

**EVALUACION A NIVEL DE LABORATORIO DE LAS CARACTERISTICAS QUIMICAS
Y MECANICAS DEL COMPORTAMIENTO DE UN MATERIAL COMPUESTO A PARTIR
DE MATRICES DE RESINA EPOXI MEZCLADAS CON RIPIO DE LLANTA EN
DIFERENTES PROPORCIONES PARA SU UTILIZACION COMO MATERIAL
ALTERNATIVO EN DIVERSOS CAMPOS DE LA INDUSTRIA.**

LAURA MARIA PARDO MOTTA

JUAN CAMILO MALDONADO PARRA

Proyecto Integral de Trabajo de Grado para optar por el título de

INGENIERO MECÁNICO E INGENIERA QUÍMICA

Director:

MSc. Dany José Cárdenas Romay

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA

FACULTAD DE INGENIERIAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA E INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTA D.C.

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

**Ing. Dany José Cárdenas
Romay**

Bogotá D.C., Junio 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Naliny Patricia Guerrero Prieto

Director(a) de Ingeniería Mecánica

Ing. María Angélica Acosta Pérez

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente No son responsables de los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos Corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios, por brindarnos la oportunidad de realizar este proyecto en conjunto como opción de grado para empezar la vida profesional. Agradecemos también a nuestros padres que han estado durante todo el proceso de formación guiándonos y apoyándonos de la mejor manera.

Agradecemos a nuestro director de tesis el docente Dany Cárdenas por hacer que este proyecto sea posible, guiándonos y colaborándonos con las adversidades presentes en el proceso.

Al Centro de Formación SENA, por brindarnos los equipos para las pruebas necesarias para este proyecto permitiendo el uso de sus instalaciones para la ejecución experimental del proyecto.

Y finalmente a la Fundación Universidad de América por su colaboración y orientación constante y para formarnos con los conocimientos necesarios de un ingeniero íntegro.

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado especialmente a mi padre Edilberto Pardo Herrera, quien, sin su apoyo constante, paciencia y guía no hubiera sido posible la culminación del proyecto y de mi carrera. En este proyecto está reflejado los esfuerzos unidos entre mi familia y yo, pero quiero enfatizar algo muy importante que ha marcado mi vida y ha sido la constancia, perseverancia y el apoyo económico incondicional que tiene mi padre conmigo, y esa confianza continua que ha depositado en mí, haciéndome más fuerte y valiente para asumir retos y enfrentar obstáculos. A mi mamá que sin su apoyo y amor diario no hubiera podido culminar mis estudios, y en general a mis padres quienes son mi ejemplo, enseñándome cada día a ser mejor formándome como una persona llena de valores y de carácter suficiente para poder afrontar lo que la vida ponga en mi camino.

DEDICATORIA

Me gustaría de dicar esta tesis a mi madre Blanca Pilar Parra Cárdenas, ya que sin ella no lo habría logrado, su bendición a lo largo de mi vida me acompañó y me llevo por el camino del bien, también brindándome su comprensión y apoyo en momentos difíciles de mi carrera, me ha enseñado a encarar las adversidades sin nunca llegar a desfallecer en el intento, me ha dado todo lo que soy y seré como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y empeño, todo esto entregado a mí con una gran dosis de amor y sin nunca pedir nada a cambio.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	19
1. GENERALIDADES	20
1.1 Ripio de llanta	20
1.2 Llanta	20
<i>1.2.1 Banda de rodadura</i>	20
<i>1.2.2 Flanco</i>	20
<i>1.2.3 Hombro</i>	21
<i>1.2.4 Lonas de carcaza</i>	21
<i>1.2.5 Lonas de cima</i>	21
<i>1.2.6 Talón</i>	21
<i>1.2.7 Revestimiento de goma interior</i>	21
1.3 Polímeros	21
1.4 Resina	22
1.5 Resina epoxi	22
1.6 Maquina universal de ensayos	22
1.7 Ensayo de flexión	23
1.8 Ensayo de tensión	23
1.9 ensayo de solubilidad	24
1.10 análisis morfológico	25
1.11 Microscopio	25
1.12 Termocupla tipo K	25
1.13 Horno de tratamientos térmicos	26
1.14 Módulo de elasticidad	27
1.15 Limite elástico	27
1.16 Dilatación térmica	29
1.17 Benceno	30
1.18 Ácido sulfúrico	30

1.19 Soda caustica	30
1.20 Solvente	31
2. OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE UN MATERIAL COMPUESTO MEDIANTE LA OPERACIÓN DE MOLDEO A BASE DE RIPIO DE LLANTA DE TRES DIFERENTES PROPORCIONES CONSOLIDANDO SU GEOMETRÍA SEGÚN LAS NORMAS ASTM D7264/D7264M-21 Y D3039/D3039M-17	32
2.1 Proceso conformado probetas	32
2.2 Proceso de obtención de la resina epoxi	34
2.3 Proceso de obtención del ripio	35
2.4 Elaboración de la mezcla para la matriz	38
3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS EN LAS MUESTRAS DEL MATERIAL COMPUETO, REALIZANDO ENSAYOS DE TENSIÓN, FLEXIÓN Y EXPANSIÓN TÉRMICA EN LAS PROBETAS, PARA SU RESPECTIVO ANÁLISIS	47
3.1 Ensayo a tensión	50
3.2 Ensayo a la flexión	58
3.3 Ensayo de expansión térmica	67
4. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS EN LAS MUESTRAS DEL MATERIAL COMPUESTO, REALIZANDO UN ANÁLISIS MORFOLÓGICO Y UN ENSAYO DE SOLUBILIDAD EN DIFERENTES SOLVENTES, ANALIZANDO IMÁGENES ESTRUCTURALES Y OBTENIENDO RESISTENCIA A LA ACCIÓN DE DISOLVENTES PARA SU CORRESPONDIENTE ANÁLISIS	74
4.1 Análisis de solubilidad en diferentes solventes	79
4.2 Análisis morfológico	86
5. CONCLUSIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de funcionamiento de la termocupla	26
Figura 2. Curva tensión-deformación	27
Figura 3. Curva esfuerzo-deformación	29
Figura 4. Proceso general de conformado de probetas	33
Figura 5. Kit Colrepox 6090A/1956B	35
Figura 6. Ripio tamaño 400 micrones – 74 micrones	36
Figura 7. Ripio tamaño 2.5mm-5mm	37
Figura 8. Mezcla resina-ripio	39
Figura 9. Proceso de elaboración probetas 50%ripio, 50%resina	39
Figura 10. Proceso de elaboración probetas 30%ripio, 70%resina	40
Figura 11. Proceso de elaboración probeta 70%ripio, 30%resina	41
Figura 12. Molde según normas ASTM	42
Figura 13. Molde con probetas 50%-50%	43
Figura 14. Probetas con alistamiento	44
Figura 15. Grafica esfuerzo vs deformación blanco	52
Figura 16. Grafica esfuerzo vs deformación 70%-30% (1)	53
Figura 17. Grafica esfuerzo vs deformación 70%-30% (2)	54
Figura 18. Grafica esfuerzo vs deformación 50%-50% (1)	55
Figura 19. Grafica esfuerzo vs deformación 50%-50% (2)	56
Figura 20. Grafica esfuerzo deformación blanco	60
Figura 21. Ensayo a flexión blanco	60
Figura 22. Grafica esfuerzo deformación 70%-30% (1)	61
Figura 23. Ensayo a flexión 70%-30% (1)	62
Figura 24. Grafica esfuerzo deformación 70%-30% (2)	63
Figura 25. Ensayo a flexión 70%-30% (2)	63
Figura 26. Grafica esfuerzo deformación 50%-50% (1)	64
Figura 27. Grafica esfuerzo deformación 50%-50% (2)	65
Figura 28. Grafica 50%-50%. Datos largo	68
Figura 29. Grafica 50%-50%. Datos ancho	69
Figura 30. Grafica 50%-50%. Datos espesor	69
Figura 31. Grafica 70%-30%. Datos largo	70

Figura 32. Grafica 70%-30%. Datos ancho	71
Figura 33. Grafica 70%-30%. Datos espesor	71
Figura 34. Largo de las probetas 50%-50% antes y después de ser sumergidas en los solventes	80
Figura 35. Grafica ancho de las probetas 50%-50% antes y después de ser sumergidas en los solventes	80
Figura 36. Grafica espesor de las probetas 50%-50% antes y después de ser sumergidas en los solventes	81
Figura 37. Probeta 50%-50% sumergida en benceno	82
Figura 38. Probeta 50%-50% sumergida en benceno, con aumento	83
Figura 39. Largo de las probetas 70%-30% antes y después de ser sumergidas en los solventes	84
Figura 40. Ancho de las probetas 70%-30% antes y después de ser sumergidas en los solventes	84
Figura 41. Espesor de las probetas 70%-30% antes y después de ser sumergidas en los solventes	85
Figura 42. Imagen en aumento 4x/0.1. Área 1	87
Figura 43. Imagen en aumento 4x/0.1. Área 2	88
Figura 44. Imagen tomada desde el visor del microscopio, en aumento 4x/0.1	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones de operación y equipos del proceso (1)	45
Tabla 2. Condiciones de operación y equipos del proceso (2)	48
Tabla 3. Condiciones de operación y equipos del proceso (3)	49
Tabla 4. Resultados ensayo tensión	50
Tabla 5. Resultados dureza	57
Tabla 6. Resultados ensayo a flexión	59
Tabla 7. Datos del ensayo de expansión térmica 50%-50%	68
Tabla 8. Datos del ensayo de expansión térmica 70%-30%	70
Tabla 9. Coeficiente de dilatación térmica lineal	72
Tabla 10. Coeficiente de dilatación térmica lineal de PP (polipropileno)	72
Tabla 11. Distinción de niveles de solvencia	75
Tabla 12. Condiciones de operación y equipos del proceso	75
Tabla 13. Condiciones de operación y equipos del proceso	78
Tabla 14. Datos tomados del ensayo de solubilidad para la probeta 50%-50%	79
Tabla 15. Datos tomados del ensayo de solubilidad para la probeta 70%-30%	83

ABREVIATURAS

mm: Milímetros

N: Newton

°C: Celsius

h: horas

gr: gramos

min: minutos

ml: mililitros

Mpa: Mega pascales

KN/m: Kilo newton metro

RESUMEN

En este proyecto se realizaron pruebas destructivas con el fin de hallar las características químicas y mecánicas de un material compuesto en base de resina epoxi y ripio de llanta en diferentes proporciones. Las pruebas realizadas constaron de ensayos de tensión y flexión para las características mecánicas, y ensayos de análisis morfológicos y solubilidad en diferentes solventes los cuales fueron; benceno, soda caustica y acido sulfúrico, para las características químicas, con el propósito de buscar la aplicación más favorable como material alternativo en el amplio contexto de la industria.

Se llevó a cabo la fabricación de las probetas mediante moldeo siguiendo las normas ASTM D7264/D7264M-21 y D3039/D3039M-17 establecidas para los ensayos realizados. Para la elaboración de las probetas se tuvo en cuenta un diseño experimental 2^3 de esta forma el número adecuado de pruebas se definió en función de las variables significativas que intervienen en el proceso de conformado. El diseño de cada probeta fue preparado partiendo de diferentes proporciones de ripio de llanta y de resina epoxi, el ripio de llanta está conformado por dos tamaños de grano que van entre un rango de 2.5mm – 5mm y otro de menor tamaño que van entre un rango de 400 micrones – 74 micrones aproximadamente. Las muestras se mezclaron en partes iguales para realizar las siguientes proporciones en combinación con la resina; 50% resina – 50% ripio, 70% resina – 30% ripio y 30% resina – 70% ripio, estas proporciones se tomaron a partir de la revisión profunda de fuentes bibliográficas, de esta manera, las relaciones porcentuales que se muestran corresponden a aquellas que presentaron un mejor desempeño.

