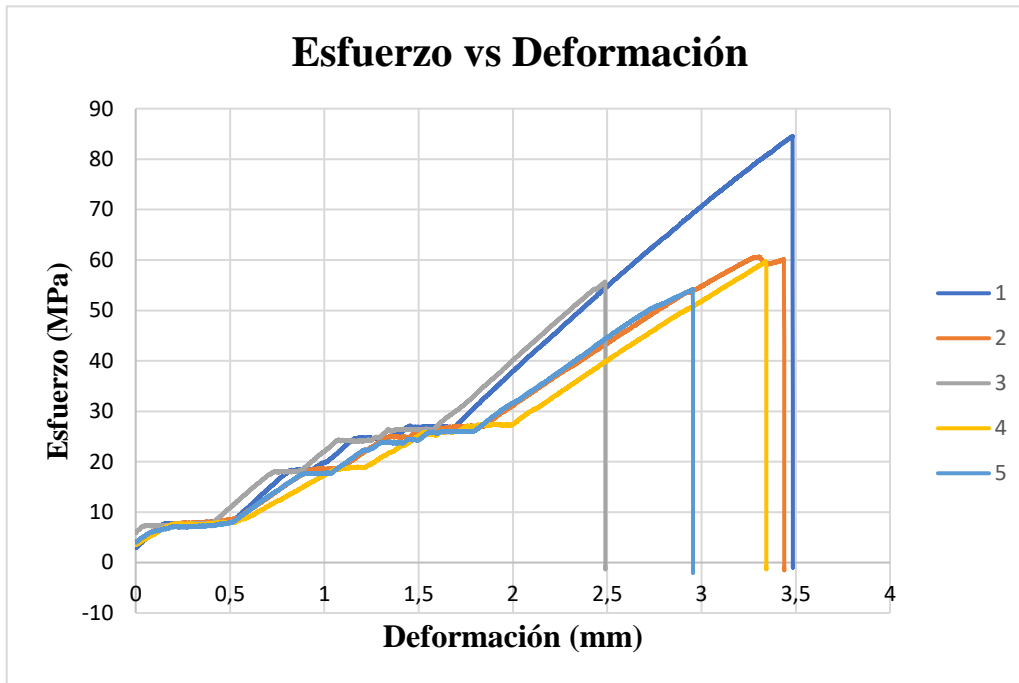
### Gráfica del Esfuerzo Máximo de Flexión



### Gráfica de Módulo de Elasticidad



## Gráfica de Esfuerzo vs Deformación






### Observación de Ensayos

\* La probeta 1, 4 y 5 que se sometió al ensayo de flexión tiene un tipo de falla OLU que hace referencia a la rotura que se produce entre la carga y el punto de apoyo.

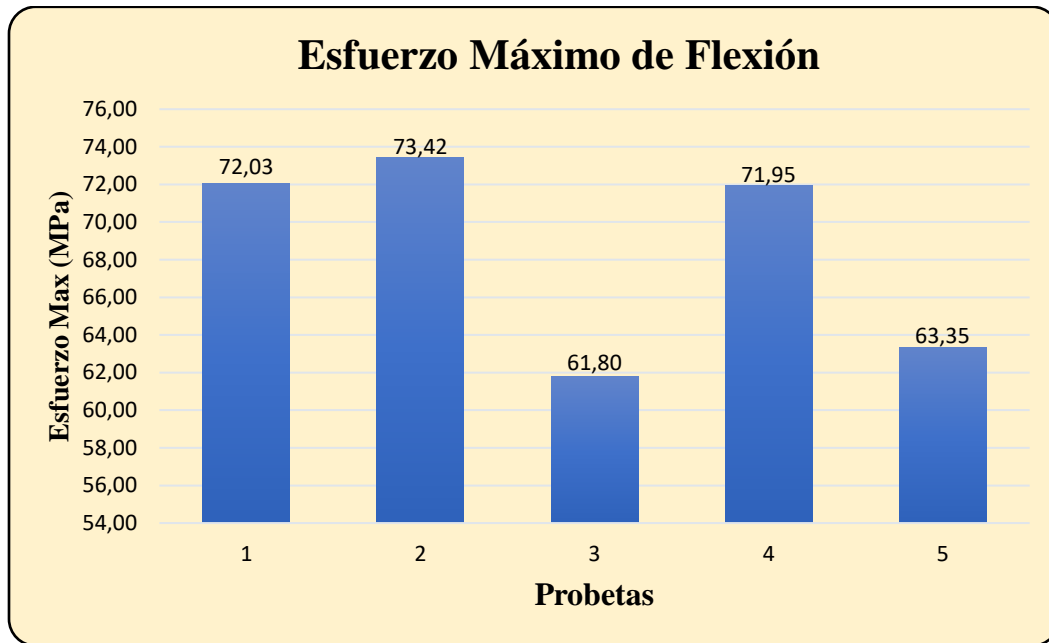
\* La probeta 2 y 3 tiene un tipo de falla OAU que hace referencia a la rotura que se producen el punto de carga.

Valores Promedio		Aprobado y Validado	
<b>Carga Máxima (N):</b>	137,0294	<b>Elaborado por:</b>	Srta. Yessenia Aleaga
<b>Esfuerzo Máximo (MPa):</b>	63,24	<b>Revisado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle
<b>%de Elongación</b>	0,91241	<b>Aprobado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle
<b>Módulo de elasticidad (MPa):</b>	6801,386		

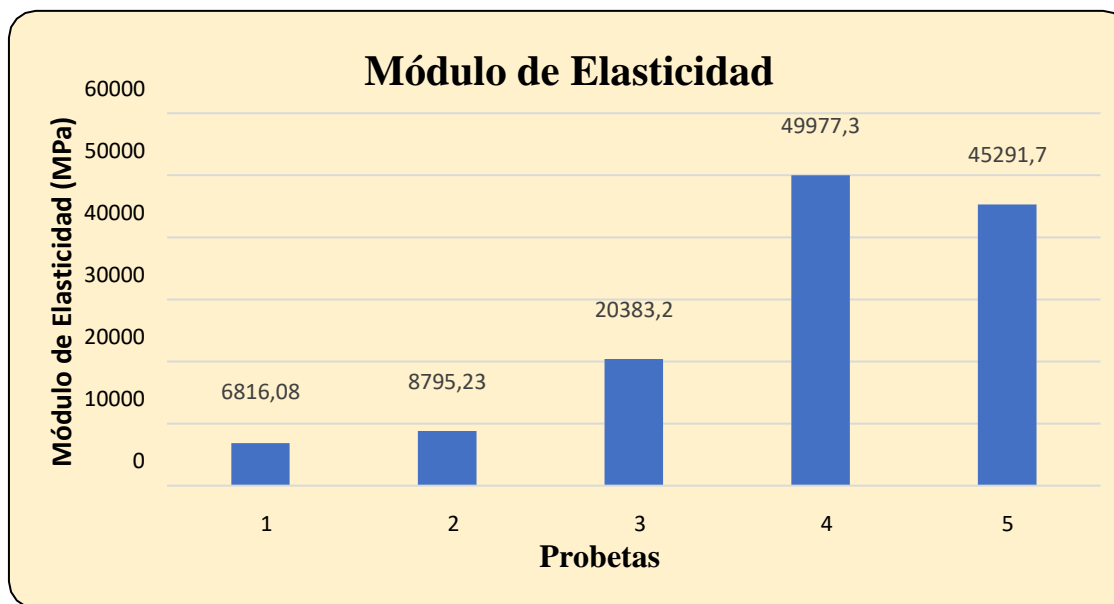
Tabla 13: Ficha técnica del ensayo de flexión (Material compuesto 2)

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Ficha de recolección y tabulación de datos</p> </div>  </div>					
ENSAYO DE FLEXIÓN					
ASTM D7264/D7264M-07		<b>Tipo de ensayo:</b>		Flexión de 3 puntos	
Datos Informativos					
<b>Fecha:</b>	15/6/2023		<b>Ciudad:</b>	Ambato	
<b>Lugar:</b>	Taller de Innovación y Desarrollo Tecnológico FICM - UTA				
<b>Equipo:</b>	Máquina universal de polímeros		<b>Modelo:</b>	shimadzu ags-x 50 kN	
<b>Elaborado por:</b>	Yessenia Aleaga		<b>Revisado por:</b>	Ing. Pablo Valle	
<b>Tipo de estudio:</b>	Experimental		<b>Norma:</b>	ASTM D7264/D7264M-07	
Material Compuesto 2					
Parámetros de ensayo					
<b>Refuerzo:</b>	Cáñamo - PET - Neumático			<b>Probetas ensayadas:</b>	5
<b>Matriz:</b>	Resina Epóxica	<b>Dimensiones (mm):</b>	130x13x4	<b>Peso de la matriz:</b>	222,55 gr
<b>Marca:</b>	Wesco 2:1	<b>Tiempo de curado:</b>	72 horas	<b>Peso de la fibra:</b>	113,05 gr
<b>fibra:</b>	discontinuo	<b>Velocidad de ensayo:</b>	1mm/min	<b>Espesor promedio:</b>	4,22
Resultados					
Probetas	Carga Max (N)	Espesor (mm)	Esfuerzo (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Deformación (%)
1	156,069	4,02	72,03	6816,08	0,81611
2	159,081	4,1	73,42	8795,23	0,92871
3	133,896	4,03	61,80	20383,2	0,87104
4	155,902	4,1	71,95	49977,3	0,70107
5	137,258	4	63,35	45291,7	0,71607
<b>Promedio:</b>	<b>148,4412</b>	<b>4,05</b>	<b>68,51</b>	<b>26252,70</b>	<b>0,81</b>
Fotografías de los ensayos					
					

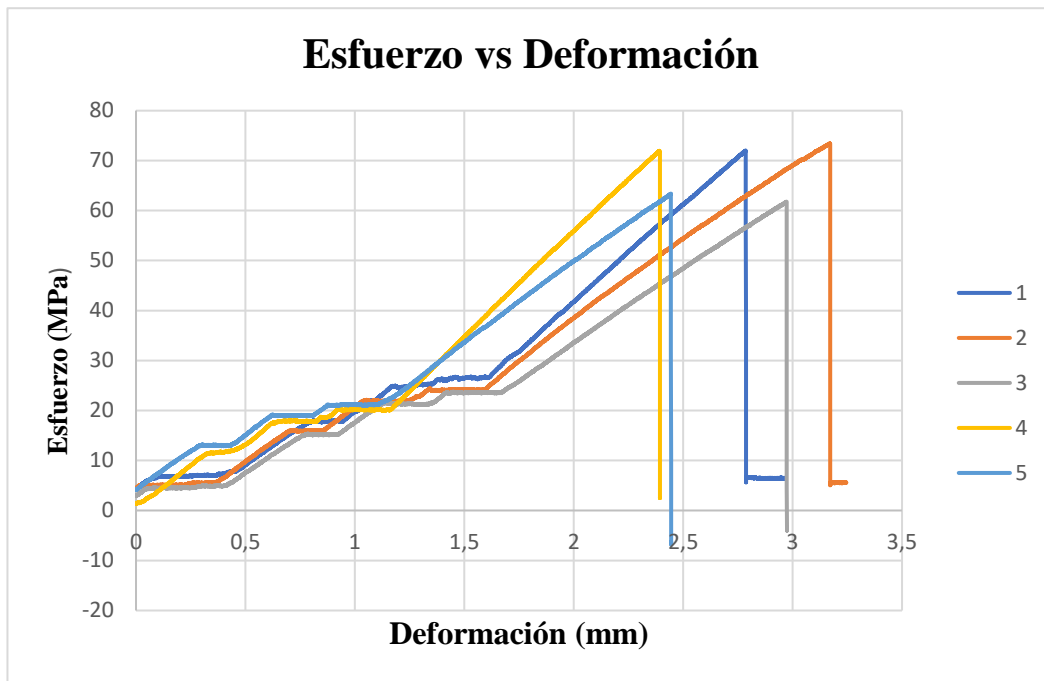
Gráfica del Esfuerzo Máximo de Flexión



Gráfica de Módulo de Elasticidad



## Gráfica de Esfuerzo vs Deformación



### Observación de Ensayos



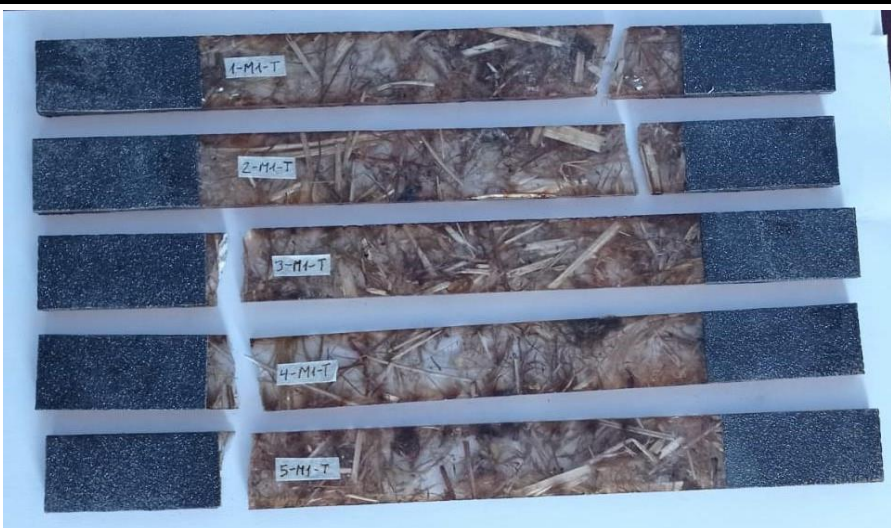
\* La probeta 1 que se sometió al ensayo de flexión tiene un tipo de falla OLU que hace referencia a la rotura que se produce entre la carga y el punto de apoyo.

\* Las probetas 2 y 4 tiene un tipo de falla OAU que hace referencia a la rotura que hace referencia a la rotura que se produce en el punto de carga y en el medio de la probeta.

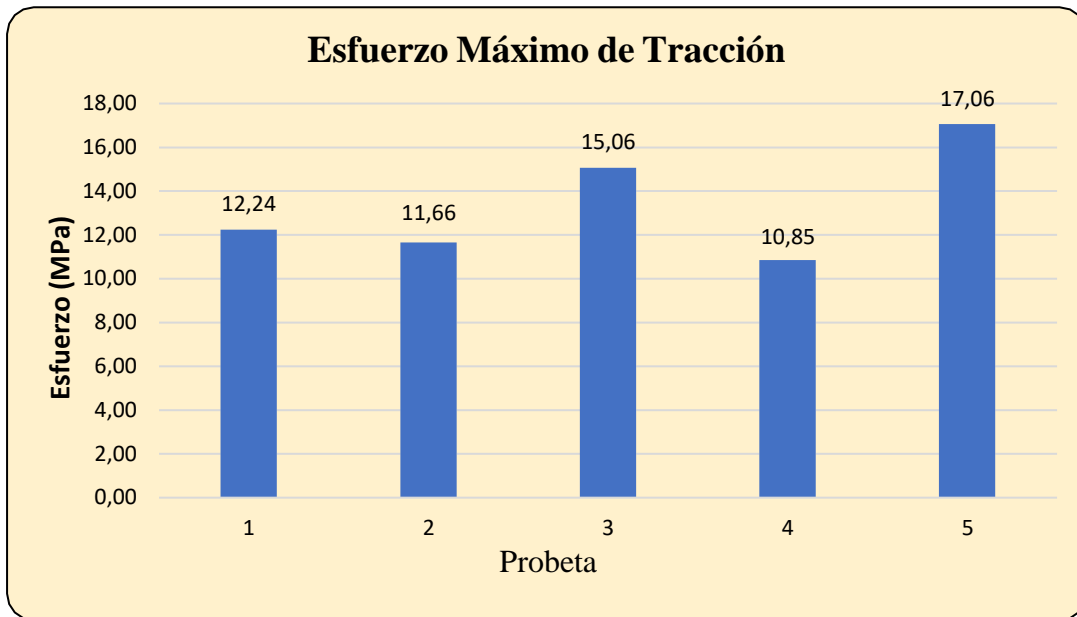
\* Las probetas 3 y 5 tiene un tipo de falla BAU que hace referencia a la falla que se produce en el medio y no ocurrió la rotura inmediata

Valores Promedio		Aprobado y Validado	
<b>Carga Máxima (N):</b>	148,4412	<b>Elaborado por:</b>	Srta. Yessenia Aleaga
<b>Esfuerzo Máximo (MPa):</b>	68,51		
<b>%de Elongación</b>	0,81	<b>Revisado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle
<b>Módulo de elasticidad (MPa):</b>	26252,7	<b>Aprobado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle

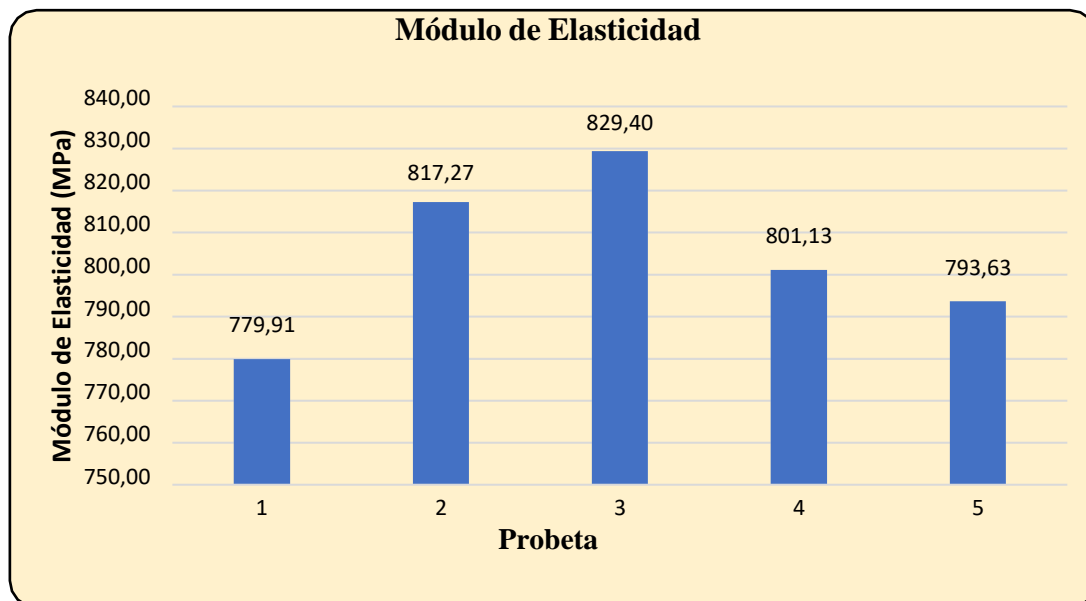
**Tabla 14:** Ficha técnica del ensayo de Tracción (Material Compuesto 1)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Ficha de recolección y tabulación de datos					
<b>ENSAYO DE TRACCIÓN</b>					
ASTM D 3039/D 3039M		<b>Tipo de ensayo:</b>	Tracción		
<b>Datos Informativos</b>					
<b>Fecha:</b>	16/6/2023	<b>Ciudad:</b>	Ambato		
<b>Lugar:</b>	Taller de Innovación y Desarrollo Tecnológico FICM - UTA				
<b>Equipo:</b>	Máquina universal de polímeros	<b>Modelo:</b>	shimadzu ags-x 50 kN		
<b>Elaborado por:</b>	Yessenia Aleaga	<b>Revisado por:</b>	Ing. Pablo Valle		
<b>Tipo de estudio:</b>	Experimental	<b>Norma:</b>	ASTM D 3039/D 3039M		
<b>Material Compuesto 1</b>					
<b>Parámetros de ensayo</b>					
<b>Refuerzo:</b>	Cáñamo	<b>Probetas ensayadas:</b>	5		
<b>Matriz:</b>	Resina Epóxica	<b>Dimensiones (mm):</b>	250 x 25 x 2,5		
<b>Marca:</b>	Wesco 2:1	<b>Tiempo de curado:</b>	72 horas		
<b>Orientación de fibra:</b>	aleatorio-discontinuo	<b>Velocidad de ensayo:</b>	2 mm/min		
		<b>Peso de la matriz:</b>	222,55 gr		
		<b>Peso de la fibra:</b>	113,05 gr		
		<b>Espesor promedio:</b>	2,68		
<b>Resultados</b>					
Probetas	Carga Max (N)	Espesor (mm)	Esfuerzo Max a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (Mpa)	Deformación max (%)
1	764,855	2,8	12,24	779,91	0,9306
2	728,567	2,5	11,66	817,27	0,8033
3	941,515	2,8	15,06	829,40	1,04063
4	678,372	2,6	10,85	801,13	0,78777
5	1066,42	2,7	17,06	793,63	1,23555
<b>Promedio:</b>	<b>835,95</b>	<b>2,68</b>	<b>13,38</b>	<b>804,27</b>	<b>0,96</b>
<b>Fotografías de los ensayos</b>					
					

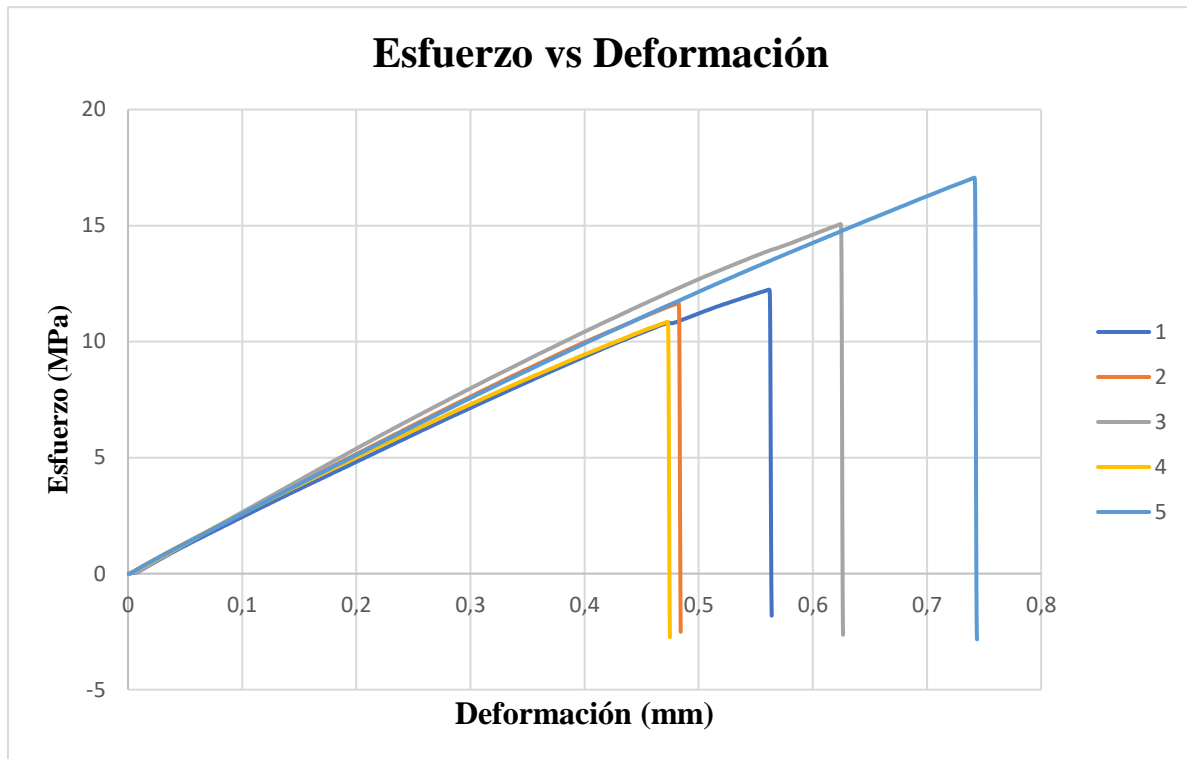
### Gráfica del Esfuerzo a la tracción



### Gráfica de Módulo de Elasticidad



## Gráfica de Esfuerzo vs Deformación



### Observación de Ensayos



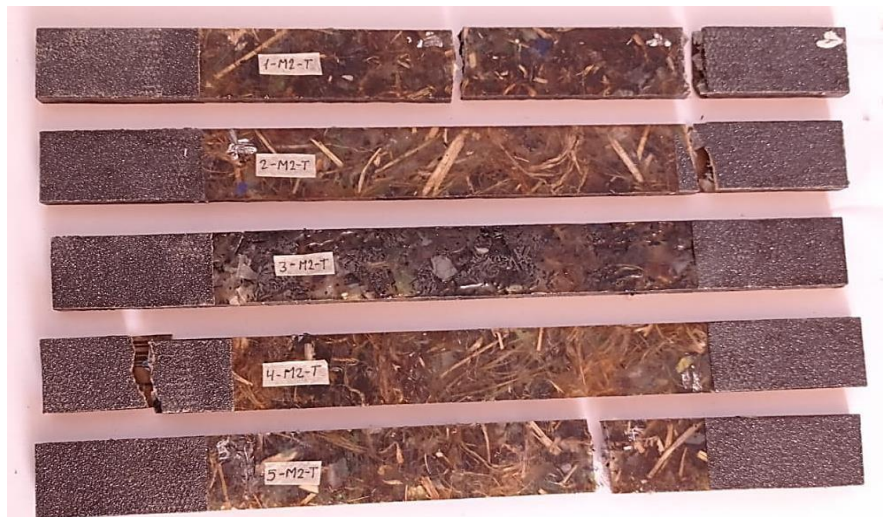
\* La probeta 1 y 2 que se sometió al ensayo de tracción tiene un tipo de falla AWR que hace referencia a la rotura que se produce de manera angular cerca del agarre de la probeta en el lado izquierdo

\* La probeta 3, 4 y 5 tiene un tipo de falla LWL que hace referencia a la rotura que se produce de manera lateral cerca del agarre de la probeta al lado izquierdo.