Las variables independientes que se manejaron en la elaboración de las probetas son la proporción de la relación porcentual entre ripio y resina y la temperatura. Durante el proceso de curado la temperatura fue manipulada y se mantuvo entre 90°C y 110°C, permitiendo obtener diferentes propiedades estructurales las cuales fueron evidenciadas en el análisis morfológico que se llevó a cabo en las probetas.

Los resultados de los análisis realizados al material polimérico fueron presentados en gráficos de esfuerzo vs deformación, para los ensayos mecánicos de flexión y tensión, la resistencia máxima obtenida fue 0,173Mpa de flexión y 9,717KN/m de tensión. Al analizar

las gráficas y datos generados en estos ensayos encontramos que la probeta con relación 70%-30% fue la probeta con mayor carga a la tensión con un valor de 288,105N

Los ensayos de dilatación térmica, se realizaron en baño de probetas a un rango de temperaturas de 20°C a 100°C los resultados mostraron baja dilatación térmica lineal (baja expansión volumétrica) al correlacionar los datos se obtuvo un valor de 0,0001488 1/°C de la proporción 50%-50% y 0,0002500 1/ °C de la probeta 70%-30% comparados con el material PP (polipropileno) teniendo un dato de dilatación térmica lineal de 0,00001 1/°C.

Las probetas fueron sometidas a pruebas de resistencia al desgaste frente a tres solventes de uso comercial. Los resultados mostraron solubilidad baja de las probetas. Por último, se procedió al análisis morfológico de las probetas. Los resultados mostraron baja regularidad estructural (amorfismo) en probetas con alto contenido de resina (bajo contenido de ripio) y alto grado de homogeneidad estructural (isomorfismo) en las probetas con bajo contenido de resina epoxi (alto contenido de ripio).

Palabras clave

- Resina epoxi
- Ripio
- Polímero
- Material compuesto
- Caracterización de materiales

INTRODUCCION

En el mundo actual es necesaria la implementación de estrategias para la conservación del medio ambiente mediante la reutilización de materiales de desecho difíciles de reciclar de manera convencional. Un claro ejemplo de esta situación se presenta con los residuos de llanta los cuales representan el 10 millones de unidades que en unos años serán una montaña de residuos si no se implementan acciones de gestión ambiental. [1] Dando lugar a un producto insoluble e infusible mediante reacciones químicas que son llamadas de curado o reticulación y de esta forma ser debidamente caracterizado. [2]

Debido a la alta concentración del residuo sólido en disposición y sus efectos adversos para el medio ambiente, tales como material particulado, monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), y compuestos orgánicos volátiles (COVs). [3] en Bogotá se producen alrededor de dos millones (2'000.000) de llantas al año.[4] una de las alternativas para su aprovechamiento es usarlo como materia prima en la elaboración de materiales compuestos, como se mencionó anteriormente los residuos de llantas, llamados también ripios de llantas pueden ser reutilizados habiendo que la producción de materiales compuestos sea más rentable y de igual formase puede contribuir a la reducción de desechos en espacios públicos, rellenos sanitarios y bodegas destinadas al almacenamiento de dicho residuo, contribuyendo al medio ambiente que es afectado por los malos manejos de este material, desarrollando múltiples consecuencias ambientales y de salud a la población. La reutilización traería beneficios no solo en el punto de vista medioambiental, si no, también en las diferentes industrias por ejemplo son la construcción, el calzado, la industria textil, partes o autopartes entre otros.

La reutilización de la llanta en diferentes campos ha ayudado significativamente a disminuir la presencia de este residuo en espacios públicos como también aportando a la sobreocupación espacio presente en las ya mencionadas bodegas y rellenos sanitarios, la implementación de nuevos usos y estrategias ha contribuido a la creación de nuevas industrias que mediante el uso de la llanta usada como materia prima han generado novedosos productos en el mercado, como lo son los pisos deportivos o asfaltos, que gracias a estas estrategias se puede llegar a innovar con perspectivas ingenieriles para la creación de nuevos productos.

Este proyecto se presenta como una oportunidad de aprovechamiento del caucho de llanta para la obtención de un material compuesto con propiedades ingenieriles, se pretende que la síntesis de dicho material permita el desarrollo de piezas o revestimientos, de esta forma se podría ampliar el portafolio de materiales presentes en el desarrollo de nuevos productos o se podrían mejorar materiales en productos ya presentes, el ya mencionado material compuesto aprovecharía el caucho de llanta que proviene de un producto consumible con una vida útil relativa dependiendo de su forma de uso pero que de igual manera rondaría los 10 años o menos,[5] se busca que este nuevo material sin importar su utilidad o el producto final que se constituya, presente una vida útil mucho más amplia que una llanta normal, generando así productos con este material capaces de ser utilizados por amplios periodos de tiempo dependiendo de la función y del entorno del mismo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Caracterizar química y mecánicamente el material compuesto con matriz de resina epoxi y ripio de llanta.

Objetivo específicos

- Obtener muestras de un material compuesto mediante la operación de moldeo a base de ripio de llanta de tres diferentes proporciones consolidando su geometría según las normas ASTM D7264/D7264M-21 y D3039/D3039M-17.
- Determinar las propiedades mecánicas y térmicas en las muestras del material compuesto, realizando ensayos de tensión, flexión y expansión térmica en las probetas, para su respectivo análisis.
- Identificar las propiedades químicas en las muestras del material compuesto, realizando un análisis morfológico y un ensayo de solubilidad en diferentes solventes, analizando imágenes estructurales y obteniendo resistencia a la acción de disolventes para su correspondiente análisis.

1. GENERALIDADES

1.1 Ripio de llanta

El ripio de llanta es caucho de llanta en forma particulado, del cual podemos encontrar varias aplicaciones, como una solución constructiva y ecológica, que ayuda al equilibrio ambiental y también suple algunas necesidades dentro del sector industrial.

1.2 Llanta

La llanta es una pieza circular, que varía en relación al tipo y tamaño del vehículo. Las llantas se utilizan en vehículos como automóviles, camiones, motocicletas, bicicletas, aviones etc. [6]

Las llantas estas diseñadas para soportar el peso del vehículo, absorber los impactos de la carretera, transmitir la tracción, las fuerzas de par y de frenado a la superficie de carretera y mantener y cambiar la dirección de la marcha. Para cumplir estas cuatro funciones básicas, las llantas se elaboran con caucho flexible y se rellenan con aire comprimido. La cámara de aire de un llanta sirve para mantener la presión de aire adecuada, aunque no es capaz de retener por sí sola el aire a presión lo suficientemente elevado como para soportar el peso del vehículo, ni es lo suficientemente resistente para soportar los daños o impactos. [7]

1.2.1 Banda de rodadura

Es la banda exterior de caucho que circunda a la armadura o carcasa del neumático y destinada al contacto con el suelo. La reducida porción de la banda de rodadura que se apoya en el pavimento (superficie de la huella) constituye el único elemento de enlace entre el vehículo y la carretera, mediante el cual se desarrolla el complicado proceso de adherencia. [8]

1.2.2 Flanco

Está constituido por goma flexible para adaptarse a las deformaciones del neumático en fase de rodadura. Protege a la llanta de golpes laterales. [8]

1.2.3 Hombro

La goma del hombro es la más gruesa, debido a que es la parte más expuesta a los bordillos y otros golpes, además permite distribuir fácilmente el calor producido por el neumático durante sus movimientos sobre la carretera. [8]

1.2.4 Lonas de carcasa

Son cables de fibras textiles en arcos dispuestos en ángulos rectos y pegados al caucho de las cubiertas. Permiten a la llanta resistir la presión. En una lona de neumático de un turismo hay aproximadamente unos 1400 cables. [8]

1.2.5 Lonas de cima

Son cables de acero muy fino y resistente, cruzados oblicuamente y pegados unos a otros de manera que formen triángulos indeformables. Esta estructura garantiza al mismo tiempo robustez y flexibilidad. [8]

1.2.6 Talón

Parte interior del neumático que se ajusta a las llantas, está compuesto por alambres de acero de alta tecnología formando un cable trenzado y circular, esto facilita el ajuste del neumático y las llantas evitando que patine en ella. [8]

1.2.7 Revestimiento de goma interior

Es la capa de goma más interna y sirve para retener el aire en el interior del neumático facilitando la estanqueidad. [8]

1.3 Polímeros

Los polímeros son macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (conocidas como monómeros) que se repiten a lo largo de toda la cadena. [9]

Existen diferentes tipos de polímeros, entre los cuales encontramos los polímeros naturales, que no han sido fabricados por el ser humano, algunos de ellos como el caucho y el algodón. Los polímeros naturales tienen déficit ya que se deforman con bastante facilidad y son quebradizos.

Los polímeros artificiales, son aquellos que se sintetizan en un laboratorio y son usados de forma masiva en un gran número de aplicaciones, cuentan con propiedades y estructuras químicas idóneas.

1.4 Resina

La resina es un líquido de consistencia viscosa que es translúcida o transparente, que al añadirse dos componentes (catalizador y acelerador) se produce una reacción química denominada polimerización que hace que la resina gelifique o endurezca. [10]

El proceso de polimerización o curado, la resina se transforma en un producto que posteriormente se endurecerá, mostrando su apariencia final. La reacción química que está ocurriendo es que las moléculas pequeñas se unen y se forman moléculas gigantes, creando este material.

1.5 Resina epoxi

Es un polímero termoestable que pasa de estado líquido a sólido cuando se le aplica un endurecedor o catalizador. [11]

La resina epoxica tiene ventajas frente a otras como su dureza, brillo y transparencia. Su alta resistencia térmica permite temperaturas prolongadas hasta de 45°C y ocasionalmente de 70°C. Cuenta también con una gran resistencia a la corrosión, soportando una exposición más prolongada a agentes químicos corrosivos.

1.6 Maquina universal de ensayo

Es un equipamiento muy utilizado el cual es similar a una prensa, y funciona sometiendo a los alimentos o materiales a distintas pruebas de tracción, compresión o flexión, con el fin de medir sus propiedades y capacidades.

La máquina universal de ensayo logra ejercer esta fuerza a través de placas de compresión o mordazas, las cuales pueden ser cónicas o laterales y que están accionadas por tornillos o mordazas manuales, o por un sistema hidráulico o mordaza hidráulica. [12]

La función principal de la máquina universal de ensayo es la de comprobar la resistencia de un producto o material. Para llevar a cabo esta tarea, este equipo está compuesto de un sistema de servocontrol, el cual aplica cargas controladas sobre una probeta, la cual tiene un modelo de dimensiones preestablecidas. Finalmente, esta máquina mide en forma gráfica la deformación y carga al momento de la rotura de la muestra. [12]

1.7 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión es un método utilizado para comprobar la resistencia a la flexión de los materiales, así como otras propiedades importantes en la innovación de materiales. En función del número de puntos de presión y del soporte de la muestra de ensayo, se distinguen los siguientes: Ensayo de flexión en 1 punto, ensayo de flexión en 3 puntos y ensayo de flexión en 4 puntos. [13]

Estos ensayos se realizan con el objetivo de obtener información sobre el comportamiento de flexión del material a partir de la tensión de flexión en un eje. En el caso de los materiales frágiles, se determina así la resistencia a la flexión. En el caso de materiales dúctiles, se determina el límite de fluencia, el mayor ángulo de flexión posible y el módulo de Young, en caso de una deformación elástica.

Un ensayo de flexión se realiza en una máquina de ensayos universal colocando una muestra en dos soportes y doblándola mediante la aplicación de una fuerza en carga para medir sus propiedades. El punzón de prueba se mueve hacia abajo lentamente y a una velocidad constante para cargar la muestra con una fuerza creciente hasta que se rompe o alcanza la deformación previamente determinada. La carga máxima ejercida durante el ensayo de flexión se denomina fuerza de rotura. [13]

1.8 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión provee información sobre la resistencia y ductilidad de los materiales mediante tensiones de tracción uniaxiales. Esta información será útil para comparar materiales entre sí, desarrollar nuevos materiales, mantener un control de calidad y para diseñar bajo ciertas circunstancias. [14]

El ensayo de tensión es probablemente el tipo de ensayo más fundamental de todas las pruebas mecánicas que se puede realizar en un material. En este ensayo se somete al material a una fuerza de tensión, es decir, se le aplica una fuerza o varias fuerzas externas que van a tratar de estirar el material.

Estirando el material, podemos determinar rápidamente cómo el material va a reaccionar ante las fuerzas que se le aplican y que tratan de estirarlo. A medida que estiramos el material, iremos viendo la fuerza que hacemos en cada momento y la cantidad que se estira el material (alargamiento). [15]

1.9 Ensayo de solubilidad

El estudio de la solubilidad de los polímeros en diferentes disolventes es importante a la hora de especificar su resistencia a determinados ambientes, por su utilización en las aplicaciones finales. [16]

La solubilidad de un polímero varía en función de su estructura química y del peso molecular, siendo más fácilmente solubles las fracciones de bajo peso molecular. Por tanto no es extraño que durante un proceso de disolución o de extracción de los aditivos se disuelvan las fracciones más ligeras de los polímeros, quedando insolubles las de alto peso molecular. [17]

Dado el alto peso molecular del polímero, si es necesario se trocea la muestra lo más finamente posible, una vez se tiene troceada, se introduce a un tubo de ensayo con el disolvente agitándolo continuamente durante un tiempo prolongado. El polímero puede bien disolverse, o permanecer inalterado o bien permanecer hinchado formando un gel. Existen numerosos tipos de disolventes de plásticos, los más ampliamente utilizados son benceno, acetona y ácido fórmico.

1.10 Análisis morfológico

Un análisis morfológico, es aquel ensayo que ofrece una visión general de toda la estructura morfológica y cristalina de los materiales así como información sobre sus superficies. [18] En el ensayo se analiza la estructura cristalina y también defectos, trastornos, tamaño y orientación

cristalina.

1.11 Microscopio

Un microscopio es, básicamente, un sistema óptico que permite magnificar detalles de un objeto. Con el microscopio de luz pueden observarse detalles del orden del micrones, mientras que con el microscopio electrónico se alcanzan a apreciar objetos del orden de los nanómetros. En el microscopio electrónico, un haz de electrones incide sobre una muestra generando interacciones entre el haz y los átomos de la misma. De esta forma se producen señales que son captadas por un detector o bien, proyectadas directamente sobre una pantalla. [19]

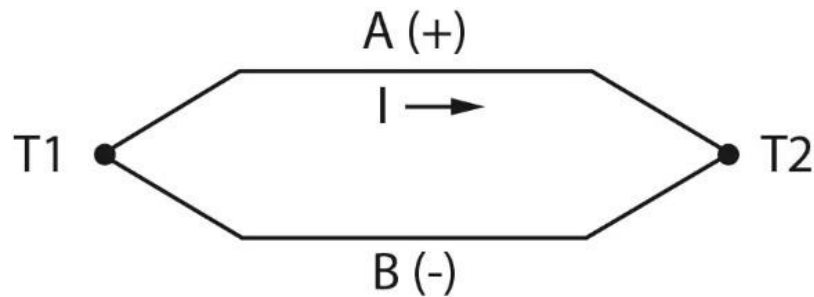
1.12 Termocupla tipo k

Es uno de los sensores más importantes utilizados en la medición de temperatura en los más variados segmentos industriales, son los sensores más adecuados para medir temperaturas, consiste en dos metales distintos, unidos en sus extremos y conectados a un termómetro termopar u otro dispositivo capaz de termopar, forman un circuito cerrado que genera una fuerza electromotriz cuando las dos juntas (T1 y T2) se mantienen a diferentes temperaturas. [20]

En la figura 1, se muestra el diagrama de funcionamiento de una termocupla.

Figura 1.

Diagrama de funcionamiento de la termocupla



Nota. La figura representa el funcionamiento de la termocupla.
Tomado de: Alutal.com.br. 2019. *Termocupla, cómo funciona, tipos, consejos y modelos.*
<https://www.alutal.com.br/es/termopar>

1.13 Horno de tratamientos térmicos

Los hornos industriales son dispositivos o equipos utilizados para calentar o fundir piezas a diferentes temperaturas, colocándolos en su interior por encima de la temperatura ambiente; las cuales producirán reacciones químicas dependiendo la obtención del producto deseado. También se puede tratar térmicamente un material para impartir determinadas propiedades, ablandar los materiales para una operación de conformado posterior, y recubrir las piezas con otros materiales [21]

1.14 Módulo de elasticidad

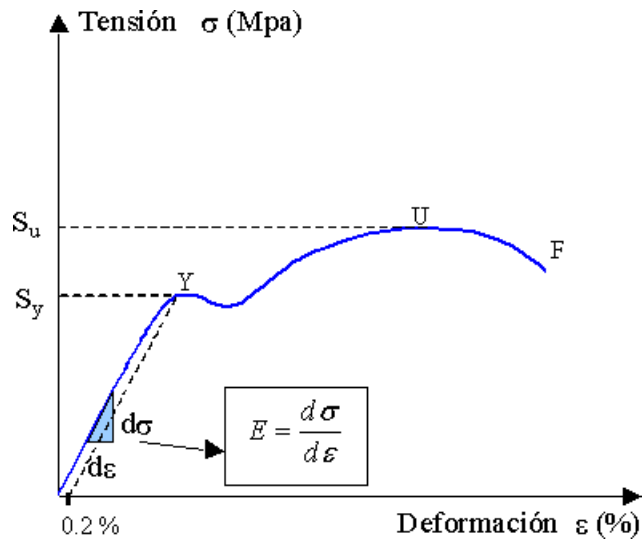
El módulo de elasticidad (E), también llamado módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente (en la zona de comportamiento elástico de dicho material) entre los incrementos de tensión aplicados ($d\sigma$) en el ensayo a tracción y los incrementos de deformación longitudinal unitaria ($d\epsilon$) productos.ç

$$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \text{ —}$$

Equivale a la tangente de cada punto de la zona elástica en la gráfica de tensión- deformación (σ - ϵ) obtenida del ensayo a tracción como se muestra en la figura 2. [22]

Figura 2.

Curva tensión- deformación



Nota. Grafica esfuerzo vs deformación demostrando módulo de elasticidad. Tomado de: Perez Gonzalez, A., 2017. *Mecapedia-Mdulo de elasticidad*. Mecapedia.uji.es. http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm

En muchos casos el módulo de elasticidad es constante durante la zona elástica del material, indicando un comportamiento lineal del mismo. [22]

1.15 Limite elástico

El límite elástico, también denominado límite de elasticidad, es la tensión máxima que un material elástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican sobre el material fuerzas superiores a su límite de elasticidad, no recupera su forma original cuando dejan

de aplicarse fuerzas sobre él. En general, un material sometido a tensiones inferiores a su límite de elasticidad es deformado temporalmente de acuerdo con la ley de Hooke. [23]

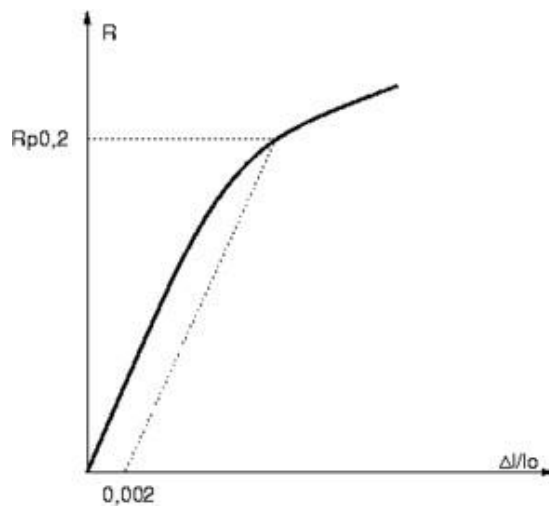
Los materiales sometidos a tensiones superiores a su límite de elasticidad tienen un comportamiento plástico. Si las tensiones ejercidas continúan aumentando el material alcanza su punto de fractura.

Si se dispone en un gráfico idealizado las tensiones en función de las deformaciones se observa que, en un principio y para la mayoría de los materiales (los elastómeros no lo cumplen, por ejemplo), aparece una zona que sigue una distribución casi lineal, donde la pendiente es el módulo de elasticidad. Esta zona se corresponde a las deformaciones elásticas del material hasta un punto donde la función cambia de régimen y empieza a curvarse, zona que se corresponde al régimen plástico. Ese punto es el punto de límite elástico. [24]

En la figura 3, se muestra la curva esfuerzo deformación, con la determinación del límite elástico. Debido a la dificultad para localizar exactamente y con total fidelidad ese punto, ya que en los gráficos experimentales la recta es difícil de determinar y existe una banda donde podría situarse el límite elástico, en ingeniería se considera como límite elástico la tensión a la cual el material tiene una deformación plástica del 0,2%. [24]

Figura 3.

Curva esfuerzo-deformación



Nota. Grafica esfuerzo vs deformación ilustrando límite elástico. Tomado de: TENSO, U., 2019. *Glosario de términos*.

<http://www.tenso.es/utilidades/glosario.asp?termino=L%EDmite%20el%Elstico>

1.16 Dilatación térmica

La dilatación térmica es el proceso por el cual los cuerpos aumentan su volumen debido a su temperatura. Afecta a todos los estados de agregación de la materia. La dilatación térmica de los materiales es el aumento de volumen, generalmente imperceptible, de un cuerpo durante la elevación de su temperatura a presión constante. Esta dilatación se explica por el aumento de la agitación térmica de las partículas que forman el cuerpo. Si el cuerpo es largo, su dilatación será especialmente perceptible en el sentido de la longitud: se habla entonces de su dilatación lineal.

1.17 Benceno

Líquido incoloro de olor característico y sabor a quemado, de fórmula C_6H_6 . La molécula de benceno consiste en un anillo cerrado de seis átomos de carbono unidos por enlaces químicos que resuenan entre uniones simples y dobles. Cada átomo de carbono está a su vez unido a un átomo de hidrógeno.

El benceno (C_6H_6) fue descubierto por el científico inglés Michael Faraday en 1825 aislándolo del gas de alumbrado. Pero hasta 1842 en que se descubrió la existencia del benceno en el alquitrán de hulla El benceno puro arde con una llama humeante debido a su alto contenido de carbono.[25]

Mezclado con grandes proporciones de gasolina constituye un combustible aceptable.[25]

1.18 Ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico es un líquido aceitoso, incoloro y transparente, sumamente corrosivo. También se le llama ácido sulfínico, ácido de batería y sulfato de hidrógeno.

La fórmula química del ácido sulfúrico es H_2SO_4 . Es decir, una molécula de este ácido está formada por dos átomos de hidrógeno, uno de azufre y cuatro de oxígeno. Por esta razón, también se le conoce como ácido tetraoxosulfúrico o tetraoxosulfato (IV) de hidrógeno. En condiciones normales el ácido sulfúrico se presenta como un líquido aceitoso y viscoso, transparente o ligeramente amarillo y, en función de su concentración, con un olor bastante particular. Y es que los compuestos de azufre suelen emitir un inconfundible hedor a huevos podridos, asociado también a los volcanes.[26]

El ácido sulfúrico es soluble en agua y tiene un gran efecto deshidratante, por lo que puede utilizarse para el secado de gases y líquidos. Además, es un potente agente oxidante y, a altas temperaturas, reacciona con muchos metales. [26]

1.19 Soda caustica

La Soda Caustica en Escamas es una sustancia blanca, higrosópica deliquescente y muy corrosiva, se encuentra en presentación sólida, y posee una alta capacidad de absorción de

Dióxido de Carbono y agua del aire. [27]

Su nombre químico es hidróxido de sodio (NaOH), y se conoce como hidróxido sódico, lejía de sosa, jabón de piedra, hidrato de sodio o soda cáustica. Es un tipo de hidróxido que se usa como base química para diversas formulaciones de la industria petrolera, de limpieza y papel. A temperatura ambiente es sólido, sin olor, de color blanco cristalino, es muy corrosivo y absorbe la humedad del aire; cuando se disuelve en agua o neutraliza con un ácido, la sosa cáustica libera el calor suficiente para encender materiales combustibles. [28]

1.20 Solvente

El solvente, también conocido como disolvente, es la sustancia en que se disuelve un soluto, generando como resultado una solución química. Generalmente, el solvente es el componente que se encuentra en mayor proporción en la solución.