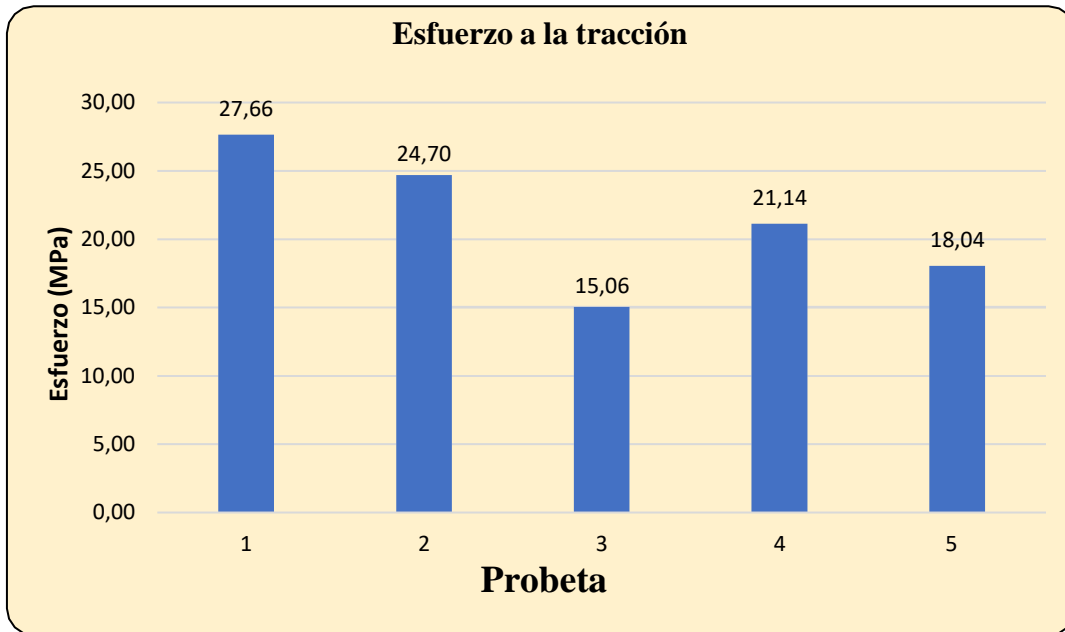
Valores Promedio		Aprobado y Validado	
Carga Máxima (N):	835,95	<b>Elaborado por:</b>	Srta. Yessenia Aleaga
Esfuerzo Máximo (MPa):	13,38		
%de Elongación	0,96	<b>Revisado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle
Módulo de elasticidad (MPa):	804,27	<b>Aprobado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle



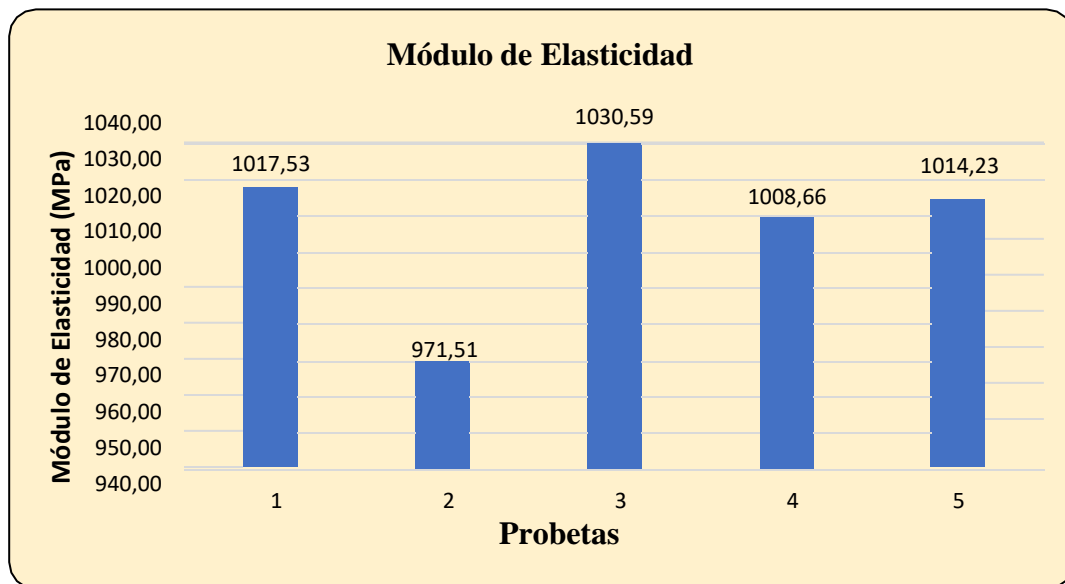
Tabla 15: Ficha técnica del ensayo de Tracción (Material Compuesto 2)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
		Ficha de recolección y tabulación de datos				
		<b>ENSAYO DE TRACCIÓN</b>				
ASTM D 3039/D 3039M		<b>Tipo de ensayo:</b>		Tracción		
<b>Datos Informativos</b>						
<b>Fecha:</b>	16/6/2023	<b>Ciudad:</b>	Ambato			
<b>Lugar:</b>	Taller de Innovación y Desarrollo Tecnológico FICM - UTA					
<b>Equipo:</b>	Máquina universal de polímeros	<b>Modelo:</b>	shimadzu ags-x 50 kN			
<b>Elaborado por:</b>	Yessenia Aleaga	<b>Revisado por:</b>	Ing. Pablo Valle			
<b>Tipo de estudio:</b>	Experimental	<b>Norma:</b>	ASTM D 3039/D 3039M			
<b>Material Compuesto 2</b>						
<b>Parámetros de ensayo</b>						
<b>Refuerzo:</b>	Cáñamo - PET - Neumático			<b>Probetas ensayadas:</b>	5	
<b>Matriz:</b>	Resina Epóxica	<b>Dimensiones (mm):</b>	250 x 25 x 2,5	<b>Peso de la matriz:</b>	222,55 gr	
<b>Marca:</b>	Wesco 2:1	<b>Tiempo de curado:</b>	72 horas	<b>Peso de la fibra:</b>	113,05 gr	
<b>fibra:</b>	discontinuo	<b>ensayo:</b>	2 mm/min	<b>Espesor promedio:</b>	2,56	
<b>Resultados</b>						
Probetas	Carga Max (N)	Espesor (mm)	Esfuerzo Max a tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Deformación (%)	
1	1728,5	2,5	27,66	1017,53	2,12513	
2	1544,02	2,3	24,70	971,51	1,68998	
3	941,094	2,9	15,06	1030,59	1,13563	
4	1321,01	2,6	21,14	1008,66	1,25336	
5	1127,22	2,5	18,04	1014,23	1,30559	
<b>Promedio:</b>	<b>1332,37</b>	<b>2,56</b>	<b>21,32</b>	<b>1008,50</b>	<b>1,50</b>	
<b>Fotografías de los ensayos</b>						
						

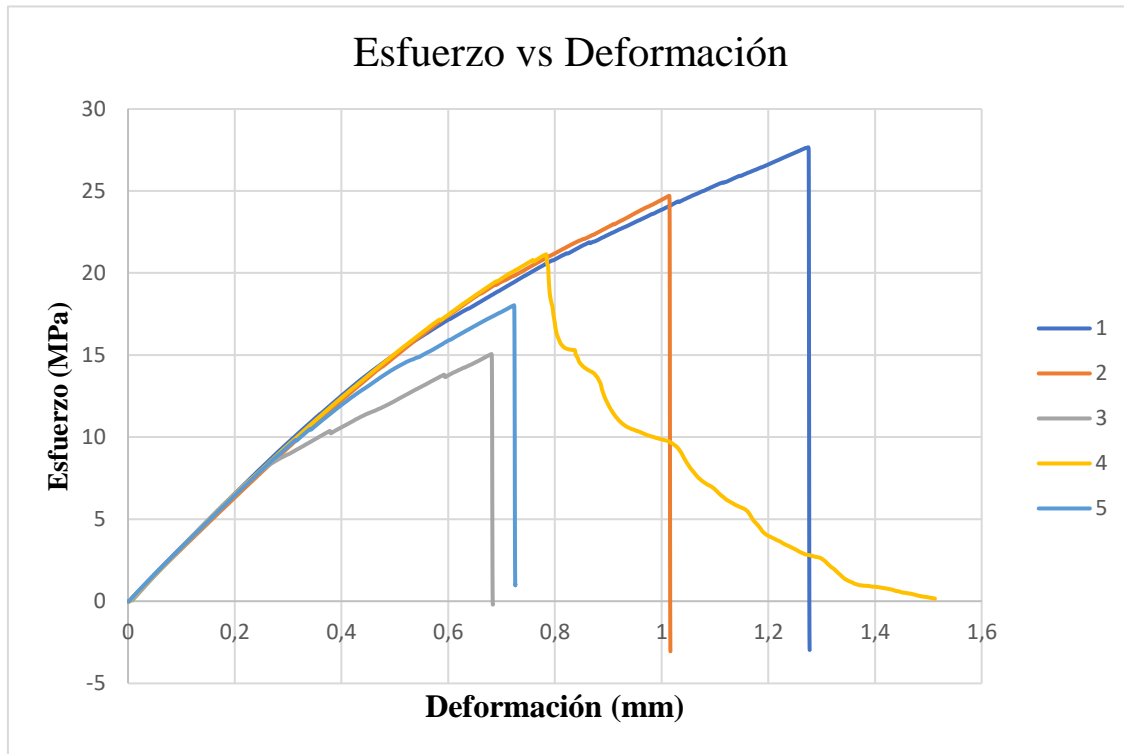
**Gráfica del esfuerzo a la tracción**



**Gráfica de Módulo de Elasticidad**



## Gráfica de Esfuerzo vs Deformación



### Observación de Ensayos

\* La probeta 1 que se sometió al ensayo de tracción tiene un tipo de falla LMV que hace referencia a la rotura que se produce de manera lateral en 2 áreas diferentes en distintas ubicaciones.

\* La probeta 2 tiene un tipo de falla LAR que hace referencia a la rotura que se produce de manera lateral en el agarre de la probeta.




\* La probeta 3 tiene un tipo de falla LIL que hace referencia a la rotura que se produce de manera lateral dentro de la probeta por lo que no ocurrió la rotura por completo.

\* La probeta 4 tiene un tipo de falla LAL que hace referencia a la rotura que se produce de manera lateral en el agarre de la probeta.

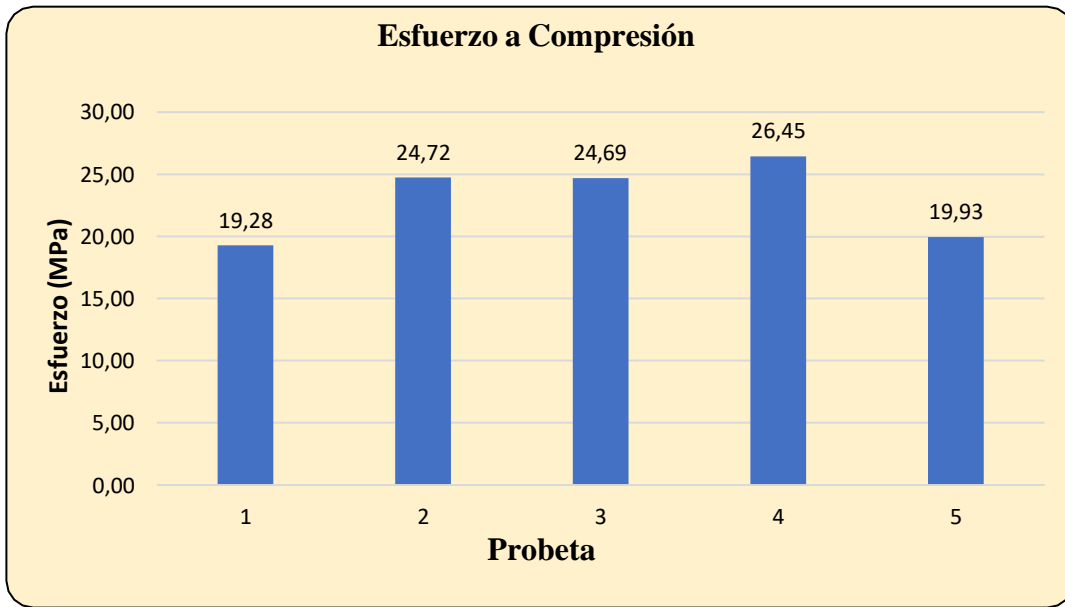
\* La probeta 5 tiene un tipo de falla LWR que hace referencia a la rotura que se produce de manera lateral a una distancia aproximada del agarre al lado derecho.

Valores Promedio		Aprobado y Validado	
<b>Carga Máxima (N):</b>	1332,37	<b>Elaborado por:</b>	Srta. Yessenia Aleaga
<b>Esfuerzo Máximo (MPa):</b>	21,32		
<b>%de Elongación</b>	1,50	<b>Revisado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle
<b>Módulo de elasticidad (MPa):</b>	1008,50	<b>Aprobado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle

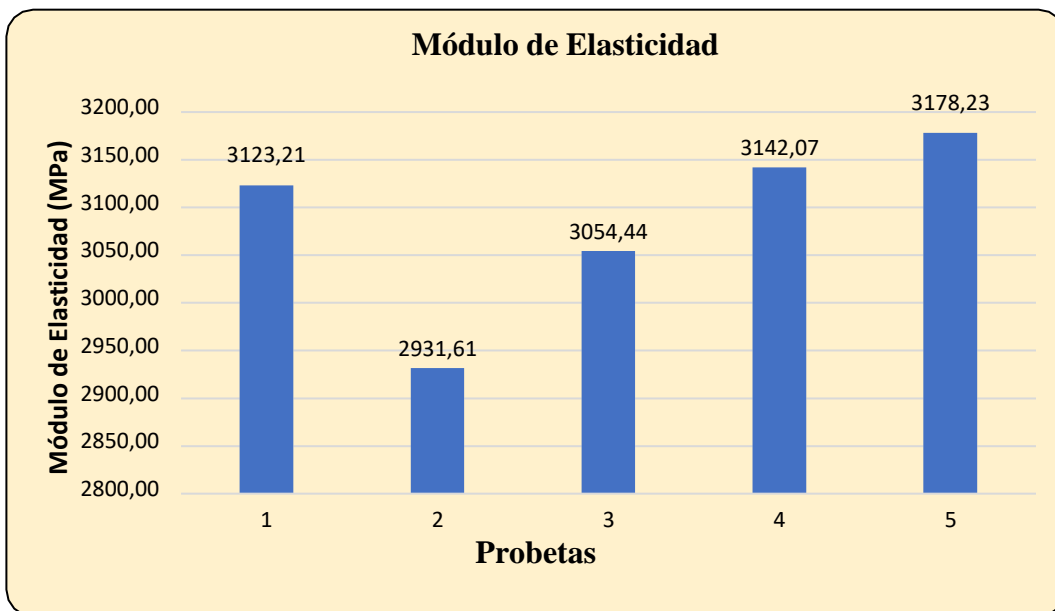
Tabla 16: Ficha técnica del ensayo de Compresión (Material Compuesto 1)

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Ficha de recolección y tabulación de datos</p> </div>  </div>					
ENSAYO DE COMPRESIÓN					
ASTM D 695 – 02a			<b>Tipo de ensayo:</b>		Compresión
Datos Informativos					
<b>Fecha:</b>	22/6/2023		<b>Ciudad:</b>	Ambato	
<b>Lugar:</b>	Taller de Innovación y Desarrollo Tecnológico FICM - UTA				
<b>Equipo:</b>	Máquina universal de polímeros	<b>Modelo:</b>	shimadzu ags-x 50 kN		
<b>Elaborado por:</b>	Yessenia Aleaga	<b>Revisado por:</b>	Ing. Pablo Valle		
<b>Tipo de estudio:</b>	Experimental	<b>Norma:</b>	ASTM D 695 – 02a		
Material Compuesto 1					
Parámetros de ensayo					
<b>Refuerzo:</b>	Cáñamo			<b>Probetas ensayadas:</b>	5
<b>Matriz:</b>	Resina Epóxica	<b>Dimensiones (mm):</b>	79.4 x 19 x 3.2	<b>Peso de la matriz:</b>	222,55 gr
<b>Marca:</b>	Wesco 2:1	<b>Tiempo de curado:</b>	72 horas	<b>Peso de la fibra:</b>	113,05 gr
<b>Orientación de fibra:</b>	aleatorio-discontinuo	<b>Velocidad de ensayo:</b>	1,3 mm/min	<b>Espesor promedio:</b>	3,18
Resultados					
Probetas	Carga Max (N)	Espesor (mm)	Esfuerzo Max a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (Mpa)	Deformación max(%)
1	1172,28	3,2	19,28	3123,21	2,28738
2	1503,2	3	24,72	2931,61	2,62666
3	1500,91	3,5	24,69	3054,44	2,42063
4	1607,98	3,2	26,45	3142,07	2,61929
5	1211,97	3,02	19,93	3178,23	2,69988
<b>Promedio:</b>	<b>1399,27</b>	<b>3,18</b>	<b>23,01</b>	<b>3085,91</b>	<b>2,53</b>
Fotografías de los ensayos					
					

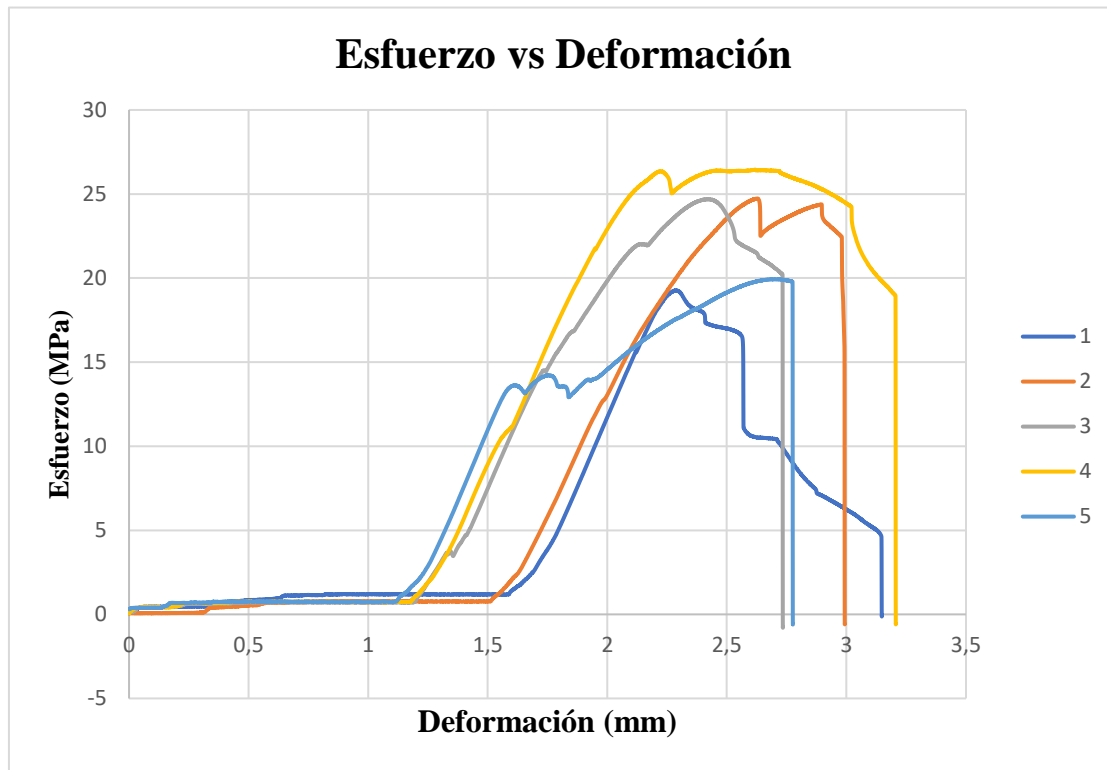
### Gráfica del Esfuerzo a Compresión



### Gráfica de Módulo de Elasticidad



## Gráfica de Esfuerzo vs Deformación






### Observación de Ensayos

\* La probeta 1 y 5 que se sometió al ensayo de compresión tiene un tipo de falla DP (deformación plástica) deformación permanente del material sin una rotura completa.

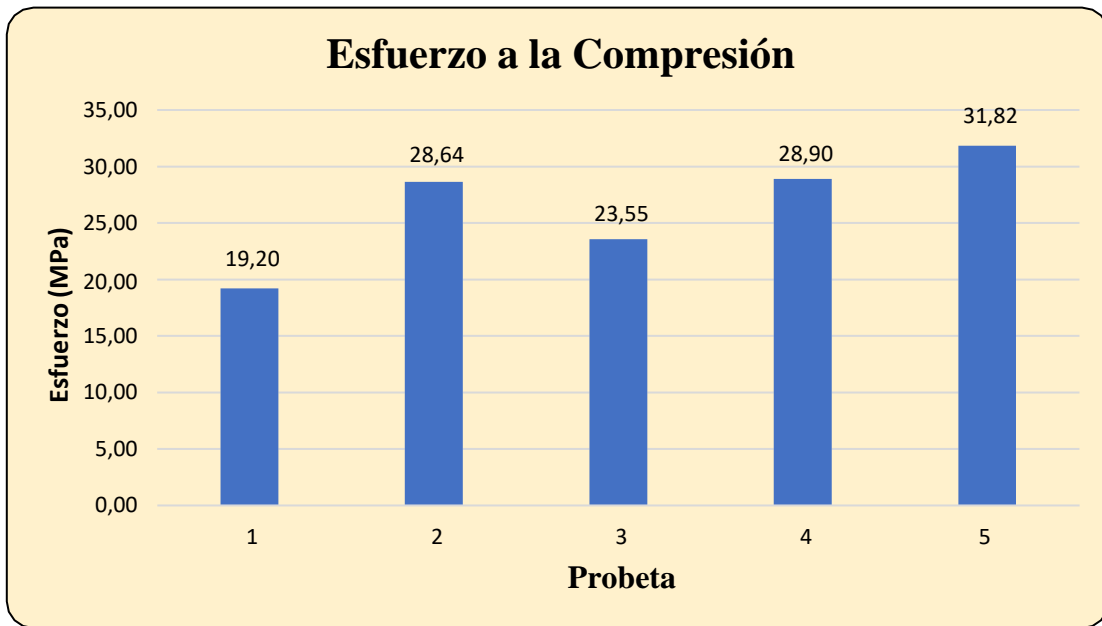
\* La probeta 2, 3 y 4 tiene un tipo de falla FI (Falla interlaminar) que hace referencia a la falla entre capas o interfaces del material compuesto.

Valores Promedio		Aprobado y Validado	
<b>Carga Máxima (N):</b>	1399,27	<b>Elaborado por:</b>	Srta. Yessenia Aleaga
<b>Esfuerzo Máximo (MPa):</b>	23,01		
<b>%de Elongación</b>	2,53	<b>Revisado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle
<b>Módulo de elasticidad (MPa):</b>	3085,91	<b>Aprobado por:</b>	Ph. D. Pablo Valle

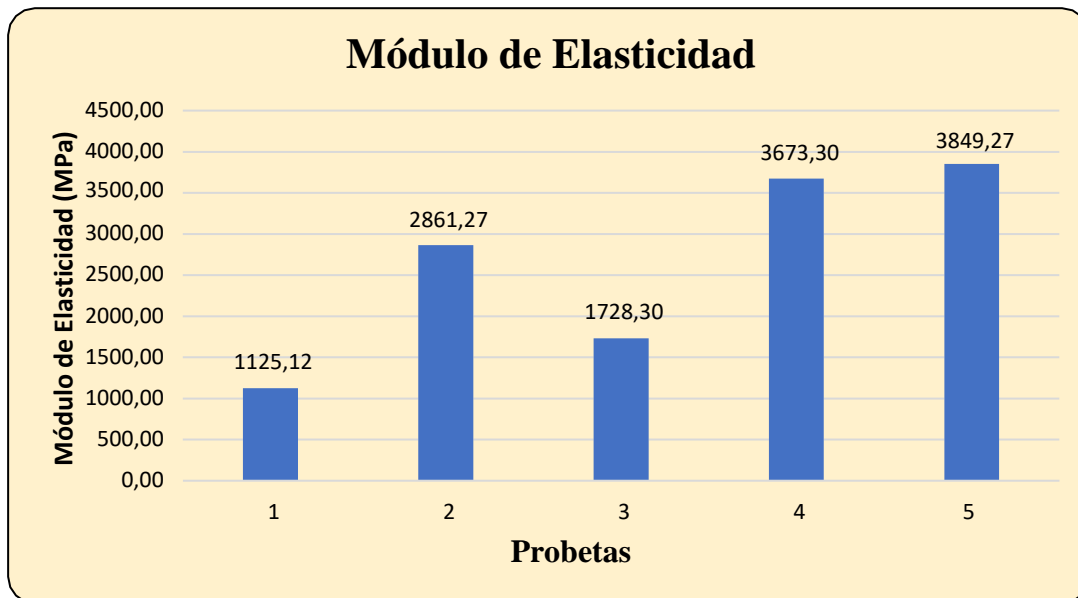
Tabla 17: Ficha técnica del ensayo de Compresión (Material Compuesto 2)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
		Ficha de recolección y tabulación de datos			
ENSAYO DE COMPRESIÓN					
ASTM D 695 – 02a			<b>Tipo de ensayo:</b>		Compresión
Datos Informativos					
<b>Fecha:</b>	22/6/2023		<b>Ciudad:</b>	Ambato	
<b>Lugar:</b>	Taller de Innovación y Desarrollo Tecnológico FICM - UTA				
<b>Equipo:</b>	Máquina universal de polímeros	<b>Modelo:</b>	shimadzu ags-x 50 kN		
<b>Elaborado por:</b>	Yessenia Aleaga		<b>Revisado por:</b>	Ing. Pablo Valle	
<b>Tipo de estudio:</b>	Experimental		<b>Norma:</b>	ASTM D 695 – 02a	
Material Compuesto 2					
Parámetros de ensayo					
<b>Refuerzo:</b>	Cáñamo - PET - Neumático			<b>Probetas ensayadas:</b>	5
<b>Matriz:</b>	Resina Epóxica	<b>Dimensiones (mm):</b>	79,4 x 19 x 3,2	<b>Peso de la matriz:</b>	222,55 gr
<b>Marca:</b>	Wesco 2:1	<b>Tiempo de curado:</b>	72 horas	<b>Peso de la fibra:</b>	113,05 gr
<b>fibra:</b>	discontinuo	<b>Velocidad de ensayo:</b>	1,3 mm/min	<b>Espesor promedio:</b>	3,26
Resultados					
Probetas	Carga Max (N)	Espesor (mm)	Esfuerzo Max a la compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Deformación (%)
1	1167,46	3,2	19,20	1125,12	3,79704
2	1741,08	3,09	28,64	2861,27	3,65531
3	1431,85	3,1	23,55	1728,30	3,11001
4	1756,84	3,19	28,90	3673,30	2,97438
5	1934,65	3,7	31,82	3849,27	2,48584
<b>Promedio:</b>	<b>1606,38</b>	<b>3,26</b>	<b>26,42</b>	<b>2647,45</b>	<b>3,20</b>
Fotografías de los ensayos					
					

### Gráfica del Esfuerzo a la Compresión

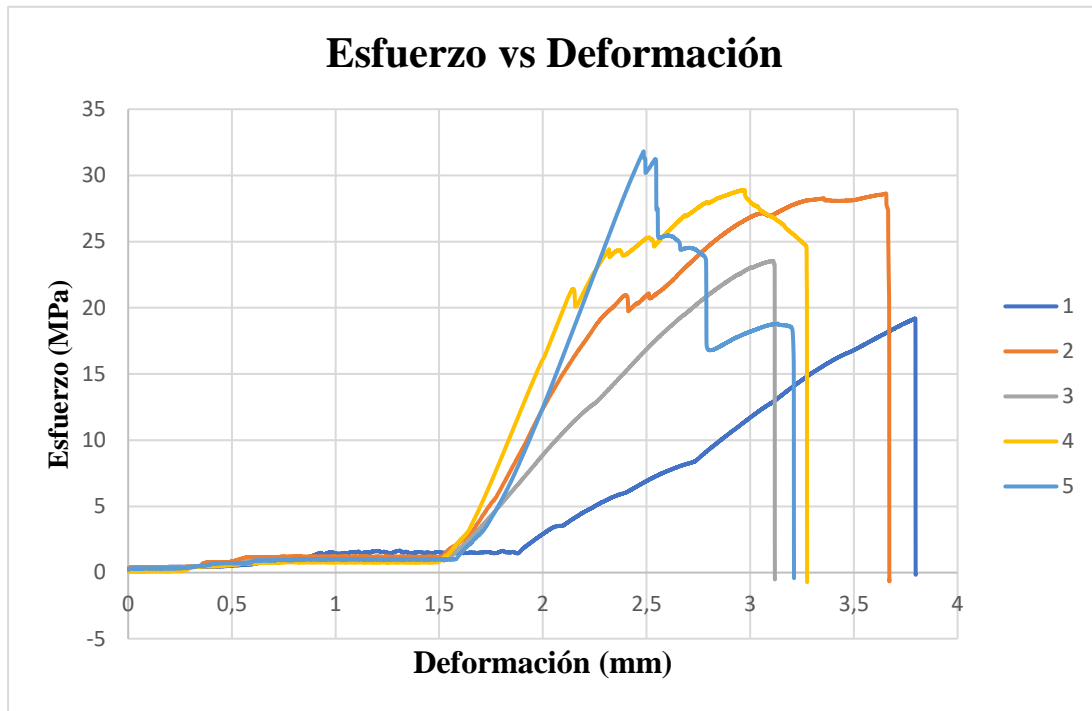


### Gráfica de Módulo de Elasticidad





Gráfica de Esfuerzo vs Deformación



Observación de Ensayos

\* La probeta 1 y 5 que se sometió al ensayo de compresión tiene un tipo de falla DP (deformación plástica) deformación permanente del material sin una rotura completa.