2. OBTENCION DE MUESTRAS DE UN MATERIAL COMPUESTO MEDIANTE LA OPERACIÓN DE MOLDEO A BASE DE RIPIO DE LLANTA DE TRES DIFERENTES PROPORCIONES CONSOLIDANDO SU GEOMETRÍA SEGÚN LAS NORMAS ASTM D7264/D7264M-21 Y D3039/D3039M-17

2.1 Proceso conformado probetas

La elaboración de las probetas empieza con la preparación de los moldes, los cuales están conformados por una lámina de acero al carbono mecanizada con las geometrías especificadas en las normas ASTM D3039/D3039M para el ensayo a tensión y ASTM D7264/D7264M para el ensayo a flexión, además de tener incorporado en el molde dos orificios en los extremos realizados en el mecanizado donde se acoplarán dos termocuplas tipo K conectadas a un lector de temperatura electrónico donde se tendría la temperatura promedio a la cual estaría el molde.

El siguiente paso es aplicarle al molde un desmoldante en este caso específico la vaselina, la cual debe de ser aplicada de forma homogénea por las superficies de las cavidades del molde sin dejar grumos ni excesos sobre el mismo.

La resina epoxica empleada en este proceso de conformado de probetas es un kit de dos componentes COLREPOX la cual es una resina empleada como relleno en diferentes industrias. Dicha resina requiere ser aplicada en proporción 3:1, lo que significa que al momento de realizar la preparación de la misma y después de su previo homogenizado de cada parte de la resina por individual y mediante el agitado de ambos productos, se procede a incorporar en un recipiente 3 partes de resina por una de catalizador, acto seguido se mezcla de forma consistente incorporando a la ya mencionada mezcla el ripio de llanta en la proporción que se desee conformar la probeta, cada una de estas proporciones y partes de la mezcla siendo medidas con una gramera.

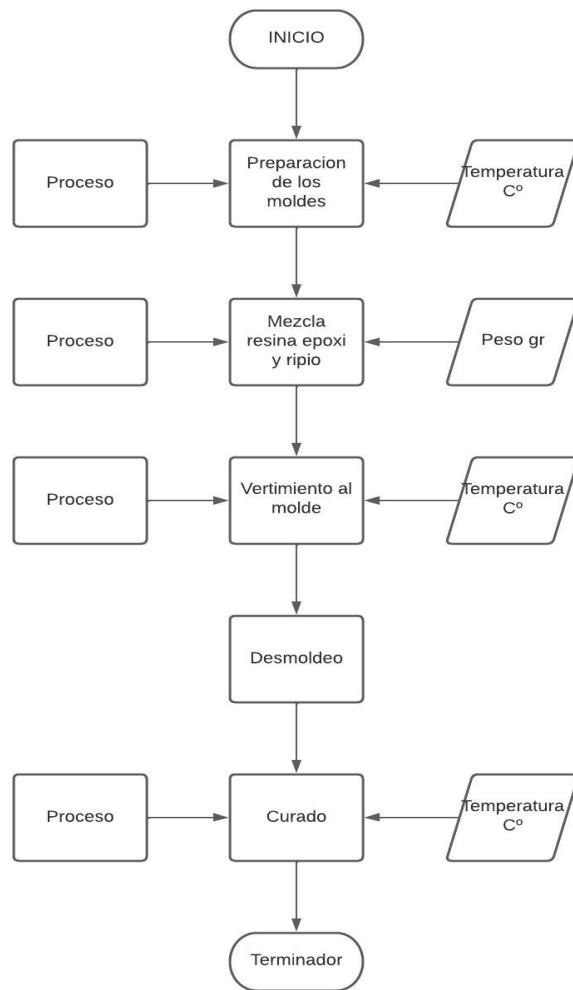
Posteriormente se procede a verter la mezcla en el molde en este punto es importante tener en cuenta la temperatura de refrigeración de este para llevar a cabo cada una de las pruebas,

finalmente en el proceso de moldeado de las probetas el molde debe girarse 180° y golpearse fuertemente para garantizar la extracción de la probeta a estas se les deben retirar las rebabas para garantizar la geometría y un buen ensayo.

Las probetas deben ser curadas en un horno de resistencia eléctrico en un periodo de tiempo establecido a una temperatura constante, este proceso se culmina sacando las probetas del horno y dejándolas enfriar a temperatura ambiente.

Figura 4.

Proceso general de conformado de probetas.



Nota. Diagrama explicando el paso a paso del proceso de elaboración de probetas.

2.2 Proceso de obtención de la resina epoxi

La resina epoxi utilizada en el conformado de las probetas, es de carácter comercial distribuida por la compañía farmacéutica COLQUIMICOS, la cual corresponde a una resina de relleno vendida como kit Colrepox 6090A/1956B en la presentación de dos compuestos A:4kg / B: 0,800kg. En anexo 1 se encontrará la ficha técnica de la resina utilizada para este proyecto.

Se ha escogido la resina epoxi frente al poliéster, por sus mejoras resistentes completamente la humedad. La resina epoxi tienen una gran capacidad para unir materiales de diferente naturaleza y ya curados. Las resinas polyester tienen un poder de adherencia más pobre. Las resinas epoxi de gran calidad tienen una resistencia de adherencia de 2.000 psi (13,8 MPa) frente a la resina polyester con 100 psi (0,7 MPa). [29]

El poliéster es un compuesto químico formado por largas cadenas de polímeros, que se han formado por reacción de la condensación. Estos se conocen como polímeros de condensación, y al proceso, como polimerización por condensación. Las resinas epoxi tienen enlaces insaturados que hacen que su estructura sea flexible.[30]

La obtención de esta resina se compone de dos partes principales, cadenas largas de polímero bisfenol A y moléculas de epichlorhidrina, y las moléculas de poliamina que une estas cadenas de polímero en una lámina en forma de red. Cuando se mezclan, el endurecimiento o “curado” que es realmente la amina múltiples (-NH₂) grupos de las poliaminas rompiendo el epichlorhydrins trigular epoxi (C-C-O) para formar un enlace de carbono nitrógeno. [31]

Figura 5.

Kit Colrepox 6090A/1956B dos compuestos A: 4kg / B: 0,800kg.



Nota. Resina epoxica de dos componentes del laboratorio Colquimicos.

2.3 Proceso de obtención del ripio

Se es consciente de que en la actualidad existe una abrumadora normativa en el campo ambiental, pero en determinadas circunstancias el derecho como instrumento de movilidad y progreso social debe entrar a normalizar ciertas conductas que resultan nocivas para el cuerpo social. Para el caso en estudio, aunque la llanta usada no es considerada un residuo peligroso, se estima pertinente que se le dé un tratamiento especial teniendo en cuenta su magnitud. [32]

En el marco legal existen diferentes leyes y decretos que se tienen que efectuar para el correcto manejo de este desecho, entre ellos se encuentran; Ley 23 de 1973 Mediante la cual se faculta al Gobierno Nacional para expedir el CRN, Decreto Ley 2811 de 1975 Código de Recursos Naturales, Ley 9 de 1979 Código Único Sanitario Nacional, Ley 99 de 1993 Ley del Medio Ambiente, Ley 142 de 1994 Servicios Públicos Domiciliarios, Decreto 948 de 1995 Marco de las acciones y mecanismos administrativos de las autoridades ambientales para preservar el Aire y Decreto 979 de 2006 Norma de Calidad del Aire. [33] Estos permitiendo el adecuado manejo y disposición final de las llantas usadas.

El ripio de llanta empleado en la fabricación de las probetas es de tipo comercial y distribuido por la empresa RECICLAIR, el empleado para el conformado de las probetas es de granulometría 400 micrones – 74 micrones y 2.5mm – 5mm. En el proceso de transformación por trituración mecánica las llantas se someten a diferentes etapas de transformación, constituidos principalmente por trituradoras y molinos. El producto final de este proceso de reciclaje es el ripio de llanta en diferentes tamaños de grano dependiendo de la aplicación o uso que se le brinda.

A continuación se presentas las figuras 5 y 6 con el fin de mostrar el tamaño de grano usado para la conformación de las probetas.

Figura 6.

Ripio tamaño 400 micrones – 74 micrones.



Nota. Polvo de llanta.

Figura 7.

Ripio tamaño 2.5mm – 5mm.



Nota. Llanta triturada.

El proceso de triturado de la llanta comprende diferentes niveles; en la trituración primaria se realiza con una cortadora rotativa y un criba de disco con retorno del grano grueso, la cortadora rotativa es potente, y diseñada para el troceado de neumáticos usados. La trituración secundaria es donde se reducen aún más los trozos transportados por un cinta, en esta sección se reducen a 50mm. La sección de granulado consta de eficientes granuladores y dos segmentos de corte paralelos donde obtenemos gránulos de tamaño de 22mm a 15mm.

Se procede a la separación de metales, en esta etapa se separa el 99% del acero presente en las llantas, es removido por medio de un separador magnético el cual cuenta con una banda transportadora que se ocupa de conducir el metal a un punto de recolección.

El proceso de pulverización cuenta con 2 molinos de refinación que una vez molidos los granos caen en una banda transportadora, de aquí se obtienen los gránulos con un diámetro 0,5mm a 3mm. Después de la separación de metales si el material granulado (granos de tamaño 0-20mm) no contiene materia textil, este es conducido por medio de una banda transportadora a un cernido rotativo el cual se encarga de seleccionar los granos en diferentes grupos (según su tamaño).

2.4 Elaboración de la mezcla para la matriz

Para el uso adecuado de la resina epoxi, se encuentra una norma técnica colombiana NTC 2836. Esta norma establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben someterse las resinas epóxicas empleadas en la industria de las pinturas, obtenidas a partir de la epiclorigidrina y el bisfenol A. [34]

Para el proceso de elaboración de la mezcla para la matriz, se utilizó resina epoxica COLREPOX la cual requiere ser aplicada en proporción 3:1, lo que significa que al momento de realizar la preparación de la misma y después de su previo homogenizado de cada parte de la resina por individual y mediante el agitado de ambos productos, se procede a incorporar en un recipiente 3 partes de resina por una de catalizador, componente B

Después la obtención de la mezcla de la resina lista, se procede a escoger el tipo de ripio que se requiere para realizar la probeta. Las probetas a realizar están propuestas con ciertos parámetros de proporción y tamaño de ripio. Se realizaron las probetas con los siguientes parámetros; 50% ripio-50%resina, 70%resina-30%ripio y 30%resina-70%ripio. Se mezcló cada proporción y se homogenizo con el fin de llevar la mezcla a los moldes y dejar secar. Para cumplir con los parámetros propuestos para el conformado de la matriz, se procede a medir el volumen de los moldes, para sacar el total del gramaje de la mezcla a realizar. Se tiene 2 tipos de tamaño de ripio 2.5mm – 5mm y otro de menor tamaño 400 micrones – 74 micrones, estos 2 tipos de ripio se mezclados y pesados en igual proporción. La resina epoxi se pesó y mezclo según el gramaje y proporción correspondiente según la ficha técnica anexada, se homogeniza la proporción de ripio y resina y se añade al molde.

La mezcla de la proporción de ripio tiene como finalidad generar diferentes visualizaciones morfológicas, como también análisis a los diferentes ensayos realizados. En los antecedentes implementan la mezcla con solo un tipo de ripio, nosotros buscamos generar variedad en los estudios y ensayos, para así ampliar la perspectiva de las aplicaciones posibles para el material compuesto.

Figura 8.

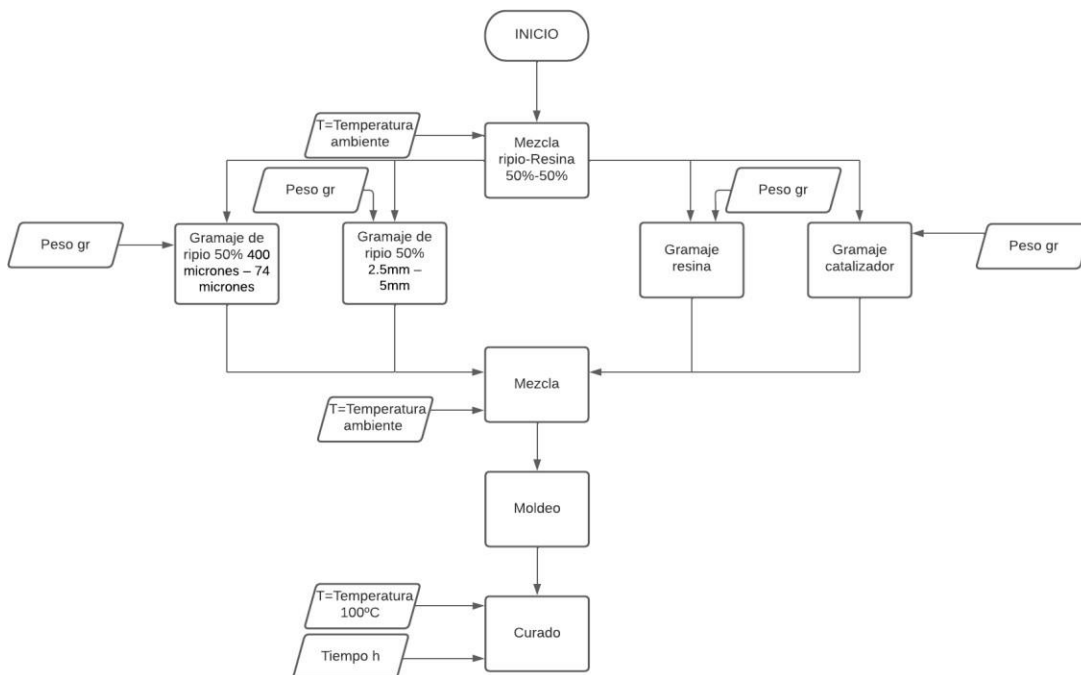
Mezcla resina-ripio.



Nota. Resina epoxi combinada con ripio de llanta.

Figura 9.

Proceso de elaboración probetas 50% ripio, 50% resina.

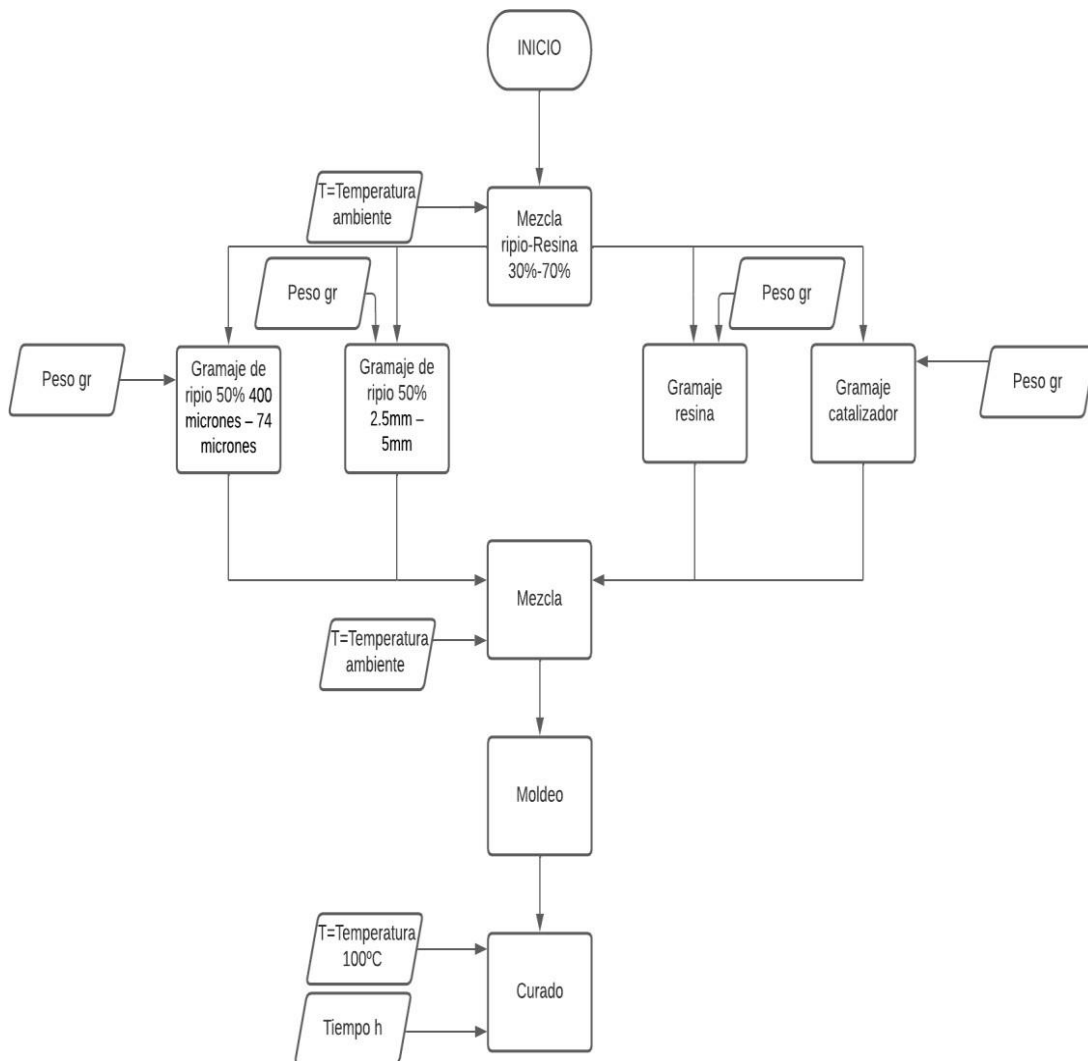


Nota. Diagrama dando explicación del proceso de conformado probetas 50%-50%.

Para el proceso de conformado de las mezclas se midió el gramaje de cada tipo de ripio y resina requerida para la conformación de un total de 100% por cada mezcla, donde el 25% es ripio de tamaño 2.5mm – 5mm, el otro 25% es de tamaño 400 micrones – 74 micrones que conforman la mitad de la mezcla, y su parte restante está conformado por resina y catalizador ,80% resina y 20% catalizador, llevados a términos 40% resina y 10% catalizador, para la proporción 50%-50%.

Figura 10.

Proceso de elaboración probetas 30% ripio, 70% resina.

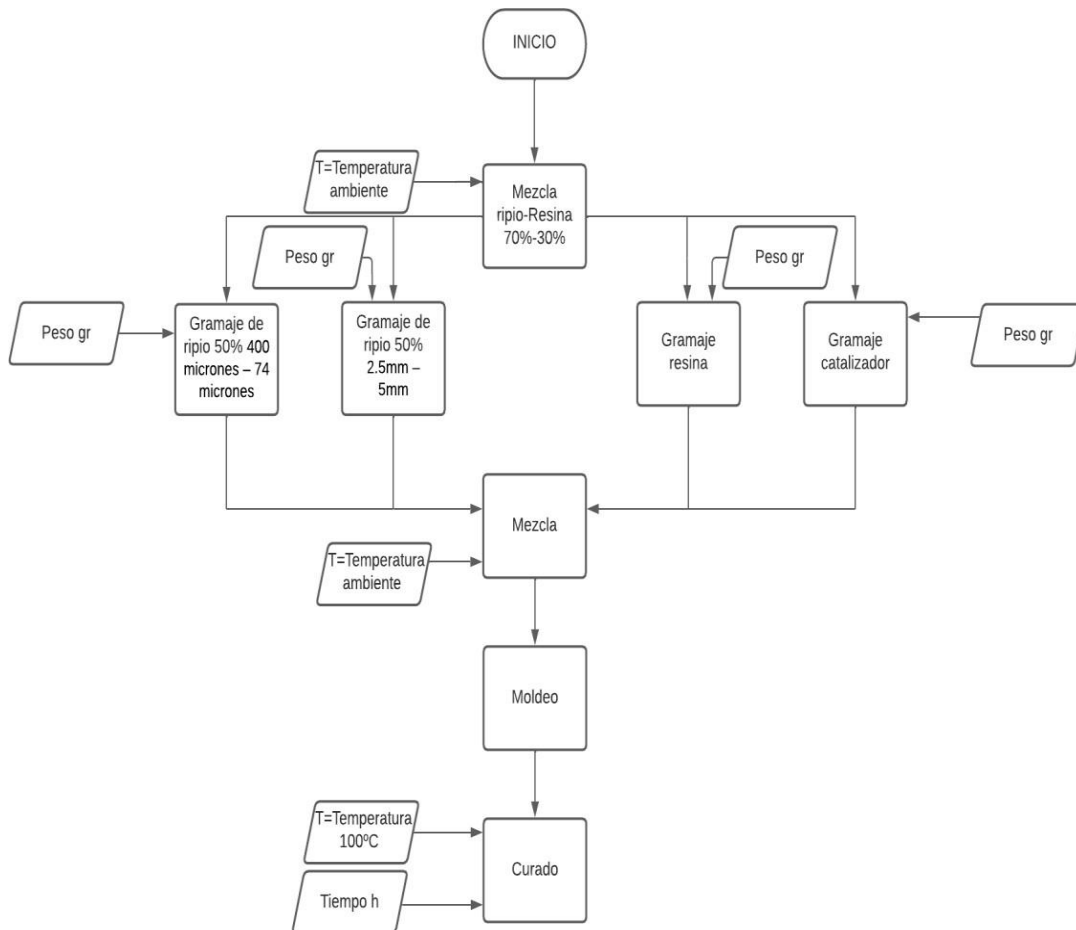


Nota. Diagrama dando explicación del proceso de conformado probetas 30%-70%.

Para el proceso de conformado de la mezcla 70% resina y 30% ripio, se empieza midiendo el gramaje de cada tipo de ripio y resina requerida para la conformación de un total de 100% por cada mezcla, donde el 15% es ripio de tamaño 2.5mm – 5mm, el otro 15% es de tamaño 400 micrones – 74 micrones que conforman la mitad el 30% de la mezcla, y su parte restante está conformado por resina y catalizador ,56% resina y 14% catalizador, para un total de 70%, conformando así el 100% de la mezcla.

Figura 11.

Proceso de elaboración probetas 70% ripio, 30% resina.



Nota. Diagrama dando explicación del proceso de conformado probetas 70%-30%.

Para el proceso de conformado de la mezcla 30% resina y 70% ripio, se empieza midiendo el gramaje de cada tipo de ripio y resina requerida para la conformación de un total de 100% por cada mezcla, donde el 35% es ripio de tamaño 2.5mm – 5mm, el otro 35% es de tamaño 400 micrones – 74 micrones que conforman la mitad el 70% de la mezcla, y su parte restante está conformado por resina y catalizador ,24% resina y 6% catalizador, para un total de 30%, conformando así el 100% de la mezcla.

De allí, pasa a ser una mezcla homogénea con el fin de ser llevado al moldeo que tiene unas medidas acorde a las normas ASTM D3039/D3039M para el ensayo a tensión y ASTM D7264/D7264M para el ensayo a flexión.

Figura 12.

*Molde con normas ASTM
D3039/D3039M y ASTM
D7264/D7264M.*



Nota. Molde fabricado según normas para respectivos ensayos a tensión ya flexión.