\* La probeta 2 y 3 tiene un tipo de falla FI (Falla interlaminar) que hace referencia a la falla entre capas o interfaces del material compuesto.

\* La probeta 4 tiene un tipo de falla DF (Deslizamiento de fibras) sucede cuando las fibras de refuerzo se deslizan dentro de la matriz sin romperse.

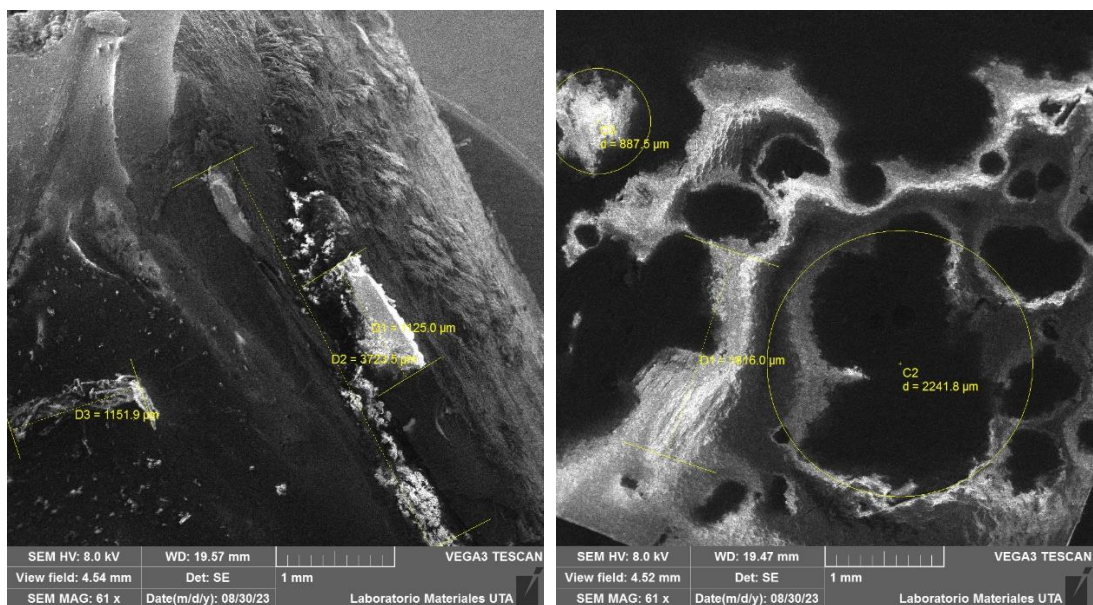
Valores Promedio		Aprobado y Validado	
Carga Máxima (N):	1606,38	Elaborado por:	Srta. Yessenia Aleaga
Esfuerzo Máximo (MPa):	26,42		
%de Elongación	3,20	Revisado por:	Ph. D. Pablo Valle
Módulo de elasticidad (MPa):	2647,45	Aprobado por:	Ph. D. Pablo Valle

### 3.1.2. Prueba SEM

Se utilizó el método de microscopio electrónico de barrido para examinar la morfología (forma y tamaño) del material compuesto, compuesto por resina epoxi, plástico PET, neumático y cáñamo. Se emplearon dos modos de detección de electrones secundarios, con un voltaje de 8.0 kV y ampliificaciones de 61X. Mediante estas imágenes, se pudo observar cómo se distribuyen las nanopartículas en el material, así como su aglomeración y adherencia mutua.

El uso del microscopio electrónico de barrido proporcionó una visión detallada de la estructura y composición del material compuesto. Las imágenes revelaron cómo están distribuidas las nanopartículas en la matriz de resina epoxi, el plástico PET, los neumáticos y el cáñamo, brindando información valiosa sobre su comportamiento y características a nivel microscópico.

El análisis de estas imágenes microscópicas es esencial para comprender cómo se combinan e interactúan los diferentes componentes del material compuesto. La aglomeración y adhesión de las nanopartículas pueden influir en las propiedades mecánicas y la resistencia del material en su totalidad. Por lo tanto, el estudio mediante el microscopio electrónico de barrido, en distintas escalas de magnificación, contribuye significativamente al desarrollo y mejora de estos materiales compuestos, permitiendo su optimización y aplicación en diversas industrias.



**Figura 25:** Prueba SEM, material compuesto

## 3.2. ANÁLISIS DE LOS MATERIALES PROPUESTOS

### Método T-Student

Para llevar a cabo esta verificación, consideraremos las siguientes hipótesis: el material compuesto 1 está fabricado con una matriz de resina epoxi reforzada únicamente con fibra de cáñamo, mientras que el material compuesto 2 está fabricado con una matriz de resina epoxi reforzada con plástico PET, neumático y fibra de cáñamo.

Términos para el análisis:

$H_i$  = Hipótesis nula

$H_o$  = Hipótesis alternativa

$\alpha$  = Margen de error

$X$  = Resultados de los ensayos del material compuesto de resina epóxica reforzado con cáñamo.

$Y$  = Resultados de los ensayos del material compuesto de resina epóxica reforzado con cáñamo, plástico PET y neumático pulverizado.

$n_1$  = Número de probetas del material 1

$n_2$  = Número de probetas del material 2

Hipótesis nula: El material compuesto 2, con matriz de resina epoxi reforzada con cáñamo, PET y neumático, demostrará resultados superiores en ensayos de flexión en comparación con el material compuesto 1, compuesto únicamente por resina y cáñamo.

Hipótesis alternativa: El material compuesto 2 con matriz de resina epoxi reforzada con cáñamo, PET y neumático no demostrará resultados superiores en ensayos de flexión en comparación con el material compuesto 1, compuesto únicamente por resina y cáñamo.

Solución matemática

Para este análisis, se trabajará con un nivel de confianza del 95%, lo que equivale a un margen de error del 5%.

El margen de error se utiliza para determinar el nivel de significancia, que en este caso es:  $\alpha = 0.05/2 = 0.025$  (17)

Este valor nos sirve para determinar la región de rechazo en la distribución de t - Student.

Grados de libertad:  $gl = n_1 + n_2 - 2$  (18)

Cálculo de varianza

$$S_1^2 = \frac{\sum(Xi - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (19)$$

Cálculo de Sp

$$S_p = \sqrt{\frac{S_1^2(n_1 - 1) + S_2^2(n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (20)$$

Con el valor Sp se calcula t

$$t = \frac{(\bar{X}1 - \bar{X}2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (21)$$

	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84
4	0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60
5	0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03
6	0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71
7	0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50
8	0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36
9	0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25
10	0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17
11	0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11
12	0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05
13	0.69	1.20	1.35	1.77	2.16	2.53	2.65	3.01
14	0.69	1.20	1.35	1.76	2.14	2.51	2.62	2.98
15	0.69	1.20	1.34	1.75	2.13	2.49	2.60	2.95
16	0.69	1.19	1.34	1.75	2.12	2.47	2.58	2.92

Figura 26: Distribución t-Student según el nivel de significancia y los grados de libertad

El valor t-calculado debe estar dentro del rango de (-2.75 y 2.75), que son los límites de la distribución t-tabulada en los extremos.

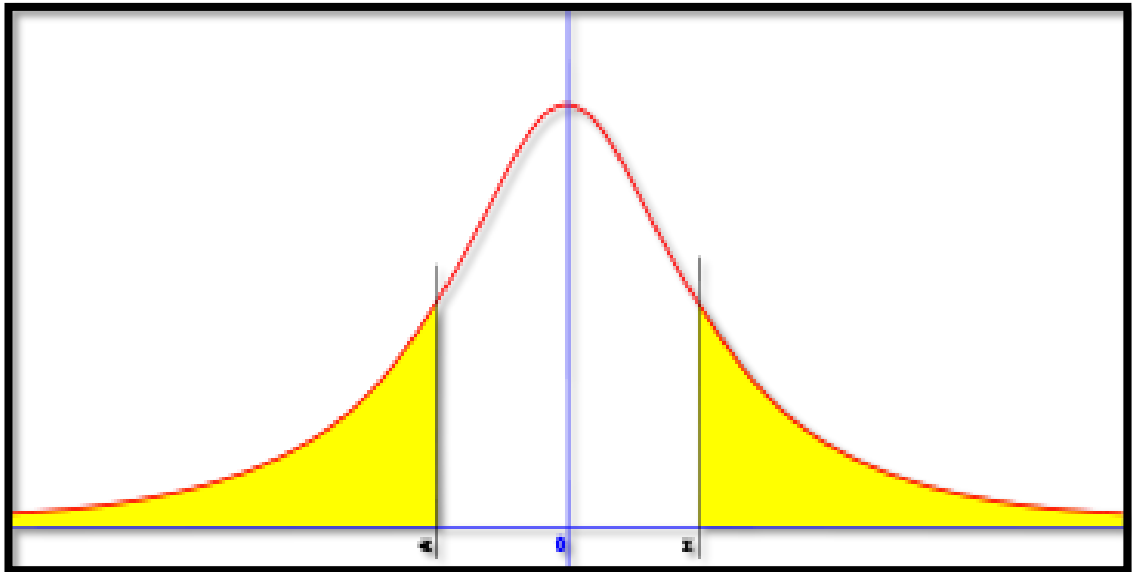


Figura 27: Gráfica de T- Student

### 3.2.1. Método T-Student para el ensayo a flexión

Tabla 18: Datos de esfuerzo de los materiales compuestos

	FLEXIÓN	
	Material 1	Material 2
	Esfuerzo a flexión (MPa)	Esfuerzo a flexión (MPa)
1	84,59	72,03
2	62,05	73,42
3	55,72	61,8
4	59,7	71,95
5	54,16	63,35

Hi: El promedio del material 1 es igual al promedio del material 2

Ho: El promedio del material 1 no es igual al promedio del material 2

X:	Promedio Material 1	63,244
Y:	Promedio Material 2	68,510

n1:	Rango de datos Material 1	5
n2:	Rango de datos Material 2	5

S1-2:	Varianza muestral Material 1	152,192
S2-2:	Varianza muestral Material 2	29,995
Sc-2:	Varianza común	91,094

t:	t-student	-0,872
gl:	grados de libertad	8
$\alpha$ :	alfa	0,05
t*:	Valor crítico a derechas e izquierdas	2,306
p-valor	Probabilidad asignada a t-s valor	0,408
	si P-valor es menor al nivel de significancia alfa, se rechaza la hipótesis nula	

<b>Decisión:</b>
Se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta hipótesis nula
<b>CONCLUSIÓN</b>
El promedio de esfuerzo máximo de flexión generado por el material 1 no es igual al promedio del esfuerzo de flexión generado por el material 2

### 3.2.2. Método T-Student para el ensayo a tracción

*Tabla 19: Datos de esfuerzo a tracción de los Materiales Compuestos*

	TRACCIÓN	
	Material 1	Material 2
	Esfuerzo de flexión (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1	12,23768	27,656
2	11,657072	24,70432
3	15,06424	15,057504
4	10,853952	21,13616
5	17,06272	18,03552

Hi: El promedio del material 1 es igual al promedio del material 2

Ho: El promedio del material 1 no es igual al promedio del material 2

X:	Promedio Material 1	13,375
Y:	Promedio Material 2	13,659

n1:	Rango de datos Material 1	5
n2:	Rango de datos Material 2	5

S1-2:	Varianza muestral Material 1	6,763
S2-2:	Varianza muestral Material 2	25,410
Sc-2:	Varianza común	16,087

t:	t-student	-0,138
gl:	grados de libertad	8
$\alpha$ :	alfa	0,05
t*:	Valor crítico a derechas e izquierdas	2,306
p-valor	Probabilidad asignada a t-s valor	0,893
	si P-valor es menor al nivel de significancia alfa, se rechaza la hipótesis nula	

<b>Decisión:</b>
Se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta hipótesis nula
<b>CONCLUSIÓN</b>
El promedio de esfuerzo máximo de tracción generado por el material 1 no es igual al promedio del esfuerzo de tracción generado por el material 2.

### 3.2.3. Método T-Student para el ensayo a compresión

*Tabla 20: Datos de esfuerzo a compresión de los materiales compuestos*

	<b>COMPRESIÓN</b>	
	Material 1	Material 2
	Esfuerzo de flexión (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1	19,28092105	19,20164474
2	24,72368421	28,63618421
3	24,68601974	23,55016447
4	26,44703947	28,89539474
5	19,93371711	31,81990132

Hi: El promedio del material 1 es igual al promedio del material 2

Ho: El promedio del material 1 no es igual al promedio del material 2

X:	Promedio Material 1	23,014
Y:	Promedio Material 2	26,421

n1:	Rango de datos Material 1	5
n2:	Rango de datos Material 2	5

S1-2:	Varianza muestral Material 1	10,232
S2-2:	Varianza muestral Material 2	25,135
Sc-2:	Varianza común	17,683

t:	t-student	-1,281
gl:	grados de libertad	8
$\alpha$ :	alfa	0,05
t*:	Valor crítico a derechas e izquierdas	2,306
p-valor	Probabilidad asignada a t-s valor	0,236
	si P-valor es menor al nivel de significancia alfa, se rechaza la hipótesis nula	



<b>Decisión:</b>
Se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta hipótesis nula
<b>CONCLUSIÓN</b>
El promedio de esfuerzo máximo de compresión generado por el material 1 no es igual al promedio del esfuerzo de compresión generado por el material 2

#### **3.2.4. Análisis de Varianza**

El método ANOVA (Análisis de Varianza) en el programa Minitab es una herramienta estadística utilizada para comparar las medias de dos o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellos. El análisis de varianza se basa en la descomposición de la variabilidad total de los datos en dos componentes: la variabilidad entre los grupos y la variabilidad dentro de los grupos. [24]

Cuando se realiza un análisis de varianza en Minitab, el programa calcula estadísticas como la suma de cuadrados entre los grupos y la suma de cuadrados dentro de los grupos. Estos valores se utilizan para obtener la F-estadística, que es una medida de la diferencia entre las medias de los grupos en comparación con la variabilidad dentro de los grupos. [24]

Si el valor de la F-estadística es lo suficientemente grande y la probabilidad asociada (valor p) es menor que un nivel de significancia predefinido, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay al menos una diferencia significativa entre las medias de los grupos. [25]

El análisis de varianza en Minitab es una herramienta valiosa para estudiar la variabilidad y las diferencias entre grupos en estudios experimentales y comparativos. Ayuda a los investigadores y analistas a identificar qué factores tienen un impacto significativo en las mediciones y a entender mejor las relaciones entre las variables. Con este análisis, se pueden tomar decisiones informadas y realizar comparaciones precisas en diversos campos como la ciencia, la ingeniería, la medicina y las ciencias sociales. [25]

## Método

**Tabla 21: Método**

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

## Información del factor

**Tabla 22: Información del factor**

Factor	Niveles	Valores
Factor	6	F - Material 1; F - Material 2; T - Material 1; T - Material 2; C - Material 1; C -Material 2

## Análisis de Varianza

**Tabla 23: Análisis de varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	5	13934,9	2786,97	66,96	0,000
Error	24	998,9	41,62		
Total	29	14933,8			

## Resumen del modelo

**Tabla 24: Resumen del modelo**

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
6,45145	93,31%	91,92%	89,55%

## Medias

**Tabla 25: Medias**

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
F - Material 1	5	63,24	12,34	(57,29; 69,20)
F - Material 2	5	68,51	5,48	(62,56; 74,46)
T - Material 1	5	13,38	2,60	(7,42; 19,33)
T - Material 2	5	21,32	5,04	(15,36; 27,27)
C - Material 1	5	23,01	3,20	(17,06; 28,97)
C -Material 2	5	26,42	5,01	(20,47; 32,38)

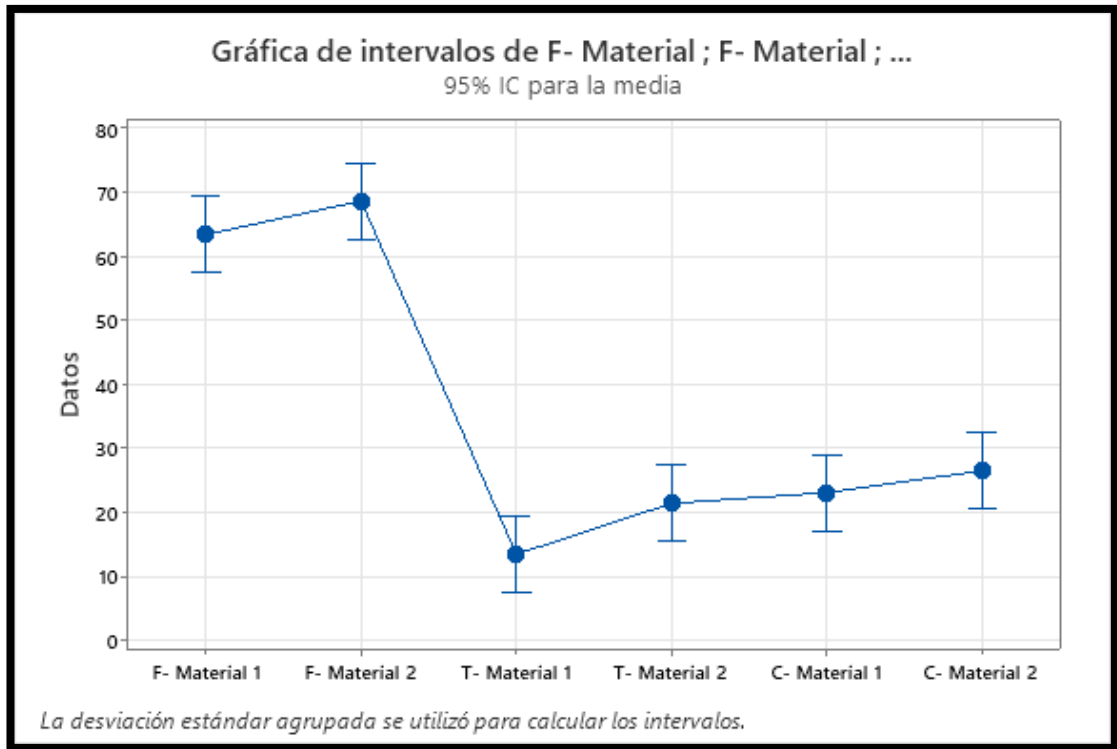
Desv.Est. agrupada = 6,45145

## Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

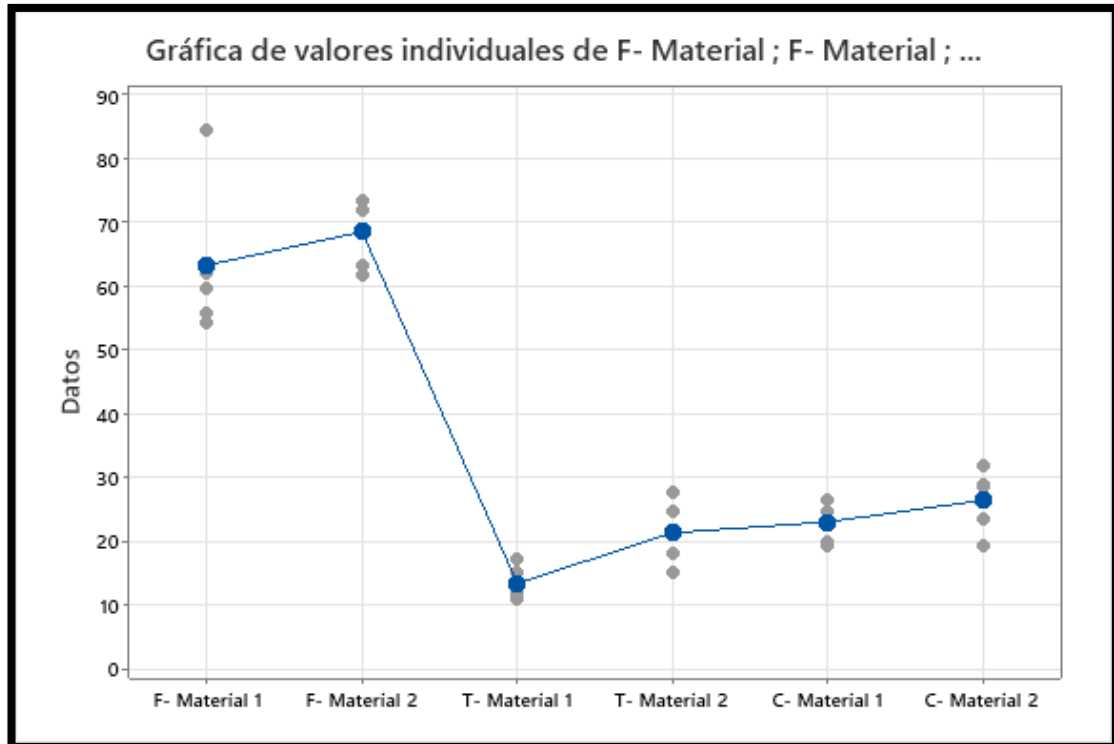
**Tabla 26: Método de Turkey**

Factor	N	Media	Agrupación		
F - Material 2	5	68,51	A		
F - Material 1	5	63,24	A		
C -Material 2	5	26,42		B	
C - Material 1	5	23,01		B	C
T - Material 2	5	21,32		B	C
T - Material 1	5	13,38			C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



**Figura 28:** Gráfica de intervalos



**Figura 29:** Gráfica de valores individuales

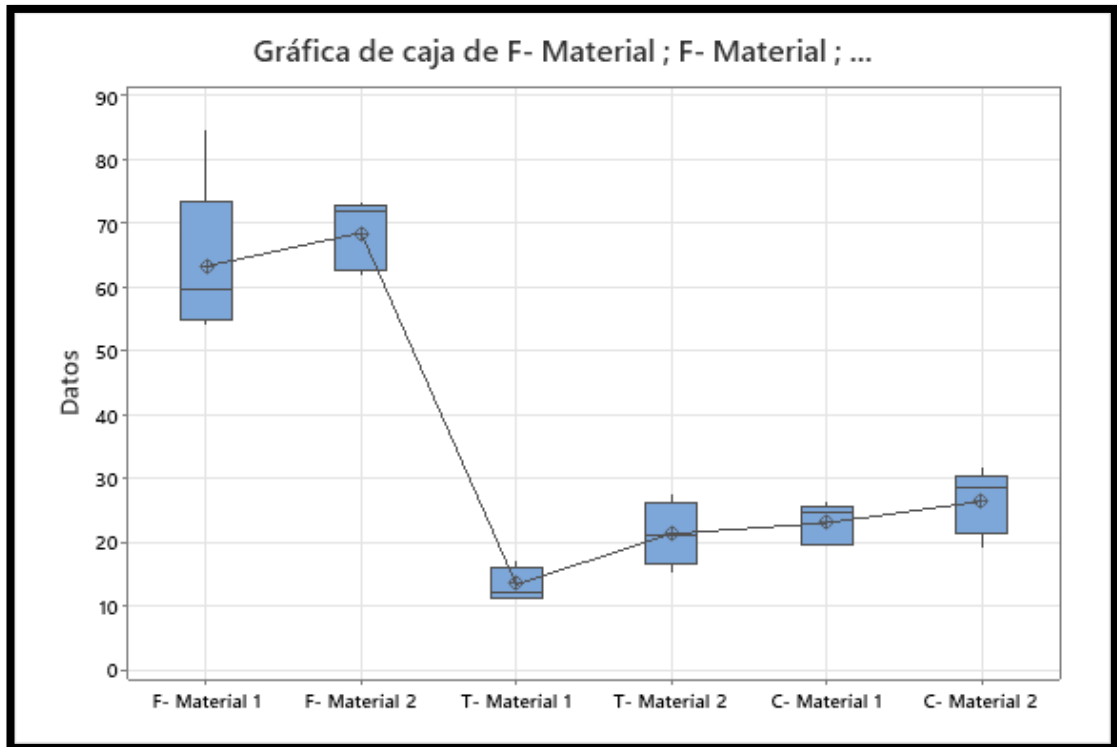


Figura 30: Gráfica de caja

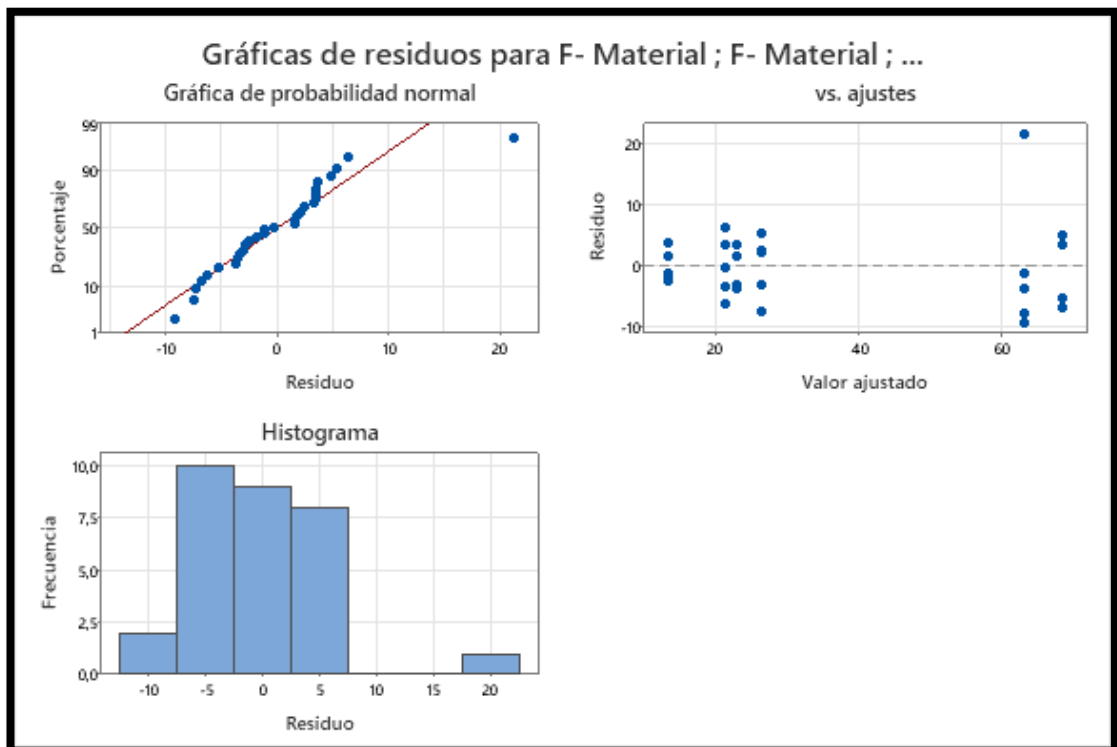


Figura 31: Gráfica de residuos

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

- Los parámetros empleados en el conformado y fabricación de los dos materiales compuestos fueron los siguientes. Para el material compuesto 1, se utilizó una masa nominal de 222.55gr de resina epóxica (fracción volumétrica de 65%) y 113.05gr de fibra de cáñamo como refuerzo (fracción de 35%). Por otro lado, para el material compuesto 2, se empleó una masa nominal de 222.55gr. de resina epóxica (fracción de 65%), reforzada con 5.17gr. de fibra de cáñamo (fracción de 20%), 44.57gr de plástico PET (fracción de 10%) y con 8.08gr de neumático pulverizado (fracción volumétrica de 5%).
- La caracterización mecánica del material compuesto de resina epóxica y fibra de cáñamo se llevó a cabo siguiendo las Normas ASTM D7264 / D7264M-07 para el ensayo de flexión, ASTM D3039 / D3039M para el ensayo de tracción y ASTM D695 - 02a para el ensayo de compresión. A través de estos ensayos, se pudo determinar que los materiales compuestos que incluyen fibra de cáñamo, plástico PET y neumático presentan mejores propiedades en comparación con aquellos que solo contienen fibra de cáñamo. Esto se debe a que la incorporación de plástico y neumático mejora las propiedades mecánicas del material y aumenta su capacidad para soportar cargas.
- La evaluación de los resultados de los 3 ensayos mecánicos permitió determinar que el material compuesto 2, fabricado con un 65% de matriz (resina epóxica) y un 35% de refuerzo (20% cáñamo - 10% PET - 5% neumático), exhibe las mejores propiedades mecánicas. Los valores obtenidos para este material compuesto son los siguientes:
  - Esfuerzo máximo a flexión = 73,42MPa
  - Esfuerzo máximo a tracción = 27,66MPa
  - Esfuerzo máximo a compresión = 31,82MPa

Con la prueba SEN se determinó que en el material compuesto 2 tiene mejor adherencia ya que se aumentó como refuerzo el material plástico y el neumático pulverizado

## **4.2. RECOMENDACIONES**

- Para futuras investigaciones, se sugiere ampliar el rango de parámetros estudiados en la evaluación de propiedades mecánicas de materiales compuestos, considerando otros factores que puedan influir en su comportamiento, como la concentración de aditivos, la temperatura de procesamiento y la relación de mezcla de los componentes.
- Se recomienda utilizar técnicas de caracterización adicionales, como microscopía electrónica, para examinar la morfología y la distribución de las fases en los materiales compuestos, lo que proporcionaría una comprensión más profunda de las relaciones estructura-propiedad.
- Es importante establecer estándares internos de calidad y reproducibilidad en el laboratorio para garantizar la consistencia en los resultados de los ensayos y mejorar la confiabilidad de los datos obtenidos.
- Para la aplicación práctica de los materiales compuestos desarrollados, se debe realizar un análisis de viabilidad económica y ambiental para evaluar la sostenibilidad y la competitividad de su producción a gran escala, considerando aspectos como la disponibilidad de materias primas y el impacto en la reducción de residuos plásticos y neumáticos.

## REFERENCIAS

- [1] A. Faiz, Z. Islam, M. Sultan, E. Sarker y R. Islam, «Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review,» *CellPress*, 2022.
- [2] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding y S. Jalali, «Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber,» *Construction and Building Materials*, pp. 714-724, 2012.
- [3] B. Harris, «ENGINEERING COMPOSITE MATERIALS,» London , The Institute of Materials, 1999, pp. 6-7.
- [4] F. Stupenengo, «Materiales y Materias Primas,» Buenos Aires, Saavedra 789, 2011, pp. 7-9.
- [5] Maria del Carmen Manchego, «Tipos de Resinas y Sus Aplicaciones,» Resistor, 2010, p. 10.
- [6] Y. T. M. S. M. Ochi, «Curing Mechanismo of Epoxy Resin,» nippon kagaku kaishi, kaishi, 1975, p. 16.
- [7] T. Jami, D. Rawtani y Y. K. Agrawal, «Hemp concrete: carbon-negative construction,» *ICE*, 2016.
- [8] C. Magwood, essential HEMPCRETE CONSTRUCTION, Canada: New Society, 2016, pp. 10-122.
- [9] H. N. Zealand, «Hemp New Zealand,» Hemp, 2017. [En línea]. Available: <https://hempnz.co.nz/learn/hemp-fibre-hurd/>.
- [10] A. Fazli y D. Rodrigue, «Recycling Waste Tires into Ground Tire Rubber,» *Journal of Composites Science*, 2022.
- [11] J. L. Maure, «Fabricación de ladrillos a base de polímeros PET y virutas metálicas,» Panamá, 2018.
- [12] P. J. A. AGUILAR, «“LADRILLOS ELABORADOS CON PLÁSTICO RECICLADO (PET), PARA MAMPOSTERÍA NO PORTANTE”,» Cuenca , 2016.
- [13] R. R. y. M. Adams, «Compression Testing of Polymers,» Berlin, Heidelberg, 2016, pp. 74-79.
- [14] J. Hodgkinson, «Mechanical testing of advanced fibre composites,» USA, Woodhead Publishing Ltd, 2000, pp. 250-276.
- [15] J. Clavijo, «Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido SEM,» Bogota, Revista Elementos , 2012, p. 7.

- [16] M. Q. Patton, «Qualitative Research & Evaluation Methods,» Londres, SAGE Publications, 2014, p. 107.
- [17] S. Lohr, «Sampling: Design and Analysis,» Arizona , An International Thomson Publishing Company, 2021, pp. 420-427.
- [18] D. R. Tilley, «Howard T. Odum's contribution to the laws of energy,» USA, Ecological Modelling, 2004, pp. 2-3.
- [19] E. S. y. D. Marcus, «Hemp: A New Crop with New Uses for North America,» Seattle, ASHS Press, 2002, pp. 284 - 326.
- [20] K. Y. y. J. Yang, «Poly(ethylene terephthalate) Beverage Containers,» London, Principal and practice , 2011, pp. 403-421.
- [21] R. Hernandez, «State of the Art on the Reuse of Rubber from Scrap Tires.,» México, Rubber Chemistry, 2016, pp. 272-289.
- [22] E. Barbero, «Introduction to Composite Materials Design,» Mexico DF, CRC Press, 2017, pp. 15-22.
- [23] M. Ulutan, «A review on composite materials open mold manufacturing,» Pereira , The open Mechanical Engineering Journal , 2013, pp. 59 - 65.
- [24] D. M. & E. Peck, «Introduction to Linear Regression Analysis,» John Wiley & Sons, 2012, p. 580.
- [25] N. D. & H. Smith, «Applied Regression Analysis,» John Wiley & Sons., 1998, p. 227.
- [26] A. Marija Jefimova y S. Tafertshofer, «Innovation Adoption for Eco Materials in the Construction Industry in Sweden: How Three Players Can Actively Foster the Adoptio Process,» University of Gothenburg, 2021.
- [27] T. Jami, S. Karade y L. Singh, «A review of the properties of hemp concrete for green building,» *Journal of Cleaner Production*, 2019.
- [28] A. Faiz, Z. Islam, M. Sultan, E. Sarker y R. Islam, «Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review,» 2022.

## ANEXOS



# RESINA EPOXI



## Información técnica

**PRODUCTO DESTINADO SOLAMENTE PARA USO PROFESIONAL**

### Componentes del producto

Resina epoxi - componente A  
Activador de poliamina - componente B

### Descripción del producto

Resina epoxi estructural, destinada para laminado manual, completamente compatible con fibra de vidrio y carbono. La viscosidad del producto ha sido adaptada, para equilibrar una fácil aplicación con adecuada penetración en las fibras. El laminado endurecido ofrece excelentes propiedades mecánicas y resistencia a altas temperaturas.

### Datos físicos y químicos

Color: incolora  
Grado de brillo: Brillo  
Rendimiento: 0,3÷0,7 kg por 1m<sup>2</sup> en una capa.

### Propiedades mecánicas de resina endurecida

Resistencia a la tracción	80	MPa
Alargamiento hasta rotura	7	%
Módulo de elasticidad durante alargamiento	3400	MPa
Resistencia a la flexión	130	MPa
Módulo de elasticidad durante flexión	3400	MPa
Compresión	110	MPa
Resistencia a martilleo	30÷40	kJ/m <sup>2</sup>
Resistencia térmica	64	°C

\* para endurecimiento en condiciones: 5 horas, 50°C.

### Proceso de aplicación



#### Uso

Producto de uso universal. Útil para construir y reparar elementos dañados de embarcaciones. Recomendado para laminado, cerramiento, refuerzo de superficies, pegado y unión de diferentes elementos estructurales. Unida con láminas de fibra de vidrio, ideal para reparaciones manuales de daños por encima y por debajo de la línea de flotación.

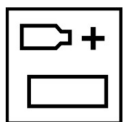
El producto presenta una excelente adherencia a cualquier tipo de superficie. Se puede aplicar sobre superficies metálicas, también sin imprimación, superficies de acero o aluminio, laminados de epoxi y poliéster, madera.

### Preparación de superficie

La superficie debe desengrasarse y lijarse con papel de lija, con grano 80÷180. Limpiar el polvo y desengrasar. La sal y demás suciedad, debe limpiarse con agua potable.

### Condiciones de aplicación

La temperatura mínima de aplicación de resina epoxi es de +15°C. Los mejores resultados se obtienen a temperatura 20÷25°C. Humedad relativa del aire no debe superar 70%.



<b>Proporciones de componentes</b>	Resina : Activador
Partes de peso: (g)	100 : 35
Partes de volumen: (l)	100 : 40

Mezclar bien los componentes. Preparar justo la cantidad necesaria, para que pueda ser utilizada durante un breve periodo de tiempo.

# RESINA EPOXI



## Información técnica

### PRODUCTO DESTINADO SOLAMENTE PARA USO PROFESIONAL

Tiempo de aplicación, después de mezclar con activador: 45 minutos, a temperatura de +23°C.

#### Proporciones de uso de resina, en relación al refuerzo de fibra de vidrio.

Para obtener un laminado ideal, con resistencia adecuada, utilizar:  
2 kg de resina por cada 1 kg fibra de vidrio en polvo.  
1 kg de resina por cada 1 kg de fibra de vidrio tejida.

#### Aplicación



Preparar un trozo adecuado de fibra de vidrio, para que supere aprox. 2 cm cada lado de área dañada.

Aplicar la resina mezclada con activado, utilizando una brocha.

Colocar la fibra de vidrio, apretar y mojar con resina, utilizando una brocha. Se pueden aplicar varias capas de fibra de vidrio.

Esperar aprox. 24 horas. Transcurrido ese tiempo, el laminado se puede procesar mecánicamente o alisar con masilla epoxi.



#### ATENCIÓN: No verter al bote, los restos de mezcla no utilizados.

**Tiempo de endurecimiento** 7 horas, a temp. 20°C,  
Endurecimiento completo 7 días, a temp. 20°C.

Una temperatura inferior a 20°C prolonga sensiblemente el tiempo de endurecimiento.

#### Siguientes tareas

Después de endurecimiento, lijar la superficie del laminado con papel de lija, con grano P80÷P120 y rematar con masilla epoxi Sea-Line®.

Para siguientes tareas, utilizar:

- imprimaciones epoxi Sea-Line®,
- barnices superficiales Sea-Line®.

**Atención: Antes de aplicar el sistema de poliéster, tipo gel coat, top coat, se recomienda cubrir con una fina capa de imprimación epoxi ligera Sea-Line®.**

#### Observaciones generales

Durante el uso de productos epoxi, es necesario utilizar equipo de protección individual. Proteger las vías respiratorias y los ojos.

Ventilar adecuadamente las zonas de trabajo.

Limpiar las herramientas inmediatamente después de aplicar.

**Atención: Por su propia seguridad, proceder siempre según las instrucciones recogidas en la Hoja de Características de Sustancia Peligrosa de cada producto.**

#### Almacenamiento

Los componentes del producto deben guardarse en envases cerrados, en espacios secos y fríos. ¡Cerrar inmediatamente los envases, después de coger la cantidad deseada del producto!

A temperaturas bajas, es posible que aparezcan cristales de resina. El producto puede cristalizar o enturbiar. Es un proceso reversible. La resina debe calentarse hasta una temperatura de 50÷60°C. Después de disolver los cristales, la resina recupera sus propiedades.

#### Periodo de validez

Resina epoxi - 12 meses desde la fecha de producción

Activador de poliamina - 12 meses desde la fecha de producción

#### Garantía de calidad

El proceso de fabricación, el control de calidad y suministro se realizan conforme el estándar ISO 9001 y 14001.

Todas las informaciones se basan en análisis exhaustivos de laboratorio y abundante experiencia. Una posición firme en el mercado, no nos exonera de un continuo control de calidad de nuestros productos. No obstante, no nos hacemos responsables por los efectos finales de un uso o almacenamiento inadecuados de nuestro producto, así como, cualquier trabajo realizado contraviniendo las buenas prácticas del sector.



# Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 7264/D 7264M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

## 1. Scope

1.1 This test method determines the flexural stiffness and strength properties of polymer matrix composites.

1.1.1 *Procedure A*—A three-point loading system utilizing center loading on a simply supported beam.

1.1.2 *Procedure B*—A four-point loading system utilizing two load points equally spaced from their adjacent support points, with a distance between load points of one-half of the support span.

NOTE 1—Unlike Test Method D 6272, which allows loading at both one-third and one-half of the support span, in order to standardize geometry and simplify calculations this standard permits loading at only one-half the support span.

1.2 For comparison purposes, tests may be conducted according to either test procedure, provided that the same procedure is used for all tests, since the two procedures generally give slightly different property values.

1.3 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

- D 790 Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
- D 2344/D 2344M Test Method for Short-Beam Strength of

Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates

- D 3878 Terminology for Composite Materials
  - D 5229/D 5229M Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials
  - D 5687/D 5687M Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation
  - D 6272 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending
  - D 6856 Guide for Testing Fabric-Reinforced “Textile” Composite Materials
  - E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines
  - E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing
  - E 18 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials
  - E 122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With a Specified Tolerable Error, the Average for a Characteristic of a Lot or Process
  - E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods
  - E 456 Terminology Relating to Quality and Statistics
  - E 1309 Guide for Identification of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials in Databases
  - E 1434 Guide for Recording Mechanical Test Data of Fiber-Reinforced Composite Materials in Databases
- 2.2 *Other Documents:*
- ANSI Y14.5-1999 Dimensioning and Tolerancing—Includes Inch and Metric<sup>3</sup>
  - ANSI B46.1-1995 Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)<sup>3</sup>

## 3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D 3878 defines the terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology E 6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E 456 and Practice E 177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D 3878 shall have precedence over the other documents.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Lamina and Laminate Test Methods.

Current edition approved April 1, 2007. Published April 2007. Originally approved in 2006. Last previous edition approved in 2006 as D 7264/D 7264M – 06.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, [www.astm.org](http://www.astm.org), or contact ASTM Customer Service at [service@astm.org](mailto:service@astm.org). For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard’s Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup> Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

129/2008/11:27:41AM single-user license only, copying and networking prohibited.

Downloaded: 129/2008/11:27:41AM single-user license only, copying and networking prohibited.

WEX to UNIVERSIDADE DE SAO PAULO-CRUESP.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 flexural strength,  $n$ —the maximum stress at the outer surface of a flexure test specimen corresponding to the peak applied force prior to flexural failure.

3.2.2 flexural modulus,  $n$ —the ratio of stress range to corresponding strain range for a test specimen loaded in flexure.

3.3 Symbols:

$b$  = specimen width

$CV$  = sample coefficient of variation, in percent

$E_f^{chord}$  = flexural chord modulus of elasticity

$E_f^{secant}$  = flexural secant modulus of elasticity

$h$  = specimen thickness

$L$  = support span

$m$  = slope of the secant of the load-deflection curve

$n$  = number of specimens

$P$  = applied force

$s_{n-1}$  = sample standard deviation

$x_i$  = measured or derived property

$\bar{x}$  = sample mean

$\delta$  = mid-span deflection of the specimen

$\epsilon$  = strain at the outer surface at mid-span of the specimen

$\sigma$  = stress at the outer surface at mid-span of the specimen

4. Summary of Test Method

4.1 A bar of rectangular cross section, supported as a beam, is deflected at a constant rate as follows:

4.1.1 Procedure A—The bar rests on two supports and is loaded by means of a loading nose midway between the supports (see Fig. 1).

4.1.2 Procedure B—The bar rests on two supports and is loaded at two points (by means of two loading noses), each an equal distance from the adjacent support point. The distance between the loading noses (that is, the load span) is one-half of the support span (see Fig. 2).

4.2 Force applied to the specimen and resulting specimen deflection at the center of span are measured and recorded until the failure occurs on either one of the outer surfaces, or the deformation reaches some pre-determined value.

4.3 The major difference between four-point and three-point loading configurations is the location of maximum bending moment and maximum flexural stress. With the four-point configuration the bending moment is constant between the central force application members. Consequently, the maximum flexural stress is uniform between the central force application members. In the three-point configuration, the maximum flexural stress is located directly under the center

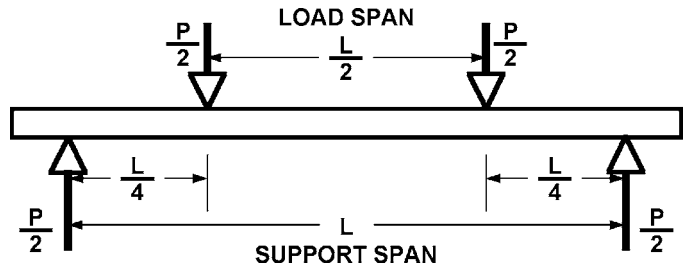


FIG. 2 Procedure B—Loading Diagram

force application member. Another difference between the three-point and four-point configurations is the presence of resultant vertical shear force in the three-point configuration everywhere in the beam except right under the mid-point force application member whereas in the four-point configuration, the area between the central force application members has no resultant vertical shear force. The distance between the outer support members is the same as in the equivalent three-point configuration.

4.4 The test geometry is chosen to limit out-of-plane shear deformations and avoid the type of short beam failure modes that are interrogated in Test Method D 2344/D 2344M.

5. Significance and Use

5.1 This test method determines the flexural properties (including strength, stiffness, and load/deflection behavior) of polymer matrix composite materials under the conditions defined. Procedure A is used for three-point loading and Procedure B is used for four-point loading. This test method was developed for optimum use with continuous-fiber-reinforced polymer matrix composites and differs in several respects from other flexure methods, including the use of a standard span-to-thickness ratio of 32:1 versus the 16:1 ratio used by Test Methods D 790 (a plastics-focused method covering three-point flexure) and D 6272 (a plastics-focused method covering four-point flexure).

5.2 This test method is intended to interrogate long-beam strength in contrast to the short-beam strength evaluated by Test Method D 2344/D 2344M.

5.3 Flexural properties determined by these procedures can be used for quality control and specification purposes, and may find design applications.

5.4 These procedures can be useful in the evaluation of multiple environmental conditions to determine which are design drivers and may require further testing.

5.5 These procedures may also be used to determine flexural properties of structures.

6. Interferences

6.1 Flexural properties may vary depending on which surface of the specimen is in compression, as no laminate is perfectly symmetric (even when full symmetry is intended); such differences will shift the neutral axis and will be further affected by even modest asymmetry in the laminate. Flexural properties may also vary with specimen thickness, conditioning and/or testing environments, and rate of straining. When evaluating several datasets these parameters should be equivalent for all data in the comparison.

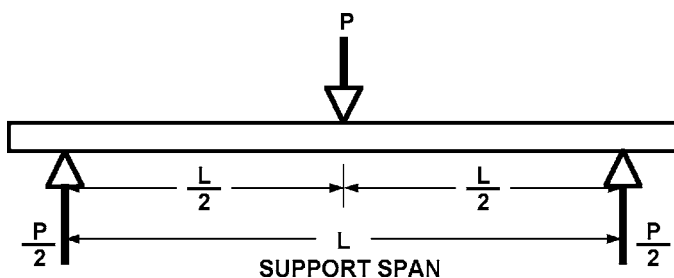


FIG. 1 Procedure A—Loading Diagram

Licensed by WEX to UNIVERSIDADE DE SAO PAULO-CRUESP. Downloaded: 1/29/2008 11:27:41 AM single-user license only, copying and networking prohibited.

6.2 For multidirectional laminates with a small or moderate number of laminae, flexural modulus and flexural strength may be affected by the ply-stacking sequence and will not necessarily correlate with extensional modulus, which is not stacking-sequence dependent.

6.3 The calculation of the flexural properties in Section 13 of this standard is based on beam theory, while the specimens in general may be described as plates. The differences may in some cases be significant, particularly for laminates containing a large number of plies in the  $\pm 45^\circ$  direction. The deviations from beam theory decrease with decreasing width.

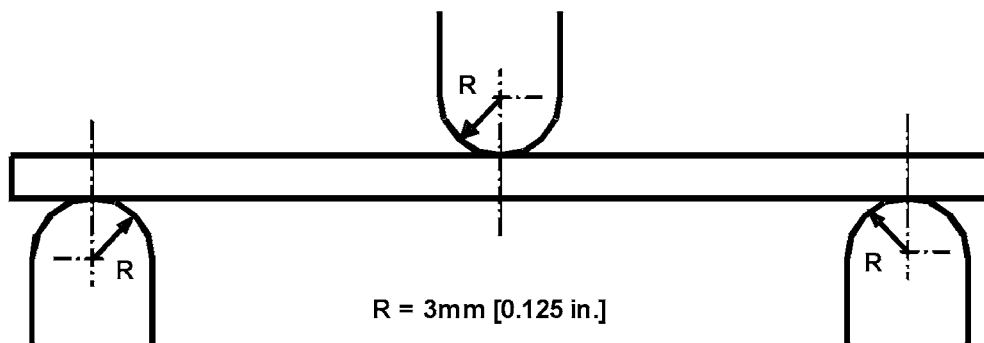
6.4 Loading noses may be fixed, rotatable or rolling. Typically, for testing composites, fixed or rotatable loading noses are used. The type of loading nose can affect results, since non-rolling paired supports on either the tension or compression side of the specimen introduce slight longitudinal forces and resisting moments on the beam, which superpose with the intended loading. The type of supports used is to be reported as described in Section 14. The loading noses should also uniformly contact the specimen across its width. Lack of

uniform contact can affect flexural properties by initiating damage by crushing and by non-uniformly loading the beam. Formulas used in this standard assume a uniform line loading at the specimen supports across the entire specimen width; deviations from this type of loading is beyond the scope of this standard.

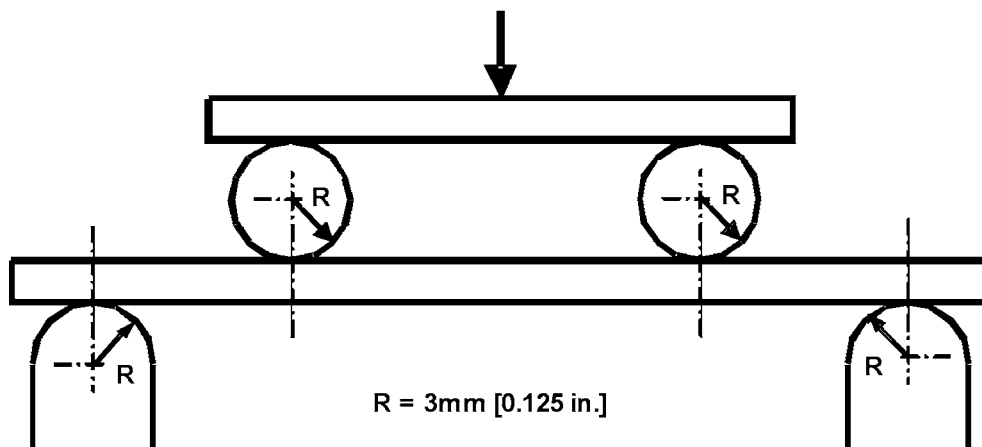
7. Apparatus

7.1 *Testing Machine*—Properly calibrated, which can be operated at a constant rate of crosshead motion, and in which the error in the force application system shall not exceed  $\pm 1\%$  of the full scale. The force indicating mechanism shall be essentially free of inertia lag at the crosshead rate used. Inertia lag shall not exceed 1% of the measured force. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E 4.

7.2 *Loading Noses and Supports*—The loading noses and supports shall have cylindrical contact surfaces of radius 3.00 mm [0.125 in.] as shown in Fig. 3, with a hardness of 60 to 62 HRC, as specified in Test Methods E 18, and shall have finely



Three-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Loading Nose



Four-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Rolling Loading Noses

FIG. 3 Example Loading Nose and Supports for Procedures A (top) and B (bottom)

Licensed by WEX to UNIVERSIDADE DE SAO PAULO-CRUESP. Downloaded: 1/29/2008 11:27:41 AM single-user license only, copying and networking prohibited.



ground surfaces free of indentation and burrs with all sharp edges relieved. Loading noses and supports may be arranged in a fixed, rotatable or rolling arrangement. Typically, with composites, rotatable or fixed arrangements are used.

7.3 *Micrometers*—For width and thickness measurements the micrometers shall use a 4 to 7 mm [0.16 to 0.28 in.] nominal diameter ball-interface on an irregular surface such as the bag side of a laminate, and a flat anvil interface on machined edges or very smooth tooled surfaces. A micrometer or caliper with flat anvil faces shall be used to measure the length of the specimen. The accuracy of the instrument(s) shall be suitable for reading to within 1 % or better of the specimen dimensions. For typical section geometries, an instrument with an accuracy of  $\pm 0.02$  mm [ $\pm 0.001$  in.] is desirable for thickness and width measurement, while an instrument with an accuracy of  $\pm 0.1$  mm [ $\pm 0.004$  in.] is adequate for length measurement.

7.4 *Deflection Measurement*—Specimen deflection at the common center of the loading span shall be measured by a properly calibrated device having an accuracy of  $\pm 1$  % or better of the expected maximum displacement. The device shall automatically and continuously record the deflection during the test.

7.5 *Conditioning Chamber*—When conditioning materials at non-laboratory environments, a temperature/vapor-level controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within  $\pm 1^\circ\text{C}$  [ $\pm 2^\circ\text{F}$ ] and the required vapor level to within  $\pm 3$  % relative humidity, as outlined in Test Method **D 5229/D 5229M**. Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

7.6 *Environmental Test Chamber*—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the test specimen at the required temperature

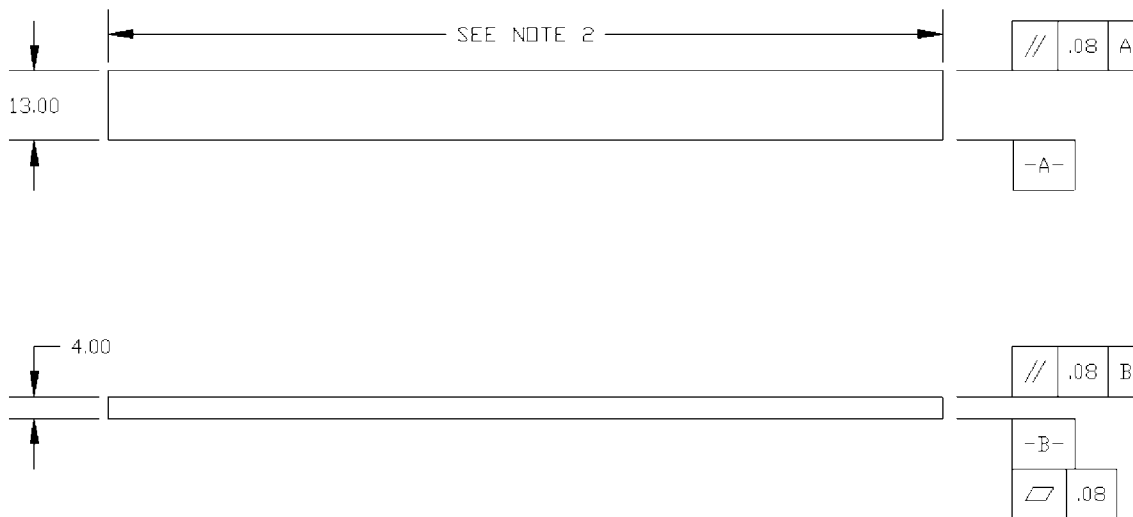
within  $\pm 3^\circ\text{C}$  [ $\pm 5^\circ\text{F}$ ] and the required vapor level to within  $\pm 5$  % relative humidity.

8. Test Specimens

8.1 *Specimen Preparation*—Guide **D 5687/D 5687M** provides recommended specimen preparation practices and should be followed when practical.

8.2 *Specimen Size* is chosen such that the flexural properties are determined accurately from the tests. For flexural strength, the standard support span-to-thickness ratio is chosen such that failure occurs at the outer surface of the specimens, due only to the bending moment (see Notes 2 and 3). The standard span-to-thickness ratio is 32:1, the standard specimen thickness is 4 mm [0.16 in.], and the standard specimen width is 13 mm [0.5 in.] with the specimen length being about 20 % longer than the support span. See Figs. 4 and 5 for a drawing of the standard test specimen in SI and inch-pound units, respectively. For fabric-reinforced textile composite materials, the width of the specimen shall be at least two unit cells, as defined in Guide **D 6856**. If the standard specimen thickness cannot be obtained in a given material system, an alternate specimen thickness shall be used while maintaining the support span-to-thickness ratio [32:1] and specimen width. Optional support span-to-thickness ratios of 16:1, 20:1, 40:1, and 60:1 may also be used provided it is so noted in the report. Also, the data obtained from a test using one support span-to-thickness ratio may not be compared with the data from another test using a different support span-to-thickness ratio.