El molde fue mecanizado mediante el proceso de fresado en una lámina de acero de alto carbono, con el fin de brindarle estructura a la probeta en el proceso de secado de la mezcla. Dentro del mecanizado se incluyó un ángulo de desmoldeo equivalente a un grado (1°) a todos los perfiles del molde, considerando la tolerancia aceptada por la geometría establecida por las normas ASTM D3039/D3039M para el ensayo a tensión y ASTM D7264/D7264M para el ensayo a flexión.

Figura 13.

Molde con probetas 50%resina-50% ripio.



Nota. Molde con probetas según normas para respectivos ensayos a tensión ya flexión.

Previo al proceso de desmoldeo tenemos las probetas endurecidas, incorporadas al molde. Antes de agregar la mezcla al molde, se le aplicó una fina capa de cera siliconada con el fin de no generar adherencia de la mezcla al molde, evitando de esta forma que fragmentos de la probeta queden en el molde.

Antes de realizar el curado, las probetas recién desmoldadas deben atravesar un proceso de alistamiento donde mediante herramientas de arranque en viruta como lo son un mototool, un esmeril y un taladro, con el fin de retirar rebabas, excesos de material y otorgarle un acabado final a la probeta finalizando este proceso, se someten las probetas a un curado mediante el cual se busca terminar el secado interno de las probetas y otorgarle su estructura cristalina final.

El tiempo de curado correspondió a 10 horas de temperatura constante de 100°C, acompañado de 2 horas de enfriamiento donde se lleva la temperatura de la probeta de 100°C a acercarla dentro del horno a temperatura ambiente, la temperatura dentro del horno es monitoreada por un lector de temperatura acoplado a una termocupla tipo K. El horno empleado corresponde a un equipo utilizado en procesos de tratamientos térmicos, siendo este de carácter resistivo con una capacidad de temperatura de hasta 500°C y volumétrica de 50x30x20cm garantizando el correcto acople a las dimensiones y requerimientos de las probetas.

Figura 14.

Probetas con alistamiento.




Nota. Probetas en diferentes proporciones listas para los diferentes ensayos.

Tabla 1.

Condiciones de operación y equipos del proceso.

EQUIPO/MATERIAL	CONDICIONES DE OPERACIÓN	IMAGEN
Horno de tratamientos térmicos	Curado T=90°C a 110°C Tiempo de operación de 12h	
Balanza de precisión	Gramaje (gr) Temperatura ambiente	
Molde	Temperatura ambiente. Normas ASTM	

Termocupla tipo K	Curado T=90°C a 110°C Tiempo de operación de 12h	
Lector electrónico de temperatura	Curado T=90°C a 110°C Tiempo de operación de 12h	

Nota. Equipos empleados para la elaboración de las probetas en diferentes proporciones.



3. DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS EN LAS MUESTRAS DEL MATERIAL COMPUESTO, REALIZANDO ENSAYOS DE TENSIÓN, FLEXIÓN Y EXPANSIÓN TÉRMICA EN LAS PROBETAS, PARA SU RESPECTIVO ANÁLISIS

Para este objetivo se buscó establecer las propiedades mecánicas del material polimérico a estudiar, con ensayos de tensión, flexión, y dilatación térmica, esta última realizada en baños de agua diferentes temperaturas también incorporando tiempos preestablecidos, estas pruebas se realizaron con probetas de diferentes proporciones y geometrías, como en el caso de los ensayos a tensión y flexión donde dichas geometrías fueron tomadas de las normas ASTM D3039/D3039M para el ensayo a tensión y ASTM D7264/D7264M para el ensayo a flexión, encontrando las ya mencionadas normas en los anexos 2 Y 3. Dentro de las proporciones se utilizaron probetas 50% ripio-50% resina epoxi y 30%ripio-70%resina epoxi que fueron conformadas con el fin de realizar estos estudios.

Para el ensayo de tensión de las probetas conformadas con las geometrías y proporciones previamente mencionadas, para este ensayo se cuentan con cinco de ellas, dos en proporción 50% ripio-50% resina epoxi, dos en 30%ripio-70%resina epoxi, dos de cada proporción para realizar una probabilidad de resultados sobre los ensayos y una de solo resina epoxi llamada “Blanco” para observar el comportamiento del material sin ripio, la misma cantidad de probetas en mismas proporciones y considerando la norma son requeridas para el ensayo a flexión. Al tener la totalidad de las probetas por ensayo conformadas bajo los parámetros mencionados, se procedió a realizar los ensayos.

Tabla 2.

Condiciones de operación y equipos del proceso.

ENSAYO DE TENSION Y FELXION		
EQUIPO/MATERIAL	CONDICIONES DE OPERACIÓN	IMAGEN
Maquina universal de ensayos	Temperatura ambiente.	
Computador	Software Saturn Plus	




Nota. Equipos empleados para realizar el ensayo a tensión y flexión.

Las pruebas fueron realizadas en servicio nacional de aprendizaje SENA en el centro para la industria de la comunicación gráfica laboratorio de pruebas y ensayos, buscando que los ensayos realizados estén certificados y posean alta calidad en sus resultados.

Para el ensayo térmico se utilizaron dos probetas de las mismas proporciones utilizadas en los anteriores ensayos, donde inicialmente se midieron, también en cada rango de temperatura.

Para esta prueba se utilizaron ciertas condiciones y equipos para el proceso.

Tabla 3.*Condiciones de operación y equipos del proceso.*

ENSAYO DE DILATACION TERMICA		
EQUIPO/MATERIAL	CONDICIONES DE OPERACIÓN	IMAGEN
Bañador térmico	Temperatura: 20°C a 100°C	
Calibrador pie de rey	Medida en mm	
Cronometro	Tiempo: 10min	

Nota. Equipos empleados para el ensayo de dilatación térmica.

La temperatura en este ensayo es monitoreada por un termómetro incorporado en el equipo de baño térmico, por medio del cual se realiza la toma de datos en los tiempos establecido para este ensayo.

3.1 Ensayo a tensión

Para este ensayo se tomaron cinco probetas y fueron colocadas una a una en las mordazas de la máquina universal de ensayos configurada para esta prueba mediante la norma ASTM D3039/D3039M que dicta los parámetros de configuración de este equipo para la correcta obtención de datos, donde van a ser reflejados en el computador con un software compatible con la maquina en forma de gráficos de curvas de esfuerzo vs deformación. En la tabla 4, se presentas los resultados del ensayo a tensión en las probetas.

Tabla 4.

Resultados ensayo tensión.

IDENTIFICACION DE LA PROBETA	VELOCIDAD DEL ENSAYO (mm/mm)	LONGITUD ENTRE MORDAZAS (mm)	ANCHO (mm)	CALIBRE (mm)	RESISTENCIA A LA TENSION (KN/m)	ELOGANCION (%)	CARGA MAXIMA (N)
Blanco	250	246	30,25	4,891	7,926	3,218	239,757
70%-30% (1)	250	246	29,45	5,311	6,789	0,508	199,922
70%-30% (2)	250	246	29,65	4,442	9,717	2,371	288,105
50%-50% (1)	250	246	29,25	6,376	6,457	0,508	188,865
50%-50% (2)	250	246	30,35	6,091	5,817	0,508	176,536

Nota. Resultados de tención para cada una de las probetas.

En la tabla 4 se pueden observar los resultados obtenidos del ensayo a tensión donde se aprecia, que la probetas 70%-30% (2) arrojan mejores resultados de carga máxima de 288,105N y resistencia a la tensión de 9,717KN/m, con un resultado de elongación de 2,371% que está por debajo del Blanco con un valor de 3,218%, pero de igual forma presentando los mejores valores de esfuerzo a la tensión. la probeta 70%-30% (1) obtuvo valores de resistencia a la tensión de 6,789KN/m, elongación de 0,508% y carga máxima de 199,922N estando por debajo de la probeta Blanco en todos sus valores, esto posiblemente afectado por el calibre que posee un valor de 5,311mm y el ancho teniendo 29,45mm de esta probeta en comparación con la 70%-30% (2). las probetas proporción 50%-50% no presentaron variación en sus valores de elongación que fueron de 0,508% para las dos, pero la probeta 50%-50% (1) presenta valores

más altos carga máxima con 188,865N y resistencia a la tensión de 6,457KN/m, comparados con valores de 176,536N carga máxima y 5,817KN/m de la probeta 50%-50% (2) esta variación de datos puede ser presentada ya que con respecto con la probeta 50%-50% (1) se presenta variaciones en su calibre con un valor de 6,091mm y un ancho de 30,35mm comparados con 6,376mm calibre y 29,25mm de ancho presentados por la probeta 50%-50% (2), todo estos datos teniendo en cuenta que las probetas fueron elaboradas con diferentes tamaños de ripio esto alterando su comportamiento interno, y siendo todos los datos comparados con la probeta llamada “Blanco” la cual muestra un comportamiento natural de la resina a estas condiciones, además en el ensayo realizado el Blanco es la probeta que posee el mejor comportamiento de la elongación, lo que significa que posee mejor resistencia a la rotura, seguida por la probeta 70%-30% (2) que en conjunto con su resistencia a la tensión y carga máxima hacen que sobresalga como material de entre las demás.

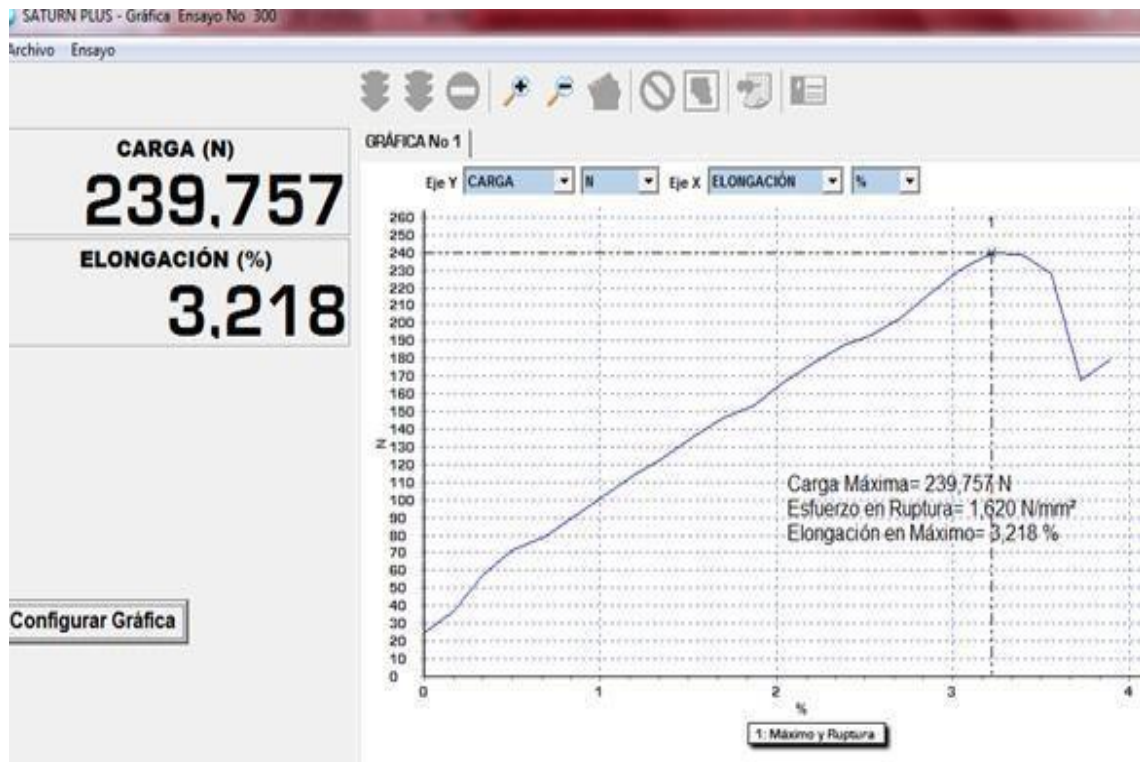
A continuación, se da registro de las gráficas esfuerzo vs deformación arrojadas por el ensayo a tensión.

Los ensayos de tensión realizados por el Centro Nacional de Aprendizaje SENA, presentaron una anomalía a la hora de cuantificar la gráfica por el software de la maquina universal del ensayo, evidenciando en las gráficas esfuerzo vs deformación un inicio después de cero, esto con una posible causa de presentar un deslizamiento del material en las mordazas de la máquina, teniendo en cuenta que no se estuvo presente en el laboratorio en la realización de las pruebas.

A continuación, se presenta la figura 15 que ilustra mediante una gráfica de esfuerzo deformación el comportamiento a tensión de la probeta Blanco.

Figura 15.

Grafica esfuerzo vs deformación blanco.



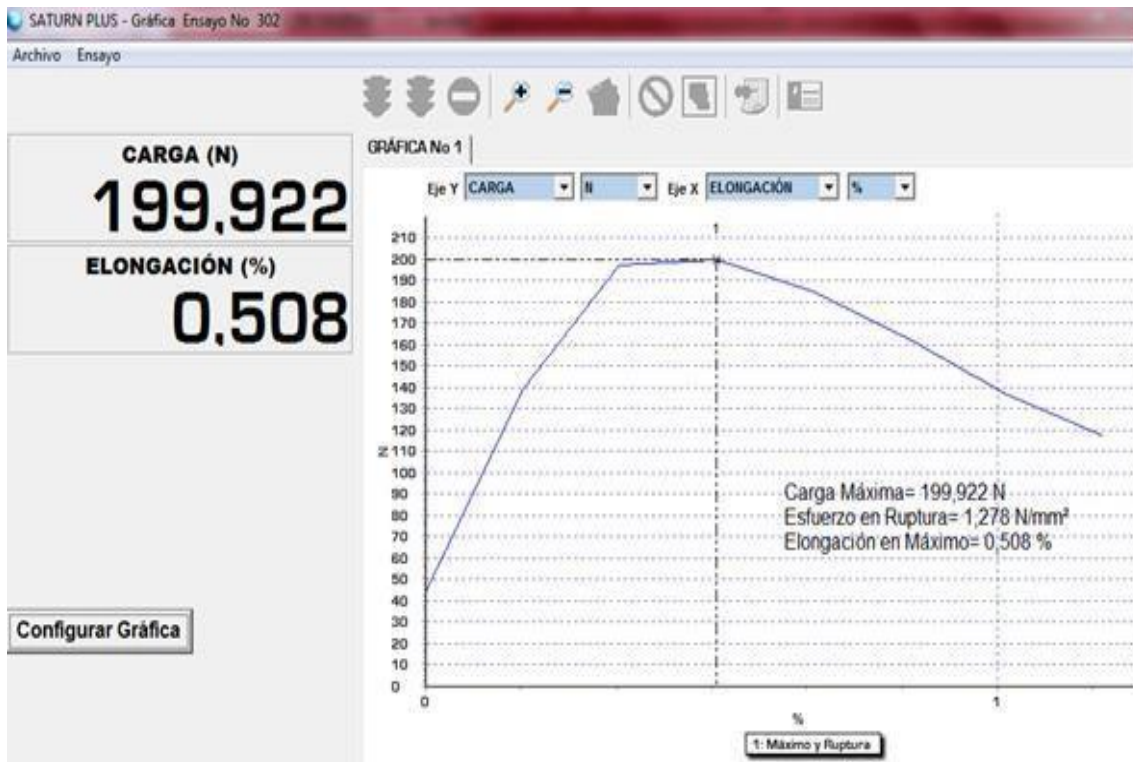
Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta Blanco brindada por el software SATURN PLUS.

En la figura 15 se encuentran los datos del ensayo realizado a la probeta blanco, también encontrados en la tabla 4, pero donde mediante un análisis de grafica encontramos que el límite de proporcionalidad, limite elástico, y esfuerzo de fluencia no son fragmentos que se puedan apreciar con claridad, mientras que su esfuerzo ultimo y esfuerzo de fractura se encuentran muy marcados en la gráfica, también mostrando una sección elástica y plástica irregular.

Podemos concluir con esta grafica que la resina epoxi tiene tendencia a comportarse como un material no elástico. La figura 16, nos muestra la gráfica de esfuerzo vs deformación de la probeta con proporción 70%-30% (1).

Figura 16.

Grafica esfuerzo vs deformación 70%-30% (1).

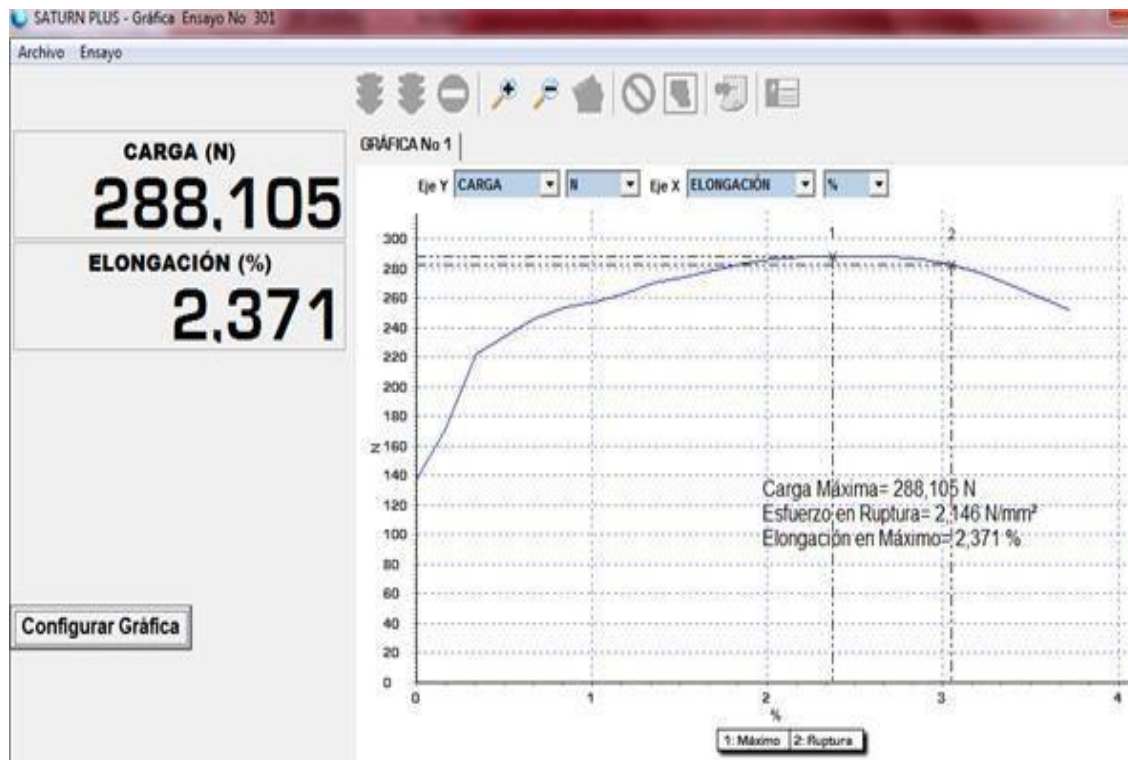


Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta 70%-30% (1) brindada por el software SATURN PLUS.

En la figura 16, podemos encontrar la gráfica de la probeta en proporción 70%-30%, con una carga máxima de 199,922N y una elongación de 0,508%. Donde se aprecia límite de proporcionalidad en su primera sección donde el material tiene tendencia oponerse a la deformación buscando recobrar su estado inicial, continuando con su límite elástico donde el material sigue oponiéndose al esfuerzo y limite a fluencia donde la probeta ya perdió la propiedad de elasticidad marcado en la gráfica, de este punto parte a su esfuerzo ultimo y esfuerzo de fractura. Obteniendo zonas elásticas y plásticas muy demarcadas en la gráfica. La proporcionalidad de esta probeta, nos muestra que el ripio de llanta le brinda a la resina elasticidad comportándose de forma más elástica que en la figura 15. La figura 17 es la gráfica de la proporción 70%-30% de la probeta (2).

Figura 17.

Grafica esfuerzo vs deformación 70%-30% (2).



Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta 70%-30% (2) brindada por el software SATURN PLUS.

De la figura 17, podemos encontrar la gráfica de la probeta en proporción 70%-30%, con una carga máxima de 288,105N y una elongación de 2,371% la cual obtuvo los mejores resultados en el ensayo a tensión.

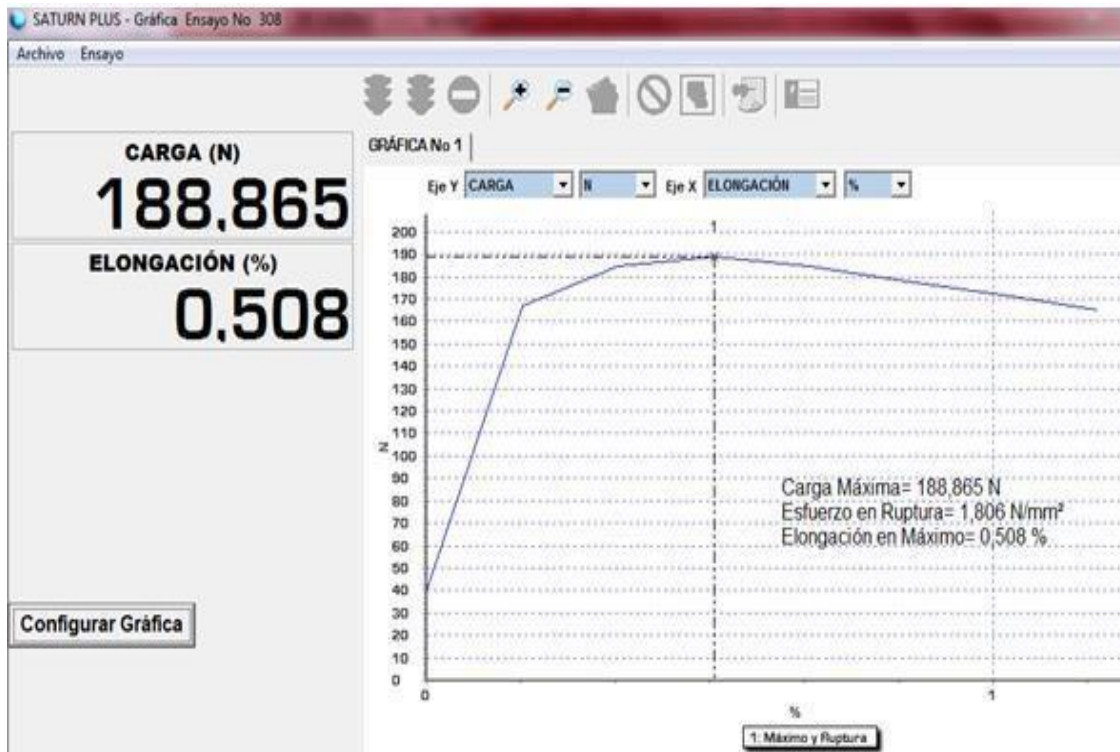
La diferencia entre la figura 16 y 17 es que en esta figura podemos observar cada segmento de la gráfica bien marcado, como la región elástica y la región plástica. En la zona de la gráfica bajo la curva, encontramos marcadas la zona elástica que es donde la probeta se comporta elásticamente, zona de cedencia se presenta justo después al punto de fluencia, en esta zona la probeta experimenta una deformación permanente plástica con un esfuerzo constante, la zona de endurecimiento siendo el punto en el que es necesario aumentar el esfuerzo para presentar una deformación y al mismo tiempo un endurecimiento y por último la zona de estricción que

comprende desde el punto máximo hasta el punto de esfuerzo de rotura.