8.2.1 Shear deformations can significantly reduce the apparent modulus of highly orthotropic laminates when they are tested at low support span-to-thickness ratios. For this reason, a high support span-to-thickness ratio is recommended for flexural modulus determinations. In some cases, separate sets of specimens may have to be used for modulus and strength determination.

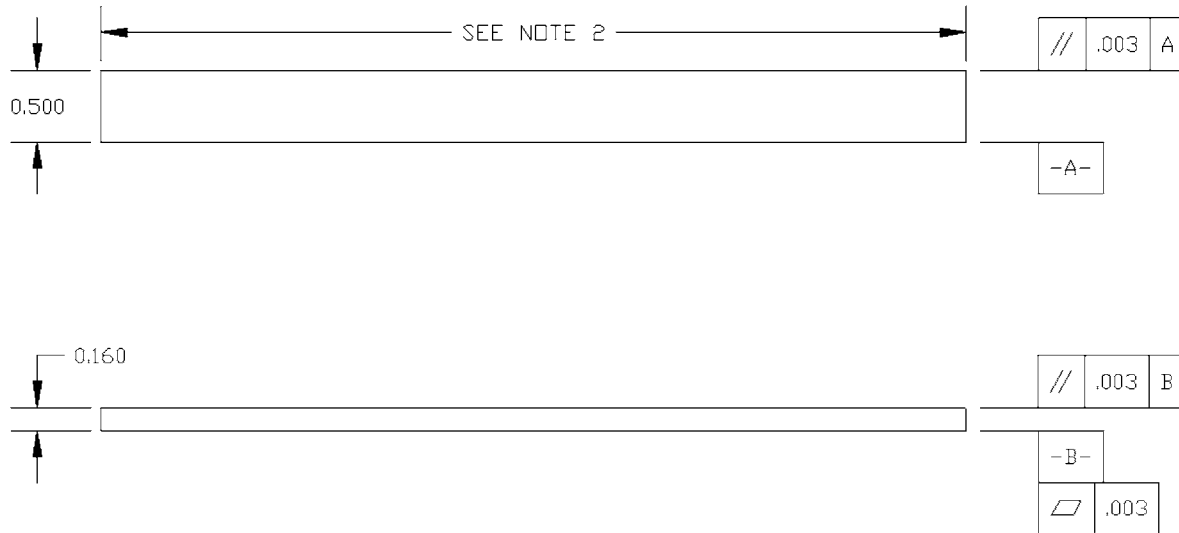


NOTE 1—Drawing interpretation per ANSI Y14.5-1999 and ANSI B46.1-1995.

NOTE 2—See 8.2 and 11.3 of this test standard for the required values of span and overall length.

FIG. 4 Standard Flexural Test Specimen Drawing (SI)

Licensed by WEX to UNIVERSIDADE DE SAO PAULO-CRUESP. Downloaded: 1/29/2008 11:27:41 AM single-user license only, copying and networking prohibited.



NOTE 1—Drawing interpretation per ANSI Y14.5-1999 and ANSI B46.1-1995.

NOTE 2—See 8.2 and 11.3 of this test standard for the required values of span and overall length.

FIG. 5 Standard Flexural Test Specimen Drawing (Inch-Pound)

NOTE 2—A support span-to-thickness ratio of less than 32:1 may be acceptable for obtaining the desired flexural failure mode when the ratio of the lower of the compressive and tensile strength to out-of-plane shear strength is less than 8, but the support span-to-thickness ratio must be increased for composite laminates having relatively low out-of-plane shear strength and relatively high in-plane tensile or compressive strength parallel to the support span.

NOTE 3—While laminate stacking sequence is not limited by this test method, significant deviations from a lay-up of nominal balance and symmetry may induce unusual test behaviors and a shift in the neutral axis.

## 9. Number of Test Specimens

9.1 Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, such as in the case of a designed experiment. For statistically significant data the procedures outlined in Practice E 122 should be consulted. Report the method of sampling.

## 10. Conditioning

10.1 The recommended pre-test specimen condition is effective moisture equilibrium at a specific relative humidity as established by Test Method D 5229/D5229M; however, if the test requester does not explicitly specify a pre-test conditioning environment, conditioning is not required and the test specimens may be tested as prepared.

NOTE 4—The term *moisture*, as used in Test Method D 5229/D5229M, includes not only the vapor of a liquid and its condensate, but the liquid itself in large quantities, as for immersion.

10.2 The pre-test specimen conditioning process, to include specified environmental exposure levels and resulting moisture content, shall be reported with the data.

10.3 If there is no explicit conditioning process, the conditioning process shall be reported as “unconditioned” and the moisture content as “unknown.”

## 11. Procedure

11.1 Condition the specimens as required. Store the specimens in the conditioned environment until test time.

11.2 Following final specimen machining and any conditioning but before testing, measure and record the specimen width and thickness at the specimen mid-section, and the specimen length, to the specified accuracy.

11.3 Measure the span accurately to the nearest 0.1 mm [0.004 in.] for spans less than 63 mm [2.5 in.] and the nearest 0.3 mm [0.012 in.] for spans greater than or equal to 63 mm [2.5 in.]. Use the measured span for all calculations. See Annex A1 for information on the determination of and setting of the span.

11.4 *Speed of Testing*—Set the speed of testing at a rate of crosshead movement of 1.0 mm/min [0.05 in./min] for a specimen with standard dimensions. For specimens with dimensions that vary greatly from the standard dimensions, a crosshead rate that will give a similar rate of straining at the outer surface can be obtained via the method outlined in Test Methods D 790 for Procedure A and Test Method D 6272 for Procedure B.

11.5 Align the loading nose(s) and supports so that the axes of the cylindrical surfaces are parallel. For Procedure A, the loading nose shall be midway between the supports. For Procedure B, the load span shall be one-half of the support span and symmetrically placed between the supports. The parallelism may be checked by means of plates with parallel grooves into which the loading nose(s) and supports will fit when properly aligned. Center the specimen on the supports, with the long axis of the specimen perpendicular to the loading noses and supports. See Annex A1 for setting and measuring span.

11.6 Apply the force to the specimen at the specified crosshead rate. Measure and record force-deflection data at a

rate such that a minimum of 50 data points comprise the force deflection curve. (A higher sampling rate may be required to properly capture any nonlinearities or progressive failure of the specimen.) Measure deflection by a transducer under the specimen in contact with it at the center of the support span, the transducer being mounted stationary relative to the specimen supports. Do not use the measurement of the motion of the loading nose relative to the supports as this will not take into account the rotation of the specimen about the load and support noses, nor account for the compliance in the loading nose or crosshead.

11.7 *Failure Modes*—To obtain valid flexural strength, it is necessary that the specimen failure occurs on either one of its outer surfaces, without a preceding interlaminar shear failure or a crushing failure under a support or loading nose. Failure on the tension surface may be a crack while that on the compression surface may be local buckling. Buckling may be manifested as fiber micro-buckling or ply-level buckling. Ply-level buckling may result in, or be preceded by delamination of the outer ply.

11.7.1 *Failure Identification Codes*—Record the mode, area, and location of failure for each specimen. Choose a standard failure identification code based on the three-part code shown in Fig. 6. A multimode failure can be described by including each of the appropriate failure-mode codes between the parentheses of the M failure mode.

12. Validation

12.1 Values for properties at failure shall not be calculated for any specimen that breaks at some obvious, fortuitous flaw, unless such flaws constitute a variable being studied. Specimens that fail in an unacceptable failure mode shall not be included in the flexural property calculations. Retests shall be made for any specimen for which values are not calculated. If a significant fraction (>50 %) of the specimens fail in an unacceptable failure mode then the span-to-thickness ratio (for excessive shear failures) or the loading nose diameter (crushing under the loading nose) should be reexamined.

13. Calculation

NOTE 5—In determination of the calculated value of some of the properties listed in this section it is necessary to determine if the toe compensation (see Annex A2) adjustment must be made. This toe compensation correction shall be made only when it has been shown that the toe region of the curve is due to take up of the slack, alignment, or seating of the specimen and is not an authentic material response.

13.1 *Maximum Flexural Stress, Procedure A*—When a beam of homogenous, elastic material is tested in flexure as a

beam simply supported at two points and loaded at the midpoint, the maximum stress at the outer surface occurs at mid-span. The stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by the following equation (Note 6):

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{1}$$

where:

- $\sigma$  = stress at the outer surface at mid-span, MPa [psi],
- $P$  = applied force, N [lbf],
- $L$  = support span, mm [in.],
- $b$  = width of beam, mm [in.], and
- $h$  = thickness of beam, mm [in.].

NOTE 6—Eq 1 applies strictly to materials for which the stress is linearly proportional to strain up to the point of rupture and for which the strains are small. Since this is not always the case, a slight error will be introduced in the use of this equation. The equation will however, be valid for comparison data and specification values up to the maximum fiber strain of 2 % for specimens tested by the procedure herein described. It should be noted that the maximum ply stress may not occur at the outer surface of a multidirectional laminate.<sup>4</sup> Laminated beam theory must be applied to determine the maximum tensile stress at failure. Thus, Eq 1 yields an apparent strength based on homogeneous beam theory. This apparent strength is highly dependent on the ply-stacking sequence for multidirectional laminates.

13.2 *Maximum Flexural Stress, Procedure B*—When a beam of homogeneous, elastic material is tested in flexure as a beam simply supported at two outer points and loaded at two central points separated by a distance equal to 1/2 the support span and at equal distance from the adjacent support point, the maximum stress at the outer surface occurs between the two central loading points that define the load span (Fig. 2). The stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by the following equation (Note 7):

$$\sigma = \frac{3PL}{4bh^2} \tag{2}$$

where:

- $\sigma$  = stress at the outer surface in the load span region, MPa [psi],
- $P$  = applied force, N [lbf],
- $L$  = support span, mm [in.],
- $b$  = width of beam, mm [in.], and

<sup>4</sup> For the theoretical details, see Whitney, J. M., Browning, C. E., and Mair, A., "Analysis of the Flexure Test for Laminated Composite Materials," *Composite Materials: Testing and Design (Third Conference)*, ASTM STP 546, 1974, pp. 30-45.

First Character		Second Character		Third Character	
Failure Mode	Code	Failure Area	Code	Failure Location	Code
Tension	T	At loading nose	A	Top	T
Compression	C	Between loading noses	B	Bottom	B
Buckling	B	at Support nose	S	Left	L
interlaminar Shear	S	between Load and support nose	L	Right	R
Multi-mode	M(xyz)	Unknown	U	Middle	M
Other	O			Various	V
				Unknown	U

FIG. 6 Flexure Test Specimen Three-Part Failure Identification Code

Licensed by WEX to UNIVERSIDADE DE SAO PAULO-CRUESP. Downloaded: 1/29/2008 11:27:41 AM single-user license only, copying and networking prohibited.



$h$  = thickness of beam, mm [in.].

NOTE 7—The limitations defined for Eq 1 in Note 6 apply also to Eq 2.

13.3 *Flexural Strength*—The flexural strength is equal to the maximum stress at the outer surface corresponding to the peak applied force prior to failure. (for multidirectional laminates, see Note 6). It is calculated in accordance with Eq 1 and 2 by letting  $P$  equal the peak applied force.

13.4 *Flexural Stress at a Given Strain*—The maximum flexural stress at any given strain may be calculated in accordance with Eq 1 and 2 by letting  $P$  equal the applied force read from the force-deflection curve at the deflection corresponding to the desired strain (for multidirectional laminates, see Note 6). Equations for calculating strains from the measured deflection are given in 13.5 and 13.6.

13.5 *Maximum Strain, Procedure A*—The maximum strain at the outer surface also occurs at mid-span, and it may be calculated as follows:

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (3)$$

where:

- $\epsilon$  = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.],
- $\delta$  = mid-span deflection, mm [in.],
- $L$  = support span, mm [in.], and
- $h$  = thickness of beam, mm [in.].

13.6 *Maximum Strain, Procedure B*—The maximum strain at the outer surface also occurs at mid-span, and it may be calculated as follows:

$$\epsilon = \frac{4.36\delta h}{L^2} \quad (4)$$

where:

- $\delta$  = mid-span deflection, mm [in.],
- $\epsilon$  = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.],
- $L$  = support span, mm [in.], and
- $h$  = thickness of beam, mm [in.].

### 13.7 Flexural Modulus of Elasticity:

13.7.1 *Flexural Chord Modulus of Elasticity*—The flexural chord modulus of elasticity is the ratio of stress range and corresponding strain range. For calculation of flexural chord modulus, the recommended strain range is 0.002 with a start point of 0.001 and an end point 0.003. If the data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use the closest available data point. Calculate the flexural chord modulus of elasticity from the stress-strain data using Eq 5 (for multidirectional or highly orthotropic composites, see Note 8).

$$E_f^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (5)$$

where:

- $E_f^{chord}$  = flexural chord modulus of elasticity, MPa [psi],
- $\Delta\sigma$  = difference in flexural stress between the two selected strain points, MPa [psi], and
- $\Delta\epsilon$  = difference between the two selected strain points (nominally 0.002).

13.7.1.1 Report the chord modulus of elasticity in MPa [psi] for the strain range 0.001 to 0.003. If a different strain range is used in the calculations, also report the strain range used.

NOTE 8—Shear deformation can seriously reduce the apparent flexural modulus of highly orthotropic laminates when they are tested at low span-to-thickness ratios.<sup>5</sup> For this reason, a high span-to-thickness ratio is recommended for flexural modulus determinations. In some cases, separate sets of specimens may have to be used for modulus and strength determination.

13.7.2 *Flexural Secant Modulus of Elasticity*—The flexural secant modulus of elasticity is the ratio of stress to corresponding strain at any given point on the stress-strain curve. The flexural secant modulus is same as the flexural chord modulus in which the initial strain point is zero. It shall be expressed in MPa [psi]. It is calculated as follows (for multidirectional or highly orthotropic composites, see Note 8):

13.7.2.1 *For Procedure A:*

$$E_f^{secant} = \frac{L^3 m}{4bh^3} \quad (6)$$

where:

- $E_f^{secant}$  = flexural secant modulus of elasticity, MPa [psi],
- $L$  = support span, mm [in.],
- $b$  = width of beam, mm [in.],
- $h$  = thickness of beam, mm [in.] and
- $m$  = slope of the secant of the force-deflection curve.

13.7.2.2 *For Procedure B:*

$$E_f^{secant} = \frac{0.17L^3 m}{bh^3} \quad (7)$$

where  $E_f^{secant}$ ,  $m$ ,  $L$ ,  $b$ , and  $h$  are the same as for Eq 6.

13.7.3 Chord modulus of elasticity shall be reported although other definitions of moduli may also be used. However, when other definitions of moduli are used, it should be clearly indicated in the report.

13.8 *Statistics*—For each series of tests calculate the average value, standard deviation, and coefficient of variation for each property determined:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (8)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)}{n-1}}$$

$$CV = 100 \cdot \frac{s_{n-1}}{\bar{x}}$$

where:

- $\bar{x}$  = average value or sample mean,
- $x_i$  = value of single measured or derived property,
- $n$  = number of specimens,
- $s_{n-1}$  = estimated standard deviation,
- $CV$  = coefficient of variation in percentage.

<sup>5</sup> For discussion of these effects, see Zweben C., Smith, W. S., and Wardle, M. W., "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus, and Properties of Fabric-Reinforced Laminates," *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, ASTM STP 674, 1979, pp. 228-262.

## 14. Report

14.1 The information reported for this test method includes material identification and mechanical testing data. These data shall be reported in accordance with Guides E 1309 and E 1471. At a minimum, the following should be reported:

14.1.1 The revision level or date of issue of the test method used.

14.1.2 The date(s) and location(s) of the testing.

14.1.3 The name(s) of the test operator(s).

14.1.4 The test Procedure used (A or B).

14.1.5 Any variations to this test method, anomalies noticed during testing, or equipment problems occurring during testing.

14.1.6 Identification of the material tested including: material specification, material type, material designation, manufacturer, manufacturer's lot or batch number, source (if not from the manufacturer), date of certification, expiration of certification, filament diameter, tow or yarn filament count and twist, sizing, form or weave, fiber areal weight, matrix type, prepreg matrix content, and prepreg volatiles content.

14.1.7 Description of the fabrication steps used to prepare the laminate including: fabrication start date, fabrication end date, process specification, cure cycle, consolidation method, and a description of the equipment used.

14.1.8 Ply orientation stacking sequence of the laminate.

14.1.9 If requested, report density, reinforcement volume fraction, and void content test methods, specimen sampling method and geometries, test parameters, and test data.

14.1.10 Average ply thickness of the material.

14.1.11 Results of any nondestructive evaluation tests.

14.1.12 Method of preparing the test specimens, including specimen labeling scheme and method, specimen geometry, sampling method, and specimen cutting method.

14.1.13 Calibration dates and methods for all measurement and test equipment.

14.1.14 Type of test machine, grips, jaws, alignment data, and data acquisition sampling rate and equipment type.

14.1.15 Dimensions of each specimen to at least three significant figures, including specimen width, thickness, and overall length.

14.1.16 Conditioning parameters and results, and the procedure used if other than that specified in this test method.

14.1.17 Relative humidity and temperature of the testing laboratory.

14.1.18 Environment of the test machine environmental chamber (if used) and soak time at environment.

14.1.19 Number of specimens tested.

14.1.20 Load-span length, support-span length, and support span-to-thickness ratio.

14.1.21 Loading and support nose type and dimensions.

14.1.22 Speed of testing.

14.1.23 Transducer placement on the specimen, transducer type, and calibration data for each transducer used.

14.1.24 Force-deflection curves for each specimen. Note method and offset value if toe compensation was applied to force-deflection curve.

14.1.25 Tabulated data of flexural stress versus strain for each specimen.

14.1.26 Individual flexural strengths and average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population. Note if the failure load was less than the maximum load prior to failure.

14.1.27 Individual strains at failure and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.28 Strain range used for the flexural chord modulus of elasticity determination.

14.1.29 Individual values of flexural chord modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.30 If an alternate definition of flexural modulus of elasticity is used in addition to chord modulus, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

14.1.31 Individual values of the alternate (see above) flexural modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.32 Individual maximum flexural stresses, and the average, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) values for the population. Note any test in which the failure load was less than the maximum load before failure.

14.1.33 For flexural modulus only tests: maximum load applied, strain at maximum applied load, and calculated flexural modulus of elasticity ( $E_f$ ).

14.1.34 Individual maximum flexural strains and the average, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) values for the population. Note any test that was truncated to 2 % strain.

14.1.35 Failure mode and location of failure for each specimen.

## 15. Precision and Bias

15.1 *Precision*—The data required for the development of precision is not currently available for this test method.

15.2 *Bias*—Bias cannot be determined for this test method as no acceptable reference standard exists.

## 16. Keywords

16.1 fiber-reinforced composites; flexural properties; stiffness; strength

(Mandatory Information)

A1. MEASURING AND SETTING SPAN

A1.1 For flexural fixtures that have adjustable spans, it is important that the span between the supports is maintained constant or the actual measured span is used in the calculation of flexural stress, flexural modulus and strain, and the loading noses are positioned and aligned properly with respect to the supports. Some simple steps as follows can improve the repeatability of results when using adjustable span fixtures.

A1.2 *Measurement of Span:*

A1.2.1 This technique is needed to ensure that the correct span, not an estimated span, is used in calculation of results.

A1.2.2 Scribe a permanent line or mark at the exact center of the support where the specimen makes complete contact. The type of mark depends on whether the supports are fixed or rotatable (see Figs. A1.1 and A1.2).

A1.2.3 Using a vernier caliper with pointed tips that is readable to at least 0.1 mm [0.004 in.], measure the distance between the supports, and use this measurement of span in the calculations.

A1.3 *Setting the Span and Alignment of Loading Nose(s)*—To ensure a constant day-to-day setup of the span and ensure the alignment and proper positioning of the loading nose(s), simple jigs should be manufactured for each of the standard setups used. An example of a jig found to be useful is shown in Fig. A1.3.

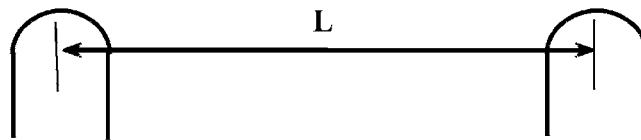


FIG. A1.1 Markings on Fixed Specimen Supports

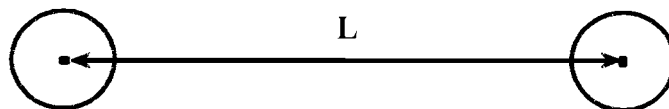


FIG. A1.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

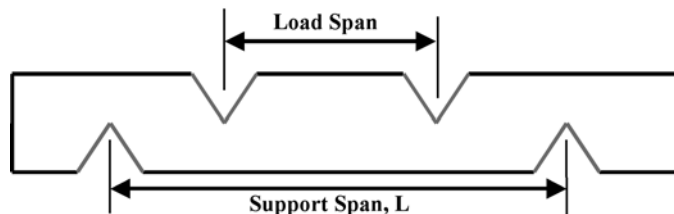


FIG. A1.3 Fixture Used to Align Loading Noses and Supports

A2. TOE COMPENSATION

A2.1 In a typical force-deflection curve (see Fig. A2.1) there is a toe region, AC, which does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a take-up of slack and alignment, or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as flexural modulus, and deflection at failure, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the deflection, or extension axis.

A2.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (see Fig. A2.1), a continuation of the linear (CD) region is constructed through the zero axis. This intersection (B) is the corrected zero deflection point from which all deflections must be measured. The slope can be determined by dividing the change in force between any two points along the line CD (or its extension) by the change in deflection at the same two points (measured from Point B, defined as zero-deflection).

A2.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (see Fig. A2.2), the same kind of toe correction of zero-deflection point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection Point H'. This is extended to intersect the deflection axis at Point B', the corrected zero-deflection point. Using Point B' as zero deflection, the force at any point (G') on the curve can be divided by the deflection at that point to obtain a flexural chord modulus (slope of Line B'G').

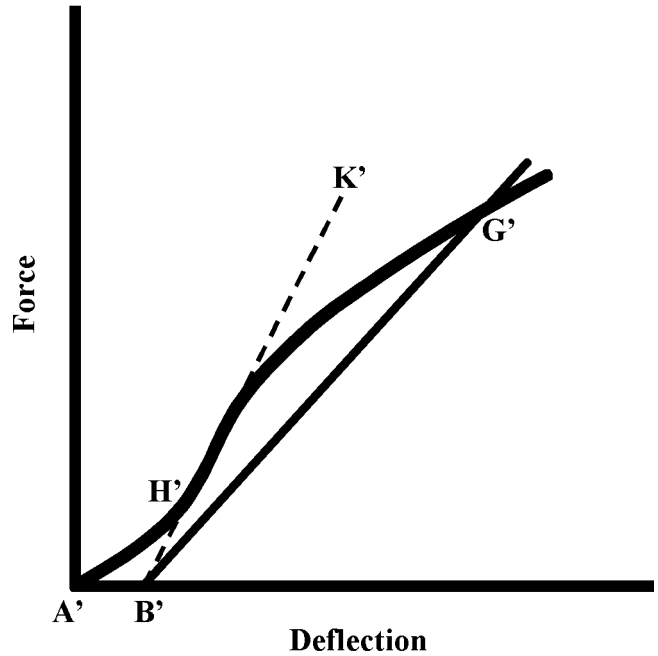


FIG. A2.2 Material without a Hookean Region

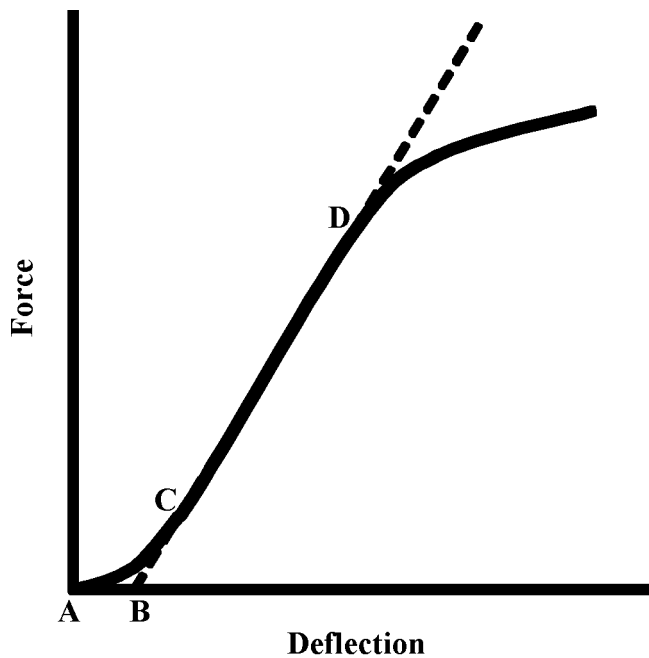


FIG. A2.1 Material with a Hookean Region

Licensed by WEX to UNIVERSIDADE DE SAO PAULO-CRUESP. Downloaded: 1/29/2008 11:27:41AM single-user license only, copying and networking prohibited.

 **D 7264/D 7264M – 07**

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or [service@astm.org](mailto:service@astm.org) (e-mail); or through the ASTM website ([www.astm.org](http://www.astm.org)).*



# Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 3039/D 3039M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

<sup>ε1</sup> NOTE—Eq 5 was revised editorially in December 2002.

## 1. Scope

1.1 This test method determines the in-plane tensile properties of polymer matrix composite materials reinforced by high-modulus fibers. The composite material forms are limited to continuous fiber or discontinuous fiber-reinforced composites in which the laminate is balanced and symmetric with respect to the test direction.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

- D 792 Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement<sup>2</sup>
- D 883 Terminology Relating to Plastics<sup>2</sup>
- D 2584 Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins<sup>3</sup>
- D 2734 Test Method for Void Content of Reinforced Plastics<sup>3</sup>
- D 3171 Test Methods for Constituent Content of Composites Materials<sup>4</sup>
- D 3878 Terminology for Composite Materials<sup>4</sup>
- D 5229/D 5229M Test Method for Moisture Absorption

Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials<sup>4</sup>

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>5</sup>

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing<sup>5</sup>

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers<sup>5</sup>

E 111 Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus<sup>5</sup>

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process<sup>6</sup>

E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature<sup>5</sup>

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods<sup>6</sup>

E 251 Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages<sup>5</sup>

E 456 Terminology Relating to Quality and Statistics<sup>6</sup>

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method<sup>6</sup>

E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading<sup>5</sup>

E 1237 Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages<sup>5</sup>

## 3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D 3878 defines terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology D 883 defines terms relating to plastics. Terminology E 6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E 456 and Practice E 177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D 3878 shall have precedence over the other standards.

### 3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

NOTE—If the term represents a physical quantity, its analytical dimensions are stated immediately following the term (or letter symbol) in fundamental dimension form, using the following ASTM standard symbology for fundamental

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Lamina and Laminate Test Methods.

Current edition approved April 10, 2000. Published July 2000. Originally published as D 3039 – 71T. Last previous edition D 3039 – 95a.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.01.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03.

<sup>5</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

<sup>6</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.





dimensions, shown within square brackets:  $[M]$  for mass,  $[L]$  for length,  $[T]$  for time,  $[Θ]$  for thermodynamic temperature, and  $[nd]$  for nondimensional quantities. Use of these symbols is restricted to analytical dimensions when used with square brackets, as the symbols may have other definitions when used without the brackets.

3.2.1 *nominal value,  $n$* —a value, existing in name only, assigned to a measurable property for the purpose of convenient designation. Tolerances may be applied to a nominal value to define an acceptable range for the property.

3.2.2 *transition region,  $n$* —a strain region of a stress-strain or strain-strain curve over which a significant change in the slope of the curve occurs within a small strain range.

3.2.3 *transition strain,  $\epsilon^{transition}$   $[nd]$ ,  $n$* —the strain value at the mid range of the transition region between the two essentially linear portions of a bilinear stress-strain or strain-strain curve.

3.2.3.1 *Discussion*—Many filamentary composite materials show essentially bilinear behavior during loading, such as seen in plots of either longitudinal stress versus longitudinal strain or transverse strain versus long longitudinal strain. There are varying physical reasons for the existence of a transition region. Common examples include: matrix cracking under tensile loading and ply delamination.

3.3 *Symbols:*

3.3.1  $A$ —minimum cross-sectional area of a coupon.

3.3.2  $B_y$ —percent bending for a uniaxial coupon of rectangular cross section about  $y$  axis of the specimen (about the narrow direction).

3.3.3  $B_z$ —percent bending for a uniaxial coupon of rectangular cross section about  $z$  axis of the specimen (about the wide direction).

3.3.4  $CV$ —coefficient of variation statistic of a sample population for a given property (in percent).

3.3.5  $E$ —modulus of elasticity in the test direction.

3.3.6  $F^{tu}$ —ultimate tensile strength in the test direction.

3.3.7  $F^{su}$ —ultimate shear strength in the test direction.

3.3.8  $h$ —coupon thickness.

3.3.9  $L_g$ —extensometer gage length.

3.3.10  $L_{min}$ —minimum required bonded tab length.

3.3.11  $n$ —number of coupons per sample population.

3.3.12  $P$ —load carried by test coupon.

3.3.13  $P^f$ —load carried by test coupon at failure.

3.3.14  $P^{max}$ —maximum load carried by test coupon before failure.

3.3.15  $s_{n-1}$ —standard deviation statistic of a sample population for a given property.

3.3.16  $w$ —coupon width.

3.3.17  $x_i$ —test result for an individual coupon from the sample population for a given property.

3.3.18  $\bar{x}$ —mean or average (estimate of mean) of a sample population for a given property.

3.3.19  $\delta$ —extensional displacement.

3.3.20  $\epsilon$ —general symbol for strain, whether normal strain or shear strain.

3.3.21  $\epsilon$ —indicated normal strain from strain transducer or extensometer.

3.3.22  $\sigma$ —normal stress.

3.3.23  $\nu$ —Poisson's ratio.

## 4. Summary of Test Method

4.1 A thin flat strip of material having a constant rectangular cross section is mounted in the grips of a mechanical testing machine and monotonically loaded in tension while recording load. The ultimate strength of the material can be determined from the maximum load carried before failure. If the coupon strain is monitored with strain or displacement transducers then the stress-strain response of the material can be determined, from which the ultimate tensile strain, tensile modulus of elasticity, Poisson's ratio, and transition strain can be derived.

## 5. Significance and Use

5.1 This test method is designed to produce tensile property data for material specifications, research and development, quality assurance, and structural design and analysis. Factors that influence the tensile response and should therefore be reported include the following: material, methods of material preparation and lay-up, specimen stacking sequence, specimen preparation, specimen conditioning, environment of testing, specimen alignment and gripping, speed of testing, time at temperature, void content, and volume percent reinforcement. Properties, in the test direction, which may be obtained from this test method include the following:

5.1.1 Ultimate tensile strength,

5.1.2 Ultimate tensile strain,

5.1.3 Tensile chord modulus of elasticity,

5.1.4 Poisson's ratio, and

5.1.5 Transition strain.

## 6. Interferences

6.1 *Material and Specimen Preparation*—Poor material fabrication practices, lack of control of fiber alignment, and damage induced by improper coupon machining are known causes of high material data scatter in composites.

6.2 *Gripping*—A high percentage of grip-induced failures, especially when combined with high material data scatter, is an indicator of specimen gripping problems. Specimen gripping methods are discussed further in 7.2.4, 8.2, and 11.5.

6.3 *System Alignment*—Excessive bending will cause premature failure, as well as highly inaccurate modulus of elasticity determination. Every effort should be made to eliminate excess bending from the test system. Bending may occur as a result of misaligned grips or from specimens themselves if improperly installed in the grips or out-of-tolerance caused by poor specimen preparation. If there is any doubt as to the alignment inherent in a given test machine, then the alignment should be checked as discussed in 7.2.5.

6.4 *Edge Effects in Angle Ply Laminates*—Premature failure and lower stiffnesses are observed as a result of edge softening in laminates containing off-axis plies. Because of this, the strength and modulus for angle ply laminates can be drastically underestimated. For quasi-isotropic laminates containing significant  $0^\circ$  plies, the effect is not as significant.

## 7. Apparatus

7.1 *Micrometers*—A micrometer with a 4- to 5-mm [0.16- to 0.20-in] nominal diameter double-ball interface shall be

used to measure the thickness of the specimen. A micrometer with a flat anvil interface shall be used to measure the width of the specimen. The accuracy of the instruments shall be suitable for reading to within 1 % of the sample width and thickness. For typical specimen geometries, an instrument with an accuracy of  $\pm 2.5 \mu\text{m}$  [ $\pm 0.0001 \text{ in.}$ ] is adequate for thickness measurement, while an instrument with an accuracy of  $\pm 25 \mu\text{m}$  [ $\pm 0.001 \text{ in.}$ ] is adequate for width measurement.

7.2 *Testing Machine*—The testing machine shall be in conformance with Practices E 4 and shall satisfy the following requirements:

7.2.1 *Testing Machine Heads*—The testing machine shall have both an essentially stationary head and a movable head.

7.2.2 *Drive Mechanism*—The testing machine drive mechanism shall be capable of imparting to the movable head a controlled velocity with respect to the stationary head. The velocity of the movable head shall be capable of being regulated as specified in 11.3.

7.2.3 *Load Indicator*—The testing machine load-sensing device shall be capable of indicating the total load being carried by the test specimen. This device shall be essentially free from inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy over the load range(s) of interest of within  $\pm 1 \%$  of the indicated value. The load range(s) of interest may be fairly low for modulus evaluation, much higher for strength evaluation, or both, as required.

NOTE 1—Obtaining precision load data over a large range of interest in the same test, such as when both elastic modulus and ultimate load are being determined, place extreme requirements on the load cell and its calibration. For some equipment, a special calibration may be required. For some combinations of material and load cell, simultaneous precision measurement of both elastic modulus and ultimate strength may not be possible and measurement of modulus and strength may have to be performed in separate tests using a different load cell range for each test.

7.2.4 *Grips*—Each head of the testing machine shall carry one grip for holding the test specimen so that the direction of load applied to the specimen is coincident with the longitudinal axis of the specimen. The grips shall apply sufficient lateral pressure to prevent slippage between the grip face and the coupon. If tabs are used the grips should be long enough that they overhang the beveled portion of the tab by approximately 10 to 15 mm [0.5 in.]. It is highly desirable to use grips that are rotationally self-aligning to minimize bending stresses in the coupon.

NOTE 2—Grip surfaces that are lightly serrated, approximately 1 serration/mm [25 serrations/in.], have been found satisfactory for use in wedge-action grips when kept clean and sharp; coarse serrations may produce grip-induced failures in untabbed coupons. Smooth gripping surfaces have been used successfully with either hydraulic grips or an emery cloth interface, or both.

7.2.5 *System Alignment*—Poor system alignment can be a major contributor to premature failure, to elastic property data scatter, or both. Practice E 1012 describes bending evaluation guidelines and describes potential sources of misalignment during tensile testing. In addition to Practice E 1012, the degree of bending in a tensile system can also be evaluated using the following related procedure. Specimen bending is considered separately in 11.6.1.

7.2.5.1 A rectangular alignment coupon, preferably similar in size and stiffness to the test specimen of interest, is instrumented with a minimum of three longitudinal strain gages of similar type, two on the front face across the width and one on the back face of the specimen, as shown in Fig. 1. Any difference in indicated strain between these gages during loading provides a measure of the amount of bending in the thickness plane ( $B_y$ ) and width plane ( $B_z$ ) of the coupon. The strain gage location should normally be located in the middle of the coupon gage section (if modulus determination is a concern), near a grip (if premature grip failures are a problem), or any combination of these areas.

7.2.5.2 When evaluating system alignment, it is advisable to perform the alignment check with the same coupon inserted in each of the four possible installation permutations (described relative to the initial position): initial (top-front facing observer), rotated back to front only (top back facing observer), rotated end for end only (bottom front facing observer), and rotated both front to back and end to end (bottom back facing observer). These four data sets provide an indication of whether the bending is due to the system itself or to tolerance in the alignment check coupon or gaging.

7.2.5.3 The zero strain point may be taken either before gripping or after gripping. The strain response of the alignment coupon is subsequently monitored during the gripping process, the tensile loading process, or both. Eq 1-3 use these indicated strains to calculate the ratio of the percentage of bending strain to average extensional strain for each bending plane of the alignment coupon and the total percent bending,  $B_{\text{total}}$ . Plotting percent bending versus axial average strain is useful in understanding trends in the bending behavior of the system.

7.2.5.4 Problems with failures during gripping would be reason to examine bending strains during the gripping process in the location near the grip. Concern over modulus data scatter would be reason to evaluate bending strains over the modulus evaluation load range for the typical transducer location. Excessive failures near the grips would be reason to evaluate bending strains near the grip at high loading levels. While the

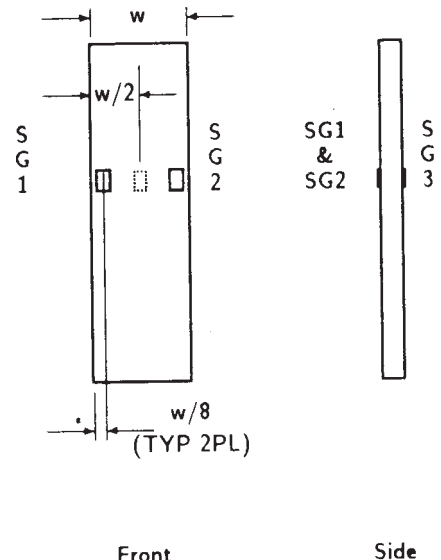


FIG. 1 Gage Locations for System Alignment Check Coupon



maximum advisable amount of system misalignment is material and location dependent, good testing practice is generally able to limit percent bending to a range of 3 to 5 % at moderate strain levels ( $>1000 \mu\epsilon$ ). A system showing excessive bending for the given application should be readjusted or modified.

$$B_y = \frac{\epsilon_{ave} - \epsilon_3}{\epsilon_{ave}} \times 100 \quad (1)$$

$$B_z = \frac{4/3 (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_{ave}} \times 100 \quad (2)$$

where:

$B_y$  = percent bending about system y axis (about the narrow plane), as calculated by Eq 1, %;

$B_z$  = percent bending about system z axis (about the wide plane), as calculated by Eq 2, %;

$\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ , and  $\epsilon_3$  = indicated longitudinal strains displayed by Gages 1, 2, and 3, respectively, of Fig. 1,  $\mu\epsilon$ ; and

$\epsilon_{ave}$  =  $(|\epsilon_1 + |\epsilon_2|)/2 + |\epsilon_3|/2$ .

The total bending component is:

$$B_{total} = |B_y| + |B_z| \quad (3)$$

**7.3 Strain-Indicating Device**—Load-strain data, if required, shall be determined by means of either a strain transducer or an extensometer. Attachment of the strain-indicating device to the coupon shall not cause damage to the specimen surface. If Poisson's ratio is to be determined, the specimen shall be instrumented to measure strain in both longitudinal and lateral directions. If the modulus of elasticity is to be determined, the longitudinal strain should be simultaneously measured on opposite faces of the specimen to allow for a correction as a result of any bending of the specimen (see 11.6 for further guidance).

**7.3.1 Bonded Resistance Strain Gage Selection**—Strain gage selection is a compromise based on the type of material. An active gage length of 6 mm [0.25 in.] is recommended for most materials. Active gage lengths should not be less than 3 mm [0.125 in.].<sup>7</sup> Gage calibration certification shall comply with Test Methods E 251. When testing woven fabric laminates, gage selection should consider the use of an active gage length that is at least as great as the characteristic repeating unit of the weave. Some guidelines on the use of strain gages on composites follow. A general reference on the subject is Tuttle and Brinson.<sup>8</sup>

**7.3.1.1 Surface preparation of fiber-reinforced composites** in accordance with Practice E 1237 can penetrate the matrix material and cause damage to the reinforcing fibers resulting in improper coupon failures. Reinforcing fibers should not be exposed or damaged during the surface preparation process.

<sup>7</sup> A typical gage would have a 0.25-in. active gage length, 350- $\Omega$  resistance, a strain rating of 3 % or better, and the appropriate environmental resistance and thermal coefficient.

<sup>8</sup> Tuttle, M. E. and Brinson, H. F., "Resistance-Foil Strain-Gage Technology as Applied to Composite Materials," *Experimental Mechanics*, Vol 24, No. 1, March 1984; pp. 54–65; errata noted in Vol 26, No. 2, June 1986, pp. 153–154.

The strain gage manufacturer should be consulted regarding surface preparation guidelines and recommended bonding agents for composites pending the development of a set of standard practices for strain gage installation surface preparation of fiber-reinforced composite materials.

**7.3.1.2 Consideration** should be given to the selection of gages having larger resistances to reduce heating effects on low-conductivity materials. Resistances of 350  $\Omega$  or higher are preferred. Additional consideration should be given to the use of the minimum possible gage excitation voltage consistent with the desired accuracy (1 to 2 V is recommended) to reduce further the power consumed by the gage. Heating of the coupon by the gage may affect the performance of the material directly, or it may affect the indicated strain as a result of a difference between the gage temperature compensation factor and the coefficient of thermal expansion of the coupon material.

**7.3.1.3 Consideration** of some form of temperature compensation is recommended, even when testing at standard laboratory atmosphere. Temperature compensation is required when testing in nonambient temperature environments.

**7.3.1.4 Consideration** should be given to the transverse sensitivity of the selected strain gage. The strain gage manufacturer should be consulted for recommendations on transverse sensitivity corrections and effects on composites. This is particularly important for a transversely mounted gage used to determine Poisson's ratio, as discussed in Note 11.

**7.3.2 Extensometers**—For most purposes, the extensometer gage length should be in the range of 10 to 50 mm [0.5 to 2.0 in.]. Extensometers shall satisfy, at a minimum, Practice E 83, Class B-1 requirements for the strain range of interest and shall be calibrated over that strain range in accordance with Practice E 83. For extremely stiff materials, or for measurement of transverse strains, the fixed error allowed by Class B-1 extensometers may be significant, in which case Class A extensometers should be considered. The extensometer shall be essentially free of inertia lag at the specified speed of testing, and the weight of the extensometer should not induce bending strains greater than those allowed in 6.3.

**NOTE 3**—It is generally less difficult to perform strain calibration on extensometers of longer gage length as less precision in displacement is required of the extensometer calibration device.

**7.4 Conditioning Chamber**—When conditioning materials at nonlaboratory environments, a temperature/vaporlevel-controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within  $\pm 3^\circ\text{C}$  [ $\pm 5^\circ\text{F}$ ] and the required relative vapor level to within  $\pm 3\%$ . Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

**7.5 Environmental Test Chamber**—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the gage section of the test specimen at the required test environment during the mechanical test.

**8. Sampling and Test Specimens**

8.1 *Sampling*—Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, such as in the case of a designed experiment. For statistically significant data, the procedures outlined in Practice E 122 should be consulted. Report the method of sampling.

NOTE 4—If specimens are to undergo environmental conditioning to equilibrium, and are of such type or geometry that the weight change of the material cannot be properly measured by weighing the specimen itself (such as a tabbed mechanical coupon), then use another traveler coupon of the same nominal thickness and appropriate size (but without tabs) to determine when equilibrium has been reached for the specimens being conditioned.

8.2 *Geometry*—Design of mechanical test coupons, especially those using end tabs, remains to a large extent an art rather than a science, with no industry consensus on how to approach the engineering of the gripping interface. Each major composite testing laboratory has developed gripping methods for the specific material systems and environments commonly encountered within that laboratory. Comparison of these methods shows them to differ widely, making it extremely difficult to recommend a universally useful approach or set of approaches. Because of this difficulty, definition of the geometry of the test coupon is broken down into the following three levels, which are discussed further in each appropriate section:

Purpose	Degree of Geometry Definition
8.2.1 <i>General Requirements</i>	Mandatory Shape and Tolerances
8.2.2 <i>Specific Recommendations</i>	Nonmandatory Suggested Dimensions
8.2.3 <i>Detailed Examples</i>	Nonmandatory Typical Practices

8.2.1 *General Requirements:*

8.2.1.1 *Shape, Dimensions, and Tolerances*—The complete list of requirements for specimen shape, dimensions, and tolerances is shown in Table 1.

8.2.1.2 *Use of Tabs*—Tabs are not required. The key factor in the selection of specimen tolerances and gripping methods is the successful introduction of load into the specimen and the prevention of premature failure as a result of a significant discontinuity. Therefore, determine the need to use tabs, and specification of the major tab design parameters, by the end

result: acceptable failure mode and location. If acceptable failure modes occur with reasonable frequency, then there is no reason to change a given gripping method (see 11.10).

8.2.2 *Specific Recommendations:*

8.2.2.1 *Width, Thickness, and Length*—Select the specimen width and thickness to promote failure in the gage section and assure that the specimen contains a sufficient number of fibers in the cross section to be statistically representative of the bulk material. The specimen length should normally be substantially longer than the minimum requirement to minimize bending stresses caused by minor grip eccentricities. Keep the gage section as far from the grips as reasonably possible and provide a significant amount of material under stress and therefore produce a more statistically significant result. The minimum requirements for specimen design shown in Table 1 are by themselves insufficient to create a properly dimensioned and toleranced coupon drawing. Therefore, recommendations on other important dimensions are provided for typical material configurations in Table 2. These geometries have been found by a number of testing laboratories to produce acceptable failure modes on a wide variety of material systems, but use of them does not guarantee success for every existing or future material system.

8.2.2.2 *Gripping/Use of Tabs*—There are many material configurations, such as multidirectional laminates, fabric-based materials, or randomly reinforced sheet-molding compounds, which can be successfully tested without tabs. However, tabs are strongly recommended when testing unidirectional materials (or strongly unidirectionally dominated laminates) to failure in the fiber direction. Tabs may also be required when testing unidirectional materials in the matrix direction to prevent gripping damage.

8.2.2.3 *Tab Geometry*—Recommendations on important dimensions are provided for typical material configurations in Table 2. These dimensions have been found by a number of testing laboratories to produce acceptable failure modes on a wide variety of material systems, but use of them does not guarantee success for every existing or future material system. The selection of a tab configuration that can successfully produce a gage section tensile failure is dependent upon the coupon material, coupon ply orientation, and the type of grips being used. When pressure-operated nonwedge grips are used with care, squared-off 90° tabs have been used successfully. Wedge-operated grips have been used most successfully with tabs having low bevel angles (7 to 10°) and a feathered smooth transition into the coupon. For alignment purposes, it is essential that the tabs be of matched thickness.

8.2.2.4 *Friction Tabs*—Tabs need not always be bonded to the material under test to be effective in introducing the load into the specimen. Friction tabs, essentially nonbonded tabs held in place by the pressure of the grip, and often used with emery cloth or some other light abrasive between the tab and the coupon, have been successfully used in some applications. In specific cases, lightly serrated wedge grips (see Note 2) have been successfully used with only emery cloth as the interface between the grip and the coupon. However, the abrasive used

**TABLE 1 Tensile Specimen Geometry Requirements**

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed <sup>A</sup>
specimen width tolerance	±1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	±4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	±1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

<sup>A</sup> See 8.2.2 or Table 2 for recommendations.

TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations<sup>A</sup>

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [ 7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

<sup>A</sup> Dimensions in this table and the tolerances of Fig. 2 or Fig. 3 are recommendations only and may be varied so long as the requirements of Table 1 are met.

must be able to withstand significant compressive loads. Some types of emery cloth have been found ineffective in this application because of disintegration of the abrasive.<sup>9</sup>

**8.2.2.5 Tab Material**—The most consistently used bonded tab material has been continuous E-glass fiber-reinforced polymer matrix materials (woven or unwoven) in a [0/90]<sub>n</sub>s laminate configuration. The tab material is commonly applied at 45° to the loading direction to provide a soft interface. Other configurations that have reportedly been successfully used have incorporated steel tabs or tabs made of the same material as is being tested.

**8.2.2.6 Bonded Tab Length**—When using bonded tabs, estimate the minimum suggested tab length for bonded tabs by the following simple equation. As this equation does not account for the peaking stresses that are known to exist at the ends of bonded joints. The tab length calculated by this equation should normally be increased by some factor to reduce the chances of joint failure:

$$L_{\min} = F^{tu}h/2F^{su} \quad (4)$$

where:

- $L_{\min}$  = minimum required bonded tab length, mm [in.];
- $F^{tu}$  = ultimate tensile strength of coupon material, MPa [psi];
- $h$  = coupon thickness, mm [in.]; and
- $F^{su}$  = ultimate shear strength of adhesive, coupon material, or tab material (whichever is lowest), MPa [psi].

**8.2.2.7 Bonded Tab Adhesive**—Any high-elongation (tough) adhesive system that meets the environmental requirements may be used when bonding tabs to the material under test. A uniform bondline of minimum thickness is desirable to reduce undesirable stresses in the assembly.

**8.2.3 Detailed Examples**—The minimum requirements for specimen design discussed in 8.2.1 are by themselves insufficient to create a properly dimensioned and toleranced coupon drawing. Dimensionally toleranced specimen drawings for both tabbed and untabbed forms are shown as examples in Fig. 2 (SI) and Fig. 3 (inch-pound). The tolerances on these drawings are fixed, but satisfy the requirements of Table 1 for all of the recommended configurations of Table 2. For a specific configuration, the tolerances on Fig. 2 and Fig. 3 might be able to be relaxed.

### 8.3 Specimen Preparation:

**8.3.1 Panel Fabrication**—Control of fiber alignment is critical. Improper fiber alignment will reduce the measured

properties. Erratic fiber alignment will also increase the coefficient of variation. The specimen preparation method shall be reported.

**8.3.2 Machining Methods**—Specimen preparation is extremely important for this specimen. Mold the specimens individually to avoid edge and cutting effects or cut from them plates. If they are cut from plates, take precautions to avoid notches, undercuts, rough or uneven surfaces, or delaminations caused by inappropriate machining methods. Obtain final dimensions by water-lubricated precision sawing, milling, or grinding. The use of diamond tooling has been found to be extremely effective for many material systems. Edges should be flat and parallel within the specified tolerances.

**8.3.3 Labeling**—Label the coupons so that they will be distinct from each other and traceable back to the raw material and in a manner that will both be unaffected by the test and not influence the test.

## 9. Calibration

9.1 The accuracy of all measuring equipment shall have certified calibrations that are current at the time of use of the equipment.

## 10. Conditioning

**10.1 Standard Conditioning Procedure**—Unless a different environment is specified as part of the experiment, condition the test specimens in accordance with Procedure C of Test Method D 5229/D 5229M and store and test at standard laboratory atmosphere (23 ± 3°C [73 ± 5°F] and 50 ± 10 % relative humidity).

## 11. Procedure

### 11.1 Parameters To Be Specified Before Test:

11.1.1 The tension specimen sampling method, coupon type and geometry, and conditioning travelers (if required).

11.1.2 The tensile properties and data reporting format desired.

NOTE 5—Determine specific material property, accuracy, and data reporting requirements before test for proper selection of instrumentation and data-recording equipment. Estimate operating stress and strain levels to aid in transducer selection, calibration of equipment, and determination of equipment settings.

11.1.3 The environmental conditioning test parameters.

11.1.4 If performed, the sampling method, coupon geometry, and test parameters used to determine density and reinforcement volume.

### 11.2 General Instructions:

11.2.1 Report any deviations from this test method, whether intentional or inadvertent.

<sup>9</sup> E-Z Flex Metalite K224 cloth, Grit 120-J, available from Norton Company, Troy, NY 12181, has been found satisfactory in this application. Other equivalent types of emery cloth should also be suitable.

DRAWING NOTES:

1. INTERPRET DRAWING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5M-1982, SUBJECT TO THE FOLLOWING:
2. ALL DIMENSIONS IN MILLIMETRES WITH DECIMAL TOLERANCES AS FOLLOWS:  
 NO DECIMAL | .X | .XX  
 ± 3 | ± 1 | ± .3
3. ALL ANGLES HAVE TOLERANCE OF ± .5°.
4. PLY ORIENTATION DIRECTION TOLERANCE RELATIVE TO [-A-] WITHIN ± .5°.
5. FINISH ON MACHINED EDGES NOT TO EXCEED 1.6√ (SYMBOLOLOGY IN ACCORDANCE WITH ASA B46.1, WITH ROUGHNESS HEIGHT IN MICROMETRES.)
6. VALUES TO BE PROVIDED FOR THE FOLLOWING, SUBJECT TO ANY RANGES SHOWN ON THE FIELD OF DRAWING: MATERIAL, LAY-UP, PLY ORIENTATION REFERENCE RELATIVE TO [-A-], OVERALL LENGTH, GAGE LENGTH, COUPON THICKNESS, TAB MATERIAL, TAB THICKNESS, TAB LENGTH, TAB BEVEL ANGLE, TAB ADHESIVE.
7. NO ADHESIVE BUILDUP ALLOWED IN THIS AREA.

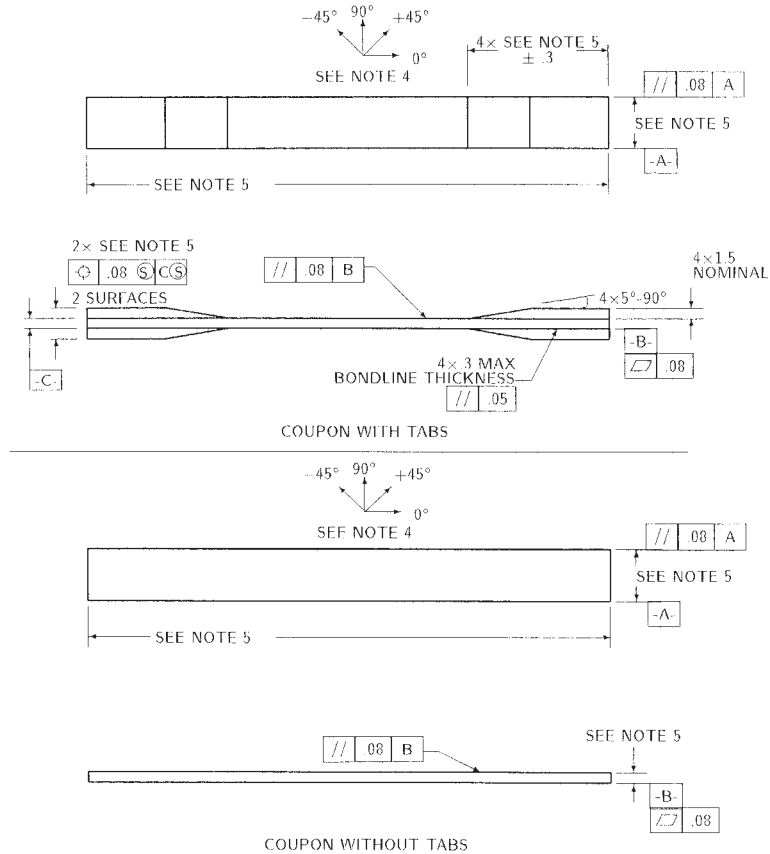


FIG. 2 Tension Test Specimen Drawing (SI)

11.2.2 If specific gravity, density, reinforcement volume, or void volume are to be reported, then obtain these samples from the same panels being tension tested. Specific gravity and density may be evaluated by means of Test Methods D 792. Volume percent of the constituents may be evaluated by one of the matrix digestion procedures of Test Method D 3171, or, for certain reinforcement materials such as glass and ceramics, by the matrix burn-off technique of Test Method D 2584. The void content equations of Test Methods D 2734 are applicable to both Test Method D 2584 and the matrix digestion procedures.

11.2.3 Following final specimen machining and any conditioning, but before the tension testing, determine the specimen area as  $A = w \times h$ , at three places in the gage section, and report the area as the average of these three determinations to the accuracy in 7.1. Record the average area in units of  $\text{mm}^2$  ( $\text{in.}^2$ ).

11.3 *Speed of Testing*—Set the speed of testing to effect a nearly constant strain rate in the gage section. If strain control is not available on the testing machine, this may be approximated by repeated monitoring and adjusting of the rate of load application to maintain a nearly constant strain rate, as mea-

sured by strain transducer response versus time. The strain rate should be selected so as to produce failure within 1 to 10 min. If the ultimate strain of the material cannot be reasonably estimated, initial trials should be conducted using standard speeds until the ultimate strain of the material and the compliance of the system are known, and the strain rate can be adjusted. The suggested standard speeds are:

11.3.1 *Strain-Controlled Tests*—A standard strain rate of  $0.01 \text{ min}^{-1}$ .

11.3.2 *Constant Head-Speed Tests*—A standard head displacement rate of 2 mm/min [0.05 in./min].

NOTE 6—Use of a fixed head speed in testing machine systems with a high compliance may result in a strain rate that is much lower than required. Use of wedge grips can cause extreme compliance in the system, especially when using compliant tab materials. In some such cases, actual strain rates 10 to 50 times lower than estimated by head speeds have been observed.

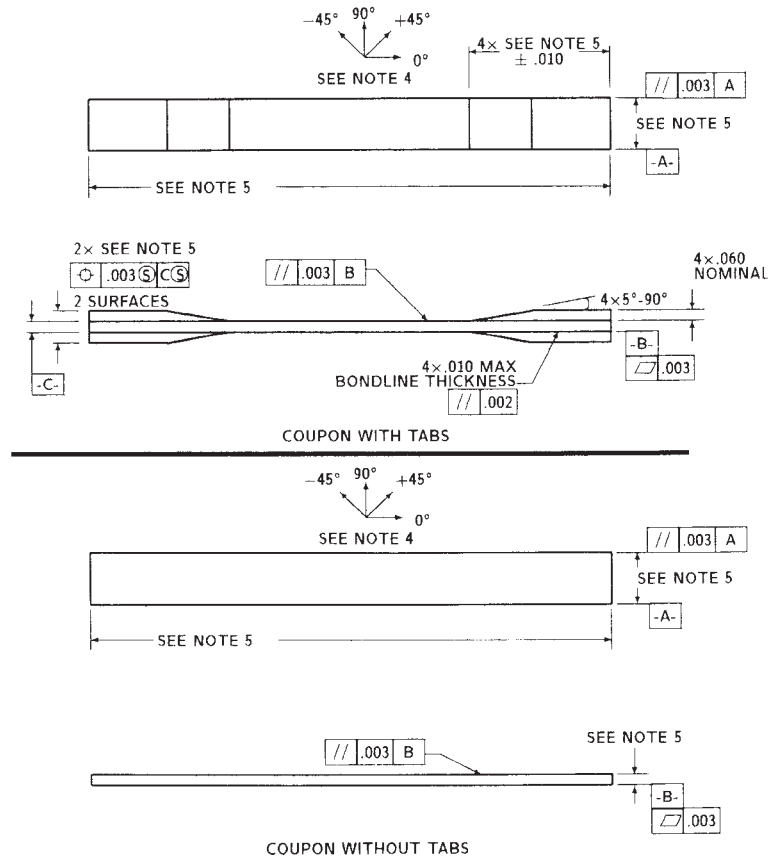
11.4 *Test Environment*—Condition the specimen to the desired moisture profile and, if possible, test under the same conditioning fluid exposure level. However, cases such as



**DRAWING NOTES:**

1. INTERPRET DRAWING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5M-1982, SUBJECT TO THE FOLLOWING:
2. ALL DIMENSIONS IN INCHES WITH DECIMAL TOLERANCES AS FOLLOWS:  

.X	.XX	.XXX
±.1	±.03	±.01
3. ALL ANGLES HAVE TOLERANCE OF ±.5°.
4. PLY ORIENTATION DIRECTION TOLERANCE RELATIVE TO [-A-] WITHIN ±.5°.
5. FINISH ON MACHINED EDGES NOT TO EXCEED 64√ (SYMBOLOLOGY IN ACCORDANCE WITH ASA B46.1, WITH ROUGHNESS HEIGHT IN MICROINCHES.)
5. VALUES TO BE PROVIDED FOR THE FOLLOWING, SUBJECT TO ANY RANGES SHOWN ON THE FIELD OF DRAWING: MATERIAL, LAY-UP, PLY ORIENTATION REFERENCE RELATIVE TO [-A-], OVERALL LENGTH, GAGE LENGTH, COUPON THICKNESS, TAB MATERIAL, TAB THICKNESS, TAB LENGTH, TAB BEVEL ANGLE, TAB ADHESIVE.
6. NO ADHESIVE BUILDUP ALLOWED IN THIS AREA.



**FIG. 3 Tension Test Specimen Drawing (inch-pound)**

elevated temperature testing of a moist specimen place unrealistic requirements on the capabilities of common testing machine environmental chambers. In such cases, the mechanical test environment may need to be modified, for example, by testing at elevated temperature with no fluid exposure control, but with a specified limit on time to failure from withdrawal from the conditioning chamber. Modifications to the test environment shall be recorded.

11.4.1 Store the specimen in the conditioned environment until test time, if the testing area environment is different than the conditioning environment.

11.5 *Specimen Insertion*—Place the specimen in the grips of the testing machine, taking care to align the long axis of the gripped specimen with the test direction. Tighten the grips, recording the pressure used on pressure controllable (hydraulic or pneumatic) grips.

NOTE 7—The ends of the grip jaws on wedge-type grips should be even with each other following insertion to avoid inducing a bending moment that results in premature failure of the specimen at the grip. When using

untabbed specimens, a folded strip of medium grade (80 to 150 grit) emery cloth between the specimen faces and the grip jaws (grit-side toward specimen) provides a nonslip grip on the specimen without jaw serration damage to the surface of the specimen. When using tabbed specimens, insert the coupon so that the grip jaws extend approximately 10 to 15 mm [0.5 in.] past the beginning of the tapered portion of the tab. Coupons having tabs that extend beyond the grips are prone to failure at the tab ends because of excessive interlaminar stresses.

11.6 *Transducer Installation*—If strain response is to be determined attach the strain-indication transducer(s) to the specimen, symmetrically about the mid-span, mid-width location. Attach the strain-recording instrumentation to the transducers on the specimen.

11.6.1 When determining modulus of elasticity, it is recommended that at least one specimen per like sample be evaluated with back-to-back axial transducers to evaluate the percent bending, using Eq 5, at the average axial strain checkpoint value (the mid range of the appropriate chord modulus strain range) shown in Table 3. A single transducer can be used if the

**TABLE 3 Specimen Alignment and Chord Modulus Calculation Strain Ranges**

Tensile Chord Modulus Calculation Longitudinal Strain Range		Longitudinal Strain Checkpoint for Bending
Start Point	End Point	
$\mu\epsilon^A$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$
1000 <sup>B</sup>	3000	2000

<sup>A</sup> 1000  $\mu\epsilon$  = 0.001 absolute strain.

<sup>B</sup> This strain range is to be contained in the lower half of the stress/strain curve. For materials that fail below 6000  $\mu\epsilon$ , a strain range of 25 to 50 % of ultimate is recommended.

percent bending is no more than 3 %. When bending is greater than 3 % averaged strains from back-to-back transducers of like kind are recommended.

$$B_y = \frac{|\epsilon_f - \epsilon_b|}{|\epsilon_f + \epsilon_b|} \quad (5)$$

where:

$\epsilon_f$  = indicated strain from front transducer,  $\mu\epsilon$ ;  
 $\epsilon_b$  = indicated strain from back transducer,  $\mu\epsilon$ ; and  
 $B_y$  = percent bending in specimen.

11.7 *Loading*—Apply the load to the specimen at the specified rate until failure, while recording data.

11.8 *Data Recording*—Record load versus strain (or transducer displacement) continuously or at frequent regular intervals. If a transition region or initial ply failures are noted, record the load, strain, and mode of damage at such points. If the specimen is to be failed, record the maximum load, the failure load, and the strain (or transducer displacement) at, or as near as possible to, the moment of rupture.

NOTE 8—Other valuable data that can be useful in understanding testing anomalies and gripping or specimen slipping problems includes load versus head displacement data and load versus time data.

11.9 *Failure Mode*—Record the mode and location of failure of the specimen. Choose, if possible, a standard description using the three-part failure mode code that is shown in Fig. 4.

11.10 *Grip/Tab Failures*—Reexamine the means of load introduction into the material if a significant fraction of failures in a sample population occur within one specimen width of the tab or grip. Factors considered should include the tab alignment, tab material, tab angle, tab adhesive, grip type, grip pressure, and grip alignment.

## 12. Calculation

12.1 *Tensile Stress/Tensile Strength*—Calculate the ultimate tensile strength using Eq 6 and report the results to three significant figures. If the tensile modulus is to be calculated, determine the tensile stress at each required data point using Eq 7.

$$F^{tu} = P^{max}/A \quad (6)$$

$$\sigma_i = P_i/A \quad (7)$$

where:

$F^{tu}$  = ultimate tensile strength, MPa [psi];  
 $P^{max}$  = maximum load before failure, N [lbf];  
 $\sigma_i$  = tensile stress at  $i$ th data point, MPa [psi];  
 $P_i$  = load at  $i$ th data point, N [lbf]; and  
 $A$  = average cross-sectional area from 11.2.3, mm<sup>2</sup> [in.<sup>2</sup>].

12.2 *Tensile Strain/Ultimate Tensile Strain*—If tensile modulus or ultimate tensile strain is to be calculated, and material response is being determined by an extensometer, determine the tensile strain from the indicated displacement at each required data point using Eq 8 and report the results to three significant figures.

$$\epsilon_i = \delta_i/L_g \quad (8)$$

where:

$\epsilon_i$  = tensile strain at  $i$ th data point,  $\mu\epsilon$ ;  
 $\delta_i$  = extensometer displacement at  $i$ th data point, mm [in.]; and  
 $L_g$  = extensometer gage length, mm [in.].

### 12.3 Tensile Modulus of Elasticity:

NOTE 9—To minimize potential effects of bending it is recommended that the strain data used for modulus of elasticity determination be the average of the indicated strains from each side of the specimen, as discussed in 7.3 and 11.6.

12.3.1 *Tensile Chord Modulus of Elasticity*—Select the appropriate chord modulus strain range from Table 3. Calculate the tensile chord modulus of elasticity from the stress-strain data using Eq 9. If data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use the closest available data point. Report the tensile chord modulus of elasticity to three significant figures. Also report the strain range used in the calculation. A graphical example of chord modulus is shown in Fig. 5.

12.3.1.1 The tabulated strain ranges should only be used for materials that do not exhibit a transition region (a significant change in the slope of the stress-strain curve) within the given strain range. If a transition region occurs within the recommended strain range, then a more suitable strain range shall be used and reported.

$$E^{chord} = \Delta\sigma/\Delta\epsilon \quad (9)$$

where:

$E^{chord}$  = tensile chord modulus of elasticity, GPa [psi];  
 $\Delta\sigma$  = difference in applied tensile stress between the two strain points of Table 3, MPa [psi]; and  
 $\Delta\epsilon$  = difference between the two strain points of Table 3 (nominally 0.002).

12.3.2 *Tensile Modulus of Elasticity (Other Definitions)*—Other definitions of elastic modulus may be evaluated and reported at the user's discretion. If such data is generated and reported, report also the definition used, the strain range used,

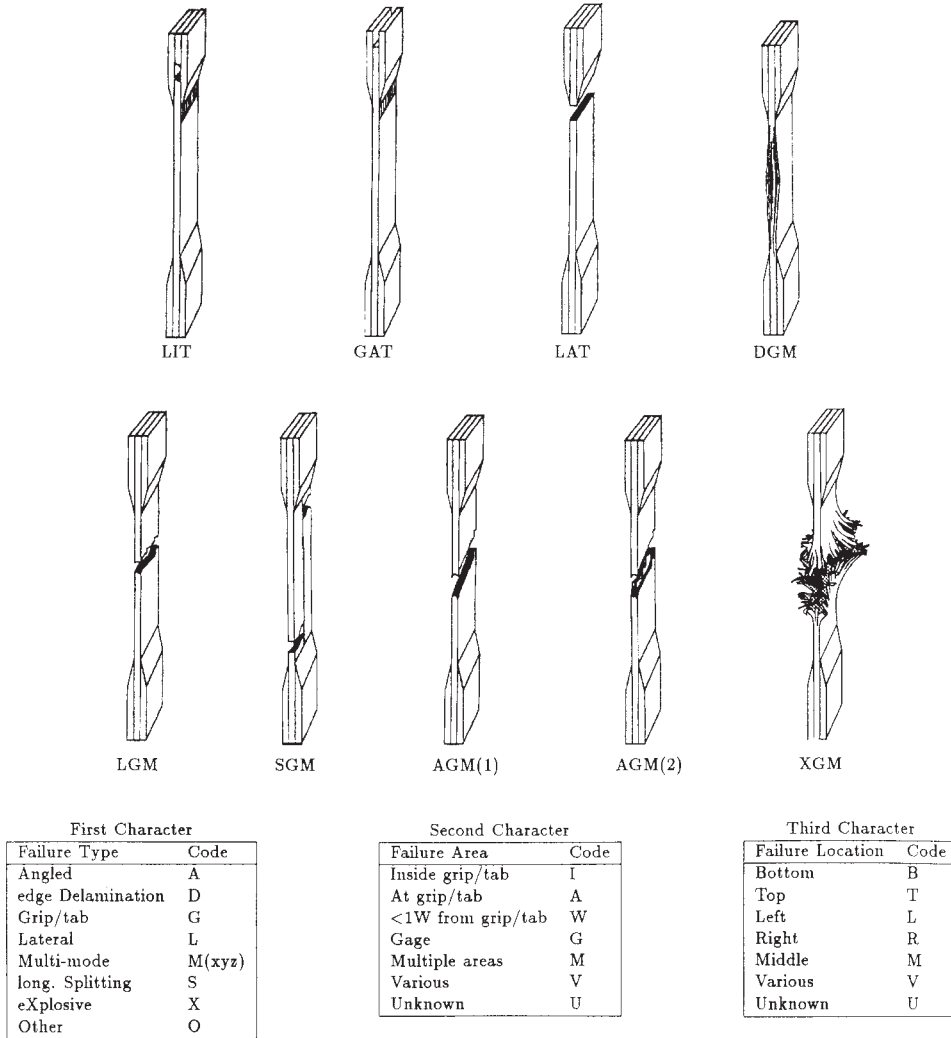


FIG. 4 Tensile Test Failure Codes/Typical Modes

and the results to three significant figures. Test Method E 111 provides additional guidance in the determination of modulus of elasticity.

NOTE 10—An example of another modulus definition is the secondary chord modulus of elasticity for materials that exhibit essentially bilinear stress-strain behavior. An example of secondary chord modulus is shown in Fig. 5.

12.4 Poisson's Ratio:

NOTE 11—If bonded resistance strain gages are being used, the error produced by the transverse sensitivity effect on the transverse gage will generally be much larger for composites than for metals. An accurate measurement of Poisson's ratio requires correction for this effect. The strain gage manufacturer should be contacted for information on the use of correction factors for transverse sensitivity.

12.4.1 Poisson's Ratio By Chord Method—Select the appropriate chord modulus longitudinal strain range from Table 3. Determine (by plotting or otherwise) the transverse strain (measured perpendicular to the applied load),  $\epsilon_t$ , at each of the two longitudinal strains (measured parallel to the applied load),  $\epsilon_l$ , strain range end points. If data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use

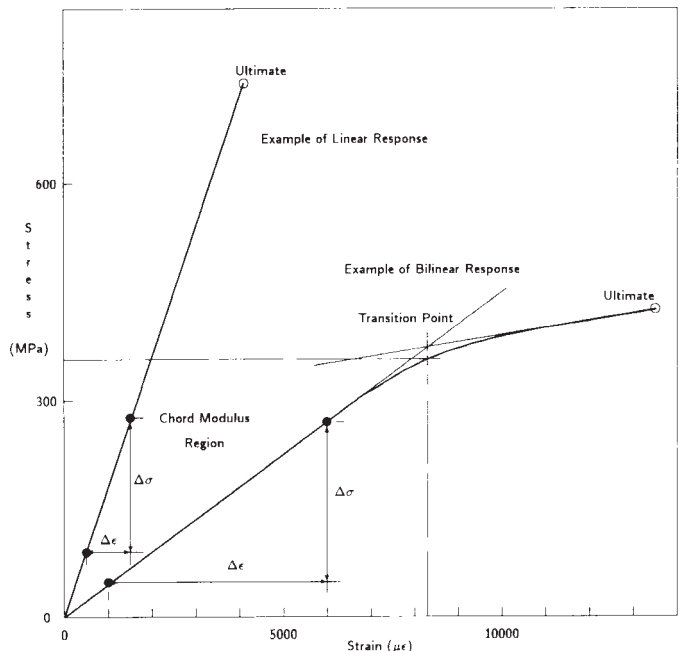


FIG. 5 Typical Tensile Stress-Strain Curves

the closest available data point. Calculate Poisson's ratio by Eq 10 and report to three significant figures. Also report the strain range used.

$$\nu = -\Delta\epsilon_t/\Delta\epsilon_l \quad (10)$$

where:

- $\nu$  = Poisson's ratio;
- $\Delta\epsilon_t$  = difference in lateral strain between the two longitudinal strain points of Table 3,  $\mu\epsilon$ ; and
- $\Delta\epsilon_l$  = difference between the two longitudinal strain points of Table 3 (nominally either 0.001, 0.002, or 0.005).

12.4.2 *Tensile Poisson's Ratio (Other Definitions)*—Other definitions of Poisson's ratio may be evaluated and reported at the user's direction. If such data is generated and reported, report also the definition used, the strain range used, and the results to three significant figures. Test Method E 132 provides additional guidance in the determination of Poisson's ratio.

12.5 *Transition Strain*—Where applicable, determine the transition strain from either the bilinear longitudinal stress versus longitudinal strain curve or the bilinear transverse strain versus longitudinal strain curve. Create a best linear fit or chord line for each of the two linear regions and extend the lines until they intersect. Determine to three significant digits the longitudinal strain that corresponds to the intersection point and record this value as the transition strain. Report also the method of linear fit (if used) and the strain ranges over which the linear fit or chord lines were determined. A graphical example of transition strain is shown in Fig. 5.

12.6 *Statistics*—For each series of tests calculate the average value, standard deviation and coefficient of variation (in percent) for each property determined:

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i)/n \quad (11)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2)/(n-1)} \quad (12)$$

$$CV = 100 \times s_{n-1}/\bar{x} \quad (13)$$

where:

- $\bar{x}$  = sample mean (average);
- $s_{n-1}$  = sample standard deviation;
- CV = sample coefficient of variation, in percent;
- $n$  = number of specimens; and
- $x_i$  = measured or derived property.

### 13. Report

13.1 Report the following information, or references pointing to other documentation containing this information, to the maximum extent applicable (reporting of items beyond the control of a given testing laboratory, such as might occur with material details or panel fabrication parameters, shall be the responsibility of the requestor):

- 13.1.1 The revision level or date of issue of this test method.
- 13.1.2 The date(s) and location(s) of the test.
- 13.1.3 The name(s) of the test operator(s).

13.1.4 Any variations to this test method, anomalies noticed during testing, or equipment problems occurring during testing.

13.1.5 Identification of the material tested including: material specification, material type, material designation, manufacturer, manufacturer's lot or batch number, source (if not from manufacturer), date of certification, expiration of certification, filament diameter, tow or yarn filament count and twist, sizing, form or weave, fiber areal weight, matrix type, prepreg matrix content, and prepreg volatiles content.

13.1.6 Description of the fabrication steps used to prepare the laminate including: fabrication start date, fabrication end date, process specification, cure cycle, consolidation method, and a description of the equipment used.

13.1.7 Ply orientation stacking sequence of the laminate.

13.1.8 If requested, report density, volume percent reinforcement, and void content test methods, specimen sampling method and geometries, test parameters, and test results.

13.1.9 Average ply thickness of the material.

13.1.10 Results of any nondestructive evaluation tests.

13.1.11 Method of preparing the test specimen, including specimen labeling scheme and method, specimen geometry, sampling method, coupon cutting method, identification of tab geometry, tab material, and tab adhesive used.

13.1.12 Calibration dates and methods for all measurement and test equipment.

13.1.13 Type of test machine, grips, jaws, grip pressure, alignment results, and data acquisition sampling rate and equipment type.

13.1.14 Results of system alignment evaluations, if any such were done.

13.1.15 Dimensions of each test specimen.

13.1.16 Conditioning parameters and results, use of travelers and traveler geometry, and the procedure used if other than that specified in the test method.

13.1.17 Relative humidity and temperature of the testing laboratory.

13.1.18 Environment of the test machine environmental chamber (if used) and soak time at environment.

13.1.19 Number of specimens tested.

13.1.20 Speed of testing.

13.1.21 Transducer placement on the specimen and transducer type for each transducer used.

13.1.22 If strain gages were used, the type, resistance, size, gage factor, temperature compensation method, transverse sensitivity, lead-wire resistance, and any correction factors used.

13.1.23 Stress-strain curves and tabulated data of stress versus strain for each specimen.

13.1.24 Percent bending results for each specimen so evaluated.

13.1.25 Individual strengths and average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population. Note if the failure load was less than the maximum load before failure.

13.1.26 Individual strains at failure and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.



13.1.27 Strain range used for chord modulus and Poisson's ratio determination.

13.1.28 If another definition of modulus of elasticity is used in addition to chord modulus, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

13.1.29 Individual values of modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.30 If another definition of Poisson's ratio is used in addition to the chordwise definition, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

13.1.31 Individual values of Poisson's ratio, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.32 If transition strain is determined, the method of linear fit (if used) and the strain ranges over which the linear fit or chord lines were determined.

13.1.33 Individual values of transition strain (if applicable), and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.34 Failure mode and location of failure for each specimen.

## 14. Precision and Bias

### 14.1 Precision:

14.1.1 The precision and bias of tension test strength and modulus measurements depend on strict adherence to the Test Method D 3039/D 3039M and are influenced by mechanical and material factors, specimen preparation, and measurement errors.

14.1.2 Mechanical factors that can affect the test results include: the physical characteristics of the testing machine (stiffness, damping, and mass), accuracy of loading and displacement/strain measurement, speed of loading, alignment of test specimen with applied load, parallelism of the grips, grip pressure, and type of load control (displacement, strain, or load).

14.1.3 Material factors that can affect test results include: material quality and representativeness, sampling scheme, and specimen preparation (dimensional accuracy, tab material, tab taper, tab adhesive, and so forth).

14.1.4 The mean tensile strength for a strain rate sensitive, glass/epoxy tape composite testing in the fiber direction was found to increase by approximately two standard deviations with decreasing time to failure tested at the limits of the recommended time to failure prescribed in Test Method D 3039/D 3039M. This result suggest that caution must be used when comparing test data obtained for strain rate sensitive composite materials tested in accordance with this standard.

14.1.5 Measurement errors arise from the use of specialized measuring instruments such as load cells, extensometers and strain gages, micrometers, data acquisition devices, and so forth.

14.1.6 Data obtained from specimens that fracture outside the gage are should be used with caution as this data may not be representative of the material. Failure in the grip region indicates the stress concentration at the tab is greater than the

natural strength variation of the material in the gage section. A tapered tab, bonded with a ductile low-modulus adhesive has a relatively low-stress concentration and should result in the lowest frequency of grip failures. Low-strength bias increases with the frequency of grip failures by an amount proportional to the stress concentration at the tab.

14.1.7 An interlaboratory test program was conducted where an average of five specimens each, of six different materials and lay-up configurations, were tested by nine different laboratories.<sup>10</sup> Table 4 presents the precision statistics generated from this study as defined in Practice E 691 for tensile strength, modulus, and failure strain. All data except that for Material B (90° lay-up) was normalized with respect to an average thickness. The materials listed in Table 15 are defined as:

A	IM-6/3501-6 uni-tape (0)n
B	IM-6/3501-6 uni-tape (90)n
C	IM-6/3501-6 uni-tape (90/0)n
F	Glass/epoxy fabric (7781 glass/Ciba R 7376 Epoxy)- warp aligned
G	Carbon/epoxy fabric (66108 carbon/Ciba R 6376

**TABLE 4 Precision Statistics**

Material	$\bar{x}$	$s \bar{x}$	$S_r$	$S_R$	$S_r/\bar{x}, \%$	$S_R/\bar{x}, \%$
Strength, ksi						
A	342.69	8.49	10.68	12.78	3.12	3.73
B	8.52	0.52	0.85	0.92	9.94	10.84
C	156.37	3.84	10.85	10.85	6.94	6.94
F	66.18	3.20	1.52	3.48	2.30	5.26
G	121.52	1.59	3.92	3.92	3.23	3.23
Modulus, Msi						
A	23.57	0.65	0.63	0.86	2.69	3.66
B	1.30	0.05	0.04	0.06	3.12	4.57
C	12.38	0.29	0.37	0.44	2.98	3.54
F	3.95	0.08	0.04	0.09	1.01	2.28
G	9.47	0.16	0.12	0.20	1.29	2.06
Failure Strain, %						
A	1.36	0.06	0.07	0.08	4.95	6.15
B	0.66	0.04	0.08	0.09	12.47	13.02
C	1.22	0.03	0.06	0.06	5.25	5.27
F	2.04	0.15	0.07	0.16	3.19	8.03
G	1.27	0.03	0.05	0.05	3.83	4.13

14.1.8 The averages of the coefficients of variation are in Table 5. The values of  $S_r/X$  and  $S_R/X$  represent the repeatability and the reproducibility coefficients of variation, respectively. These averages permit a relative comparison of the repeatability (within laboratory precision) and reproducibility (between laboratory precision) of the tension test parameters. Overall, this indicates that the failure strain measurements exhibit the least repeatability and reproducibility of all the parameters measured while modulus was found to provide the highest repeatability and reproducibility of the parameters measured.

<sup>10</sup> International Harmonization of Composite Materials—Phase I: Harmonization of ASTM D 3039/D 3039M and ISO 527-5, Final Report, ASTM Institute for Standards Research, April 1997.

**TABLE 5 Averages of the Coefficients of Variation**

Parameter	Average of $S/X$ , %	Average of $S_R/X$ , %
Strength	5.11	6.00
Modulus	2.22	3.22
Failure strain	5.94	7.32

14.1.9 The consistency of agreement for repeated tests of the same material is dependent on lay-up configuration, mate-

rial and specimen preparation techniques, test conditions, and measurements of the tension test parameters.

14.2 *Bias*—Bias cannot be determined for this test method as no acceptable reference standard exists.

## 15. Keywords

15.1 composite materials; modulus of elasticity; Poisson's ratio; tensile properties; tensile strength

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*



# Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 695; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

## 1. Scope \*

1.1 This test method covers the determination of the mechanical properties of unreinforced and reinforced rigid plastics, including high-modulus composites, when loaded in compression at relatively low uniform rates of straining or loading. Test specimens of standard shape are employed.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are for information only.

NOTE 1—For compressive properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous, discontinuous, or cross-ply reinforcements, tests may be made in accordance with Test Method D 3410.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* A specific precautionary statement is given in Note 11.

NOTE 2—This test method is technically equivalent to ISO 604.

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing<sup>2</sup>
- D 638 Test Method for Tensile Properties of Plastics<sup>2</sup>
- D 883 Terminology Relating to Plastics<sup>2</sup>
- D 3410 Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading<sup>3</sup>
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials<sup>4</sup>
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials<sup>4</sup>
- D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens<sup>5</sup>

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved August 10, 2002. Published October 2002. Originally published as D 695 – 42 T. Last previous edition D 695 – 02.

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>6</sup>
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers<sup>6</sup>
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method<sup>7</sup>

## 3. Terminology

3.1 General— The definitions of plastics used in this test method are in accordance with Terminology D 883 unless otherwise indicated.

### 3.2 Definitions:

3.2.1 *compressive deformation*—the decrease in length produced in the gage length of the test specimen by a compressive load. It is expressed in units of length.

3.2.2 *compressive strain*—the ratio of compressive deformation to the gage length of the test specimen, that is, the change in length per unit of original length along the longitudinal axis. It is expressed as a dimensionless ratio.

3.2.3 *compressive strength*—the maximum compressive stress (nominal) carried by a test specimen during a compression test. It may or may not be the compressive stress (nominal) carried by the specimen at the moment of rupture.

3.2.4 *compressive strength at failure (nominal)*—the compressive stress (nominal) sustained at the moment of failure of the test specimen if shattering occurs.

3.2.5 *compressive stress (nominal)*—the compressive load per unit area of minimum original cross section within the gage boundaries, carried by the test specimen at any given moment. It is expressed in force per unit area.

3.2.5.1 *Discussion*—The expression of compressive properties in terms of the minimum original cross section is almost universally used. Under some circumstances the compressive properties have been expressed per unit of prevailing cross section. These properties are called “true” compressive properties.

3.2.6 *compressive stress-strain diagram*—a diagram in which values of compressive stress are plotted as ordinates against corresponding values of compressive strain as abscissas.

<sup>6</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

<sup>7</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

\*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

3.2.7 *compressive yield point*—the first point on the stress-strain diagram at which an increase in strain occurs without an increase in stress.

3.2.8 *compressive yield strength*—normally the stress at the yield point (see also section 3.2.11).

3.2.9 *crushing load*—the maximum compressive force applied to the specimen, under the conditions of testing, that produces a designated degree of failure.

3.2.10 *modulus of elasticity*—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain below the proportional limit of a material. It is expressed in force per unit area based on the average initial cross-sectional area.

3.2.11 *offset compressive yield strength*—the stress at which the stress-strain curve departs from linearity by a specified percent of deformation (offset).

3.2.12 *percent compressive strain*—the compressive deformation of a test specimen expressed as a percent of the original gage length.

3.2.13 *proportional limit*—the greatest stress that a material is capable of sustaining without any deviation from proportionality of stress to strain (Hooke's law). It is expressed in force per unit area.

3.2.14 *slenderness ratio*—the ratio of the length of a column of uniform cross section to its least radius of gyration. For specimens of uniform rectangular cross section, the radius of gyration is 0.289 times the smaller cross-sectional dimension. For specimens of uniform circular cross section, the radius of gyration is 0.250 times the diameter.

#### 4. Significance and Use

4.1 Compression tests provide information about the compressive properties of plastics when employed under conditions approximating those under which the tests are made.

4.2 Compressive properties include modulus of elasticity, yield stress, deformation beyond yield point, and compressive strength (unless the material merely flattens but does not fracture). Materials possessing a low order of ductility may not exhibit a yield point. In the case of a material that fails in compression by a shattering fracture, the compressive strength has a very definite value. In the case of a material that does not fail in compression by a shattering fracture, the compressive strength is an arbitrary one depending upon the degree of distortion that is regarded as indicating complete failure of the material. Many plastic materials will continue to deform in compression until a flat disk is produced, the compressive stress (nominal) rising steadily in the process, without any well-defined fracture occurring. Compressive strength can have no real meaning in such cases.

4.3 Compression tests provide a standard method of obtaining data for research and development, quality control, acceptance or rejection under specifications, and special purposes. The tests cannot be considered significant for engineering design in applications differing widely from the load-time scale of the standard test. Such applications require additional tests such as impact, creep, and fatigue.

4.4 Before proceeding with this test method, reference should be made to the ASTM specification for the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, and testing parameters covered in the materials

specification shall take precedence over those mentioned in this test method. If there is no material specification, then the default conditions apply. Table 1 in Classification D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

#### 5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—Any suitable testing machine capable of control of constant-rate-of-crosshead movement and comprising essentially the following:

5.1.1 *Drive Mechanism*—A drive mechanism for imparting to the movable cross-head member, a uniform, controlled velocity with respect to the base (fixed member), with this velocity to be regulated as specified in Section 9.

5.1.2 *Load Indicator*—A load-indicating mechanism capable of showing the total compressive load carried by the test specimen. The mechanism shall be essentially free from inertia-lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy of  $\pm 1\%$  of the maximum indicated value of the test (load). The accuracy of the testing machine shall be verified at least once a year in accordance with Practices E 4.

5.2 *Compressometer*—A suitable instrument for determining the distance between two fixed points on the test specimen at any time during the test. It is desirable that this instrument automatically record this distance (or any change in it) as a function of the load on the test specimen. The instrument shall be essentially free of inertia-lag at the specified rate of loading and shall conform to the requirements for a Class B-2 extensometer as defined in Practice E 83.

NOTE 3—The requirements for extensometers cited herein apply to compressometers as well.

5.3 *Compression Tool*—A compression tool for applying the load to the test specimen. This tool shall be so constructed that loading is axial within 1:1000 and applied through surfaces that are flat within 0.025 mm (0.001 in.) and parallel to each other in a plane normal to the vertical loading axis. Examples of suitable compression tools are shown in Fig. 1 and Fig. 2.

5.4 *Supporting Jig*—A supporting jig for thin specimens is shown in Fig. 3 and Fig. 4.

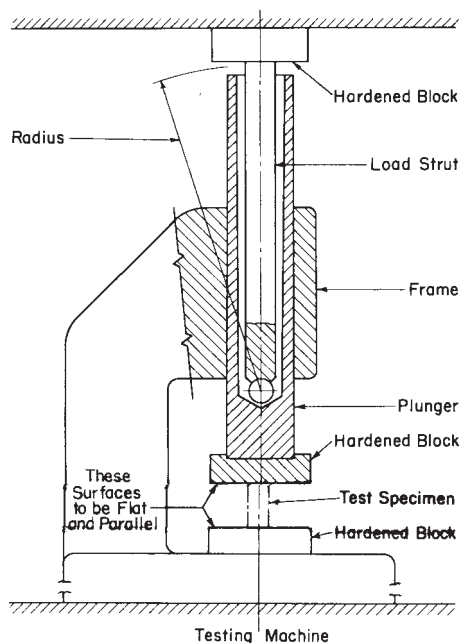
5.5 *Micrometers*—Suitable micrometers, reading to 0.01 mm or 0.001 in. for measuring the width, thickness, and length of the specimens.

#### 6. Test Specimens

6.1 Unless otherwise specified in the materials specifications, the specimens described in 6.2 and 6.7 shall be used. These specimens may be prepared by machining operations from materials in sheet, rod, tube, or similar form, or they may be prepared by compression or injection molding of the material to be tested. All machining operations shall be done carefully so that smooth surfaces result. Great care shall be taken in machining the ends so that smooth, flat parallel surfaces and sharp, clean edges, to within 0.025 mm (0.001 in.) perpendicular to the long axis of the specimen, result.

6.2 The standard test specimen, except as indicated in 6.3-6.7, shall be in the form of a right cylinder or prism whose length is twice its principal width or diameter. Preferred specimen sizes are 12.7 by 12.7 by 25.4 mm (0.50 by 0.50 by





NOTE 1—Devices similar to the one illustrated have been successfully used in a number of different laboratories. Details of the device developed at the National Institute for Standards and Technology are given in the paper by Aitchinson, C. S., and Miller, J. A., "A Subpress for Compressive Tests," National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note No. 912, 1943.

FIG. 1 Subpress for Compression Tests

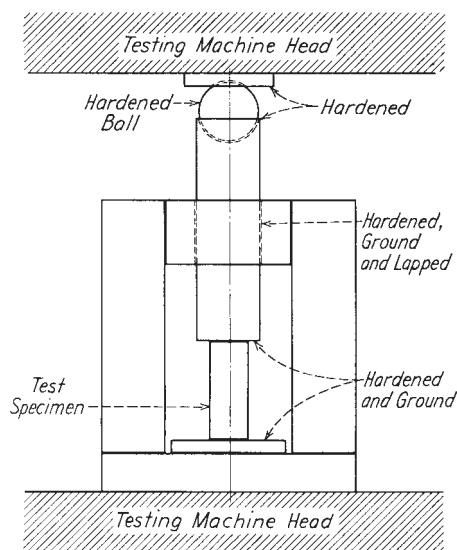


FIG. 2 Compression Tool

1 in.) (prism), or 12.7 mm in diameter by 25.4 mm (cylinder). Where elastic modulus and offset yield-stress data are desired, the test specimen shall be of such dimensions that the slenderness ratio is in the range from 11 to 16:1. In this case, preferred specimen sizes are 12.7 by 12.7 by 50.8 mm (0.50 by 0.50 by 2 in.) (prism), or 12.7 mm in diameter by 50.8 mm (cylinder).

6.3 For rod material, the test specimen shall have a diameter equal to the diameter of the rod and a sufficient length to allow a specimen slenderness ratio in the range from 11 to 16:1.

6.4 When testing tubes, the test specimen shall have a

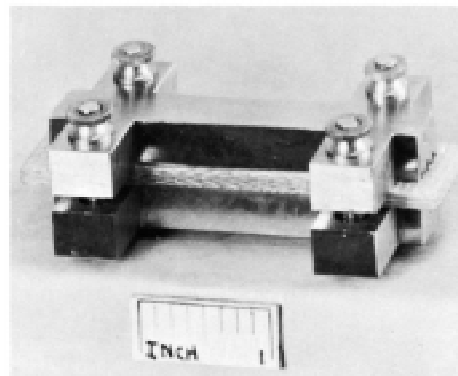


FIG. 3 Support Jig for Thin Specimen

diameter equal to the diameter of the tube and a length of 25.4 mm (1 in.) (Note 4). For crushing-load determinations (at right angles to the longitudinal axis), the specimen size shall be the same, with the diameter becoming the height.

NOTE 4—This specimen can be used for tubes with a wall thickness of 1 mm (0.039 in.) or over, to inside diameters of 6.4 mm (0.25 in.) or over, and to outside diameters of 50.8 mm (2.0 in.) or less.

6.5 Where it is desired to test conventional high-pressure laminates in the form of sheets, the thickness of which is less than 25.4 mm (1 in.), a pile-up of sheets 25.4 mm square, with a sufficient number of layers to produce a height of at least 25.4 mm, may be used.

6.6 When testing material that may be suspected of anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared having their long axis respectively parallel with and normal to the suspected direction of anisotropy.

6.7 *Reinforced Plastics, Including High-Strength Composites and High-Strength Composites and Highly Orthotropic Laminates*—The following specimens shall be used for reinforced materials, or for other materials when necessary to comply with the slenderness ratio requirements or to permit attachment of a deformation-measuring device.

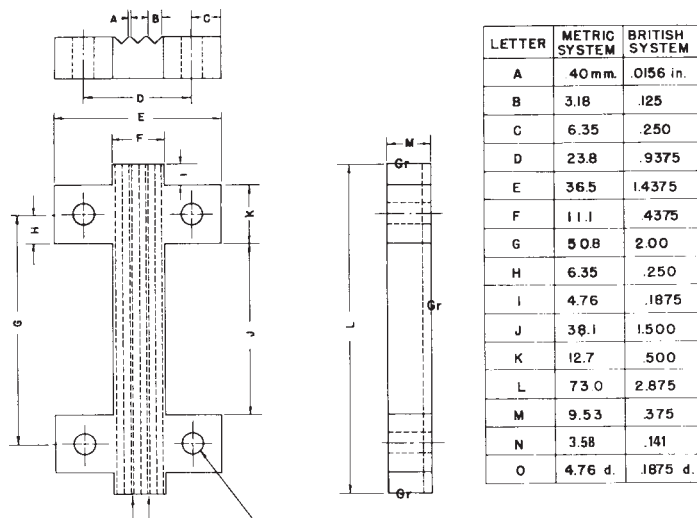
6.7.1 For materials 3.2 mm ( $\frac{1}{8}$  in.) and over in thickness, a specimen shall consist of a prism having a cross section of 12.7 mm ( $\frac{1}{2}$  in.) by the thickness of the material and a length such that the slenderness ratio is in the range from 11 to 16:1 (Note 5).

6.7.2 For materials under 3.2 mm ( $\frac{1}{8}$  in.) thick, or where elastic modulus testing is required and the slenderness ratio does not provide for enough length for attachment of a compressometer or similar device, a specimen conforming to that shown in Fig. 5 shall be used. The supporting jig shown in Fig. 3 and Fig. 4 shall be used to support the specimen during testing (Note 6).

NOTE 5—If failure for materials in the thickness range of 3.2 mm ( $\frac{1}{8}$  in.) is by delamination rather than by the desirable shear plane fracture, the material may be tested in accordance with 6.7.2.

NOTE 6—Round-robin tests have established that relatively satisfactory measurements of modulus of elasticity may be obtained by applying a compressometer to the edges of the jig-supported specimen.

6.8 When testing syntactic foam, the standard test specimen shall be in the form of a right cylinder 25.4 mm (1 in.) in diameter by 50.8 mm (2 in.) in length.



NOTE 1—Cold rolled steel.  
 NOTE 2—Furnished four steel machine screws and nuts, round head, slotted, length 31.75 mm (1¼ in.).  
 NOTE 3—Grind surfaces denoted “Gr.”

FIG. 4 Support Jig, Details

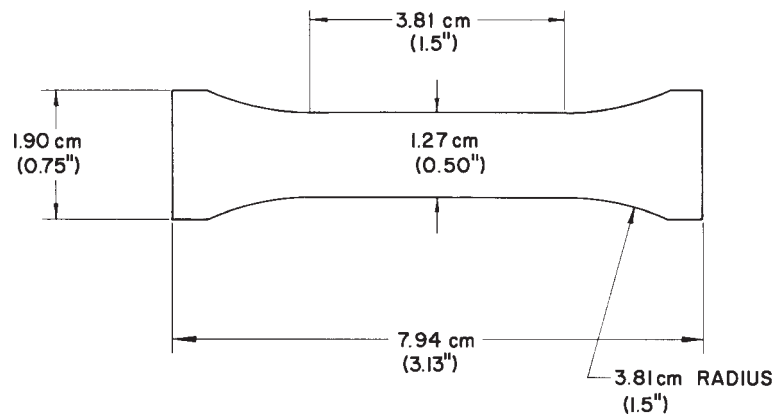


FIG. 5 Compression Test Specimen for Materials Less than 3.2 mm Thick

**7. Conditioning**

7.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ) and  $50 \pm 5\%$  relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618 unless otherwise specified by contract or relevant ASTM material specification. Reference pre-test conditioning, to settle disagreements, shall apply tolerances of  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $1.8^\circ\text{F}$ ) and  $\pm 2\%$  relative humidity.

7.1.1 Note that for some hygroscopic materials, such as nylons, the material specifications (for example, Classification System D 4066) call for testing “dry as-molded specimens.” Such requirements take precedence over the above routine preconditioning to 50 % RH and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

7.2 *Test Conditions*—Conduct the tests at  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  ( $73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$ ) and  $50 \pm 5\%$  relative humidity unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference testing conditions, to settle disagreements, shall apply tolerances of  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $1.8^\circ\text{F}$ ) and  $\pm 2\%$  relative humidity.

**8. Number of Test Specimens**

8.1 **At least five specimens** shall be tested for each sample in the case of isotropic materials.

8.2 Ten specimens, five normal to and five parallel with the principal axis of anisotropy, shall be tested for each sample in the case of anisotropic materials.

8.3 Specimens that break at some obvious flaw shall be discarded and retests made, unless such flaws constitute a variable, the effect of which it is desired to study.

**9. Speed of Testing**

9.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. Rate of motion of the driven grip or fixture when the machine is running idle may be used if it can be shown that the resulting speed of testing is within the limits of variation allowed.

9.2 **The standard speed of testing shall be  $1.3 \pm 0.3$  mm ( $0.050 \pm 0.010$  in.)/min**, except as noted in 10.5.4.

**10. Procedure**

10.1 Measure the width and thickness of the specimen to the

nearest 0.01 mm (0.001 in.) at several points along its length. Calculate and record the minimum value of the cross-sectional area. Measure the length of the specimen and record the value.

10.2 Place the test specimen between the surfaces of the compression tool, taking care to align the center line of its long axis with the center line of the plunger and to ensure that the ends of the specimen are parallel with the surface of the compression tool. Adjust the crosshead of the testing machine until it just contacts the top of the compression tool plunger.

NOTE 7—The compression tool may not be necessary for testing of lower modulus (for example, 700 MPa to 3500 MPa (100 000 psi to 500 000 psi)) material if the loading surfaces are maintained smooth, flat, and parallel to the extent that buckling is not incurred.

10.3 Place thin specimens in the jig (Fig. 3 and Fig. 4) so that they are flush with the base and centered (Note 8). The nuts or screws on the jig shall be finger tight (Note 9). Place the assembly in the compression tool as described in 5.3.

NOTE 8—A round-robin test, designed to assess the influence of specimen positioning in the supporting jig (that is, flush versus centered mounting), showed no significant effect on compressive strength due to this variable. However, flush mounting of the specimen with the base of the jig is specified for convenience and ease of mounting.<sup>8</sup>

NOTE 9—A round-robin test on the effect of lateral pressure at the supporting jig has established that reproducible data can be obtained with the tightness of the jig controlled as indicated.

10.4 If only compressive strength or compressive yield strength, or both, are desired, proceed as follows:

10.4.1 Set the speed control at 1.3 mm/min (0.050 in./min) and start the machine.

10.4.2 Record the maximum load carried by the specimen during the test (usually this will be the load at the moment of rupture).

10.5 If stress-strain data are desired, proceed as follows:

10.5.1 Attach compressometer.

10.5.2 Set the speed control at 1.3 mm/min (0.050 in./min) and start the machine.

10.5.3 Record loads and corresponding compressive strain at appropriate intervals of strain or, if the test machine is equipped with an automatic recording device, record the complete load-deformation curve.

10.5.4 After the yield point has been reached, it may be desirable to increase the speed from 5 to 6 mm/min (0.20 to 0.25 in./min) and allow the machine to run at this speed until the specimen breaks. This may be done only with relatively ductile materials and on a machine with a weighing system with response rapid enough to produce accurate results.

## 11. Calculation

11.1 *Compressive Strength*—Calculate the compressive strength by dividing the maximum compressive load carried by the specimen during the test by the original minimum cross-sectional area of the specimen. Express the result in megapascals or pounds-force per square inch and report to three significant figures.

11.2 *Compressive Yield Strength*—Calculate the compressive yield strength by dividing the load carried by the specimen

at the yield point by the original minimum cross-sectional area of the specimen. Express the result in megapascals or pounds-force per square inch and report to three significant figures.

11.3 *Offset Yield Strength*—Calculate the offset yield strength by the method referred to in 3.2.11.

11.4 *Modulus of Elasticity*—Calculate the modulus of elasticity by drawing a tangent to the initial linear portion of the load deformation curve, selecting any point on this straight line portion, and dividing the compressive stress represented by this point by the corresponding strain, measure from the point where the extended tangent line intersects the strain-axis. Express the result in gigapascals or pounds-force per square inch and report to three significant figures (see Annex A1).

11.5 For each series of tests, calculate to three significant figures the arithmetic mean of all values obtained and report as the “average value” for the particular property in question.

11.6 Calculate the standard deviation (estimated) as follows and report to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2)/(n - 1)} \quad (1)$$

where:

$s$  = estimated standard deviation,

$X$  = value of single observation,

$n$  = number of observations, and

$\bar{X}$  = arithmetic mean of the set of observations.

NOTE 10—The method for determining the offset compressive yield strength is similar to that described in the Annex of Test Method D 638.

## 12. Report

12.1 Report the following information:

12.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer’s code number, form, principal dimensions, previous history, etc.,

12.1.2 Method of preparing test specimens,

12.1.3 Type of test specimen and dimensions,

12.1.4 Conditioning procedure used,

12.1.5 Atmospheric conditions in test room,

12.1.6 Number of specimens tested,

12.1.7 Speed of testing,

12.1.8 Compressive strength, average value, and standard deviation,

12.1.9 Compressive yield strength and offset yield strength average value, and standard deviation, when of interest,

12.1.10 Modulus of elasticity in compression (if required), average value, standard deviation,

12.1.11 Date of test, and

12.1.12 Date of test method.

## 13. Precision and Bias<sup>9</sup>

13.1 Table 1 and Table 2 are based on a round-robin test conducted in 1987 in accordance with Practice E 691, involving three materials tested by six laboratories for Test Method D 695M. Since the test parameters overlap within tolerances and the test values are normalized, the same data are used for both test methods. For each material, all of the samples were

<sup>8</sup> Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1061.

<sup>9</sup> Supporting data are available from ASTM Headquarters, Request RR: D20-1150.

**TABLE 1 Precision, Compressive Strength**  
*(Values in Units of Megapascals)*

Material	Average	$S_r^A$	$S_R^B$	$r^C$	$R^D$
Acetal	100	1.1	2.1	3.1	5.9
Polystyrene	106	1.4	3.5	3.9	9.8
Linen-filled phenolic	158	3.7	7.5	10.4	21.0

<sup>A</sup>  $S_r$  is the within-laboratory standard deviation for the indicated material. It is obtained by pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:

$$S_r = [[(S_1)^2 + (S_2)^2 + \dots + (S_n)^2]/n]^{1/2}$$

<sup>B</sup>  $S_R$  is the between-laboratories reproducibility, expressed as a standard deviation, for the indicated material.

<sup>C</sup>  $r$  is the within-laboratory repeatability limit,  $r = 2.8 \times S_r$ .

<sup>D</sup>  $R$  is the between-laboratory reproducibility limit,  $R = 2.8 \times S_R$ .

**TABLE 2 Precision, Compressive Modulus**  
*(Values in Units of Megapascals)*

Material	Average	$S_r^A$	$S_R^B$	$r^C$	$R^D$
Acetal	3.28	0.14	0.25	0.39	0.70
Polystyrene	3.88	0.07	0.74	0.20	2.07
Linen-filled phenolic	6.82	0.23	0.90	0.64	2.52

<sup>A</sup>  $S_r$  is the within-laboratory standard deviation for the indicated material. It is obtained by pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories:

$$S_r = [[(S_1)^2 + (S_2)^2 + \dots + (S_n)^2]/n]^{1/2}$$

<sup>B</sup>  $S_R$  is the between-laboratories reproducibility, expressed as a standard deviation, for the indicated material.

<sup>C</sup>  $r$  is the within-laboratory repeatability limit,  $r = 2.8 \times S_r$ .

<sup>D</sup>  $R$  is the between-laboratory reproducibility limit,  $R = 2.8 \times S_R$ .

prepared at one source. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

NOTE 11—**Caution:** The following explanations of  $r$  and  $R$  (13.2-13.2.3) are only intended to present a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Table 1 and Table

2 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as these data apply only to the materials tested in the round robin and are unlikely to be rigorously representative of other lots, formulations, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials or between specific laboratories. The principles of 13.2-13.2.3 would then be valid for such data.

13.2 *Concept of  $r$  and  $R$  in Table 1 and Table 2*—If  $S(r)$  and  $S(R)$  have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing of five specimens for each test result, then:

13.2.1 *Repeatability*—Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more than the “ $r$ ” for that the material. “ $r$ ” is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

13.2.2 *Reproducibility,  $R$* —Two test results obtained by different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the “ $R$ ” value for that material. “ $R$ ” is the interval representing the critical difference between the two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

13.2.3 Any judgement in accordance with 13.2.1 and 13.2.2 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

13.3 There are no recognized standards by which to estimate the bias of this test method.

## 14. Keywords

14.1 compressive properties; compressive strength; modulus of elasticity; plastics

## ANNEX

### (Mandatory Information)

#### A1. TOE COMPENSATION

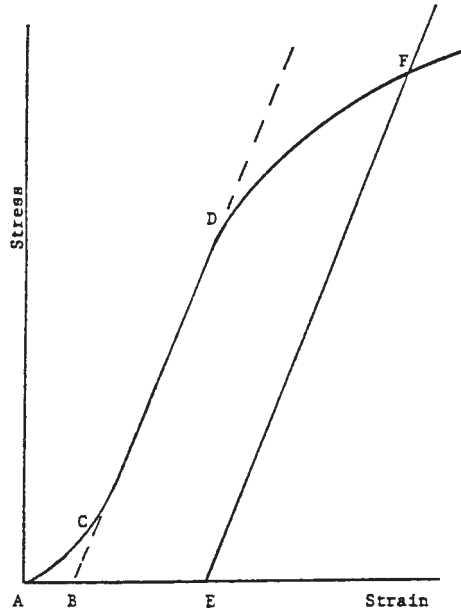
A1.1 In a typical stress-strain curve (Fig. A1.1) there is a toe region,  $AC$ , that does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a take-up of slack, and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (Fig. A1.1), a continuation of the linear ( $CD$ ) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection ( $B$ ) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset ( $BE$ ), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any

point along the line  $CD$  (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point  $B$ , defined as zero-strain).

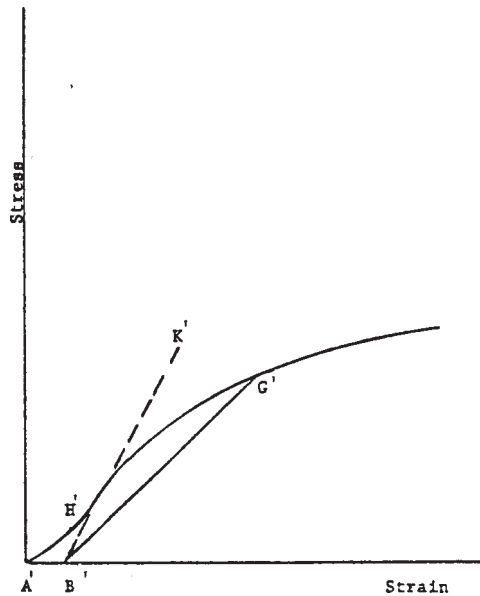
A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection point ( $H'$ ). This is extended to intersect the strain axis at Point  $B'$ , the corrected zero-strain point. Using Point  $B'$  as zero strain, the stress at any point ( $G'$ ) on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of line  $B'G'$ ). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.





NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

**FIG. A1.1 Material with Hookean Region**



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

**FIG. A1.2 Material with No Hookean Region**

### SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of selected changes to this test method. For the convenience of the user, Committee D20 has highlighted those changes that may impact the use of this test method. This section may also include descriptions of the changes or reasons for the changes, or both.

*D695-02a:*

- (1) Added Terminology D 883.
- (2) Added Test Methods D 5947.
- (3) Added 3.1, adjusted numbering throughout Section 3.
- (4) Changed reference in 3.2.8 from 3.11 to 3.2.11.
- (5) Deleted last sentence of 4.1.
- (6) Added last sentence to 4.4.
- (7) Reworded 5.1.1 to improve readability.

(8) Changed “fortuitous flow” to “flaw” in 8.3.

(9) Reworded Note 11, 13.2, 13.2.1, and 13.2.2 to be in accordance with Guide D 4968.

(10) Corrected the title of Fig. 3.

*D695-02:*

(1) Revised 7.1 and 7.2.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or [service@astm.org](mailto:service@astm.org) (e-mail); or through the ASTM website ([www.astm.org](http://www.astm.org)).*