A continuación, se presenta la figura 18 con la gráfica de la proporción 50%-50% de la probeta (1)

Figura 18.

Gráfica esfuerzo vs deformación 50%-50% (1).



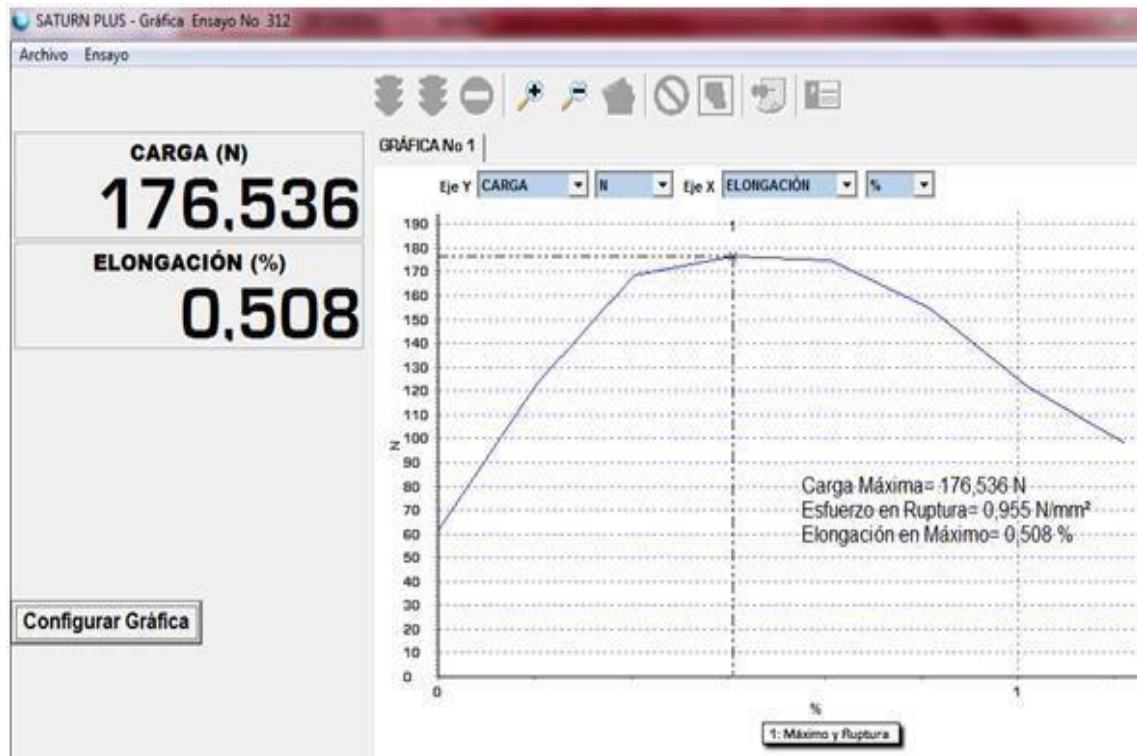
Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta 50%-50% (1) brindada por el software SATURN PLUS.

De la figura 18 podemos analizar un comportamiento de un material más elástico en comparación las probetas de la proporción 70%-30%, presente en la sección de la zona elástica de la gráfica, donde el límite de proporcionalidad, límite elástico, y hasta el punto de fluencia se encuentran bien marcados en la gráfica, también con puntos notables de su zona plástica como el punto de carga máxima y esfuerzo de fractura presentando los valores

de carga máxima y elongación 188,865N y 0,508% respectivamente. Este comportamiento se presenta por la proporcionalidad con la cual se elaboró la probeta, tendiendo dos partes iguales de ripio y resina epoxi. La figura 19 es la gráfica de la proporción 50%-50% de la probeta (2)

Figura 19.

Gráfica esfuerzo vs deformación 50%-50% (2).



Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta 50%-50% (2) brindada por el software SATURN PLUS.

La figura 19 muestra la gráfica de proporción 50%-50% presentando una carga máxima de 176,536N y una elongación de 0,508%, mismo valor de elongación obtenido por la probeta 50%-50%(1), dentro del gráfico y en comparación con la figura 18 encontramos zonas plásticas y elásticas bien marcadas, pero sus puntos de sección en la grafica como el límite de proporcionalidad, limite elástico, el punto de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de fractura no se presentan de una forma tan clara como en la figura anterior. Estos resultados de igual forma siendo diferentes a las otras proporciones de ripio y resina epoxi utilizadas para la

elaboración de las probetas.

En las figuras de esfuerzo vs deformación se encuentran comportamientos más lineales para los resultados de las probetas en proporciones 50%-50% antes de llegar a punto de carga máxima en comparación con los resultados de las probetas de proporción 70%-30% arrojando estos valores más altos de esfuerzos de ruptura, incluso estos valores comparados con la prueba realizada para el Blanco.

A continuación, se encuentra la tabla 5 donde están presentes los resultados de dureza.

Tabla 5.

Resultados dureza.

IDENTIFICACION DE LA PROBETA	DUREZA POR PENETRACION (INDENTACION) MEDIANTE DUROMETRO (DUREZA SHORE A)
Blanco	89,7
70%-30% (1)	92,4
70%-30% (2)	93,5
50%-50% (1)	90,4
50%-50% (2)	90,2

Nota. Resultados de dureza para cada una de las probetas.

En la tabla 5 se muestran los resultados de dureza donde se puede apreciar que en comparación con el Blanco con un valor de 89,7 SHORE A en la escala de dureza, en las demás probetas en sus dos diferentes proporciones presentan una mayor dureza, las probetas de proporción 70%-30% tienen mejores resultados la probeta 70%-30% (1) con un valor 92,4 SHORE A por debajo de la 70%-30% (2) que obtuvo el valor más alto con 93,5 SHORE A y siendo comparadas la proporción 50%-50% siendo estas probetas las de menor dureza, con 50%-50% (1) de un valor de 90,4 SHORE A y la probeta 50%-50% (2) con un valor de 90,2 SHORE A, teniendo una diferencia baja entre estas dos últimas probetas.

Para la proporción 70%-30% podemos concluir que la capacidad del material para resistir la deformación plástica, [35] en este caso por indentación es debido a la combinación de resina

epoxi con un bajo porcentaje de ripio en su elaboración, al incrementar el porcentaje de ripio igualándolo al de la probeta 50%-50% pierde dureza evidenciándolo en los resultados obtenidos en el ensayo.

Las probetas fueron comparadas con el material PP (polipropileno) del cual tenemos un valor de carga máxima de 1005,75N [36] y una elongación de 9,63% [36] esto comparado con las probetas de diferente proporción como la de 70%-30% (2) la cual obtuvo un valor de carga máxima de 288,105N y una elongación de 2,371% y la probeta de proporción 50%-50% (1) que obtuvo una carga máxima de 188,865N y una elongación de 0,508%. Siendo estas las de mejor comportamiento de tensión en su respectiva proporción.

Ya comparadas con el PP (polipropileno), podemos encontrar diferencias en la capacidad de carga ya que el PP cuenta con un valor mayor de carga máxima que el de las dos probetas 70%-30% y 50%-50% y un valor de elongación con mayor porcentaje de deformación que con las probetas comparadas.

3.2 Ensayo a la flexión

En este ensayo se cuenta con cinco probetas que fueron puestas una a una en los apoyos de la maquina universal de ensayos que previamente debe estar configurada bajo la norma ASTM D7264/D7264M con una modificación en los rodillos de aplicación de carga y apoyos inferiores, usando diámetros de rodillos de 12,7 mm y de apoyos en 19,05 mm, dictando de esta forma los parámetros de configuración de este equipo para la correcta obtención de datos.

Los datos que se obtienen de este ensayo se muestran en la gráfica esfuerzo vs deformación brindada por el software compatible con la máquina.

Tabla 6.

Resultados ensayo a flexión.

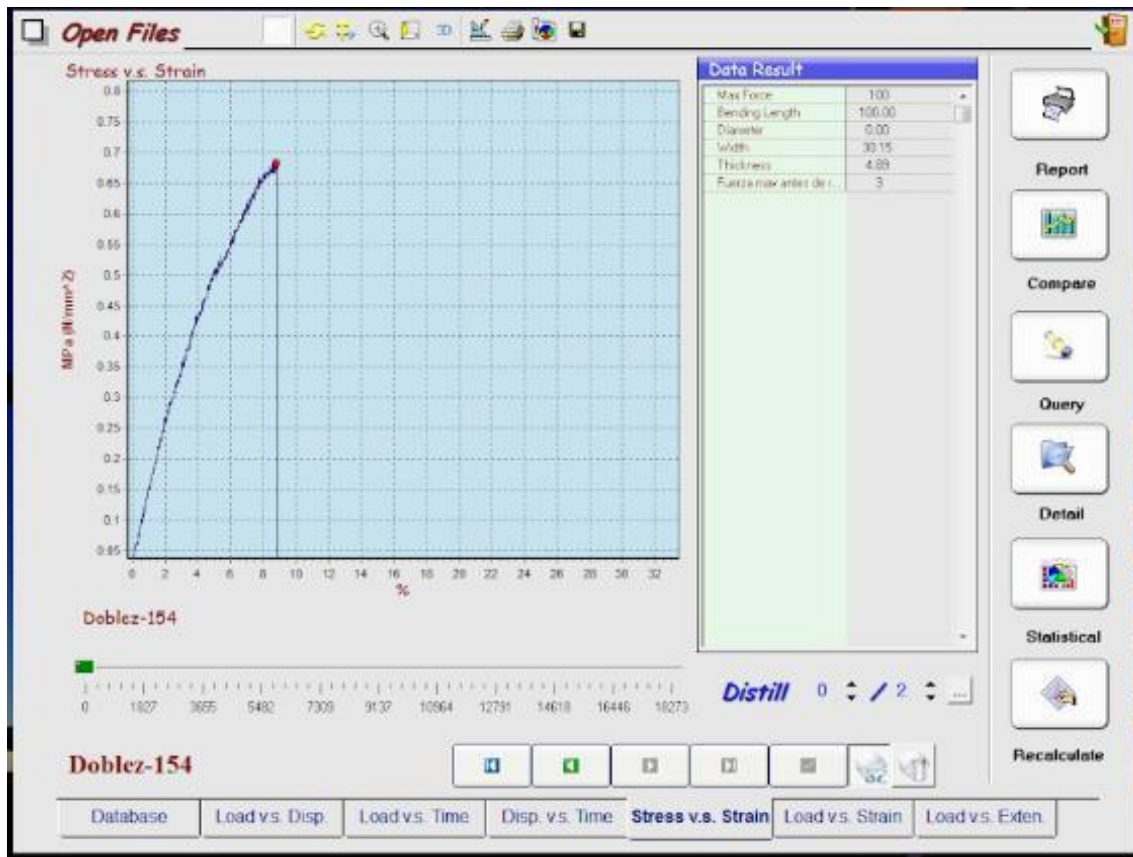
IDENTIFICACION DE LA PROBETA	CARGA MAXIMA EN (N)
Blanco	100
70%-30% (1)	28
70%-30% (2)	35
50%-50% (1)	22
50%-50% (2)	31

Nota. Resultados de flexión para cada una de las probetas.

En la tabla 6 se observan los resultados del ensayo a flexión donde se puede apreciar que el mejor resultado entre todas las pruebas lo obtuvo el Blanco que está fabricado con solamente resina epoxi y dentro de las probetas con diferentes proporciones apreciamos que las elaboradas en proporción 70%-30% son las que mejores resultados tuvieron, debido a que en su elaboración es mayor la proporción de resina que la de ripio por ello obtiene mejores propiedades a la flexión. A continuación, se presentan las figuras 20 y 21 con los resultados del ensayo a flexión realizado al blanco con su respectivo montaje.

Figura 20.

Grafica esfuerzo deformación Blanco.



Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta Blanco brindada por el software SATURN PLUS.

Figura 21.

Ensayo a flexión Blanco.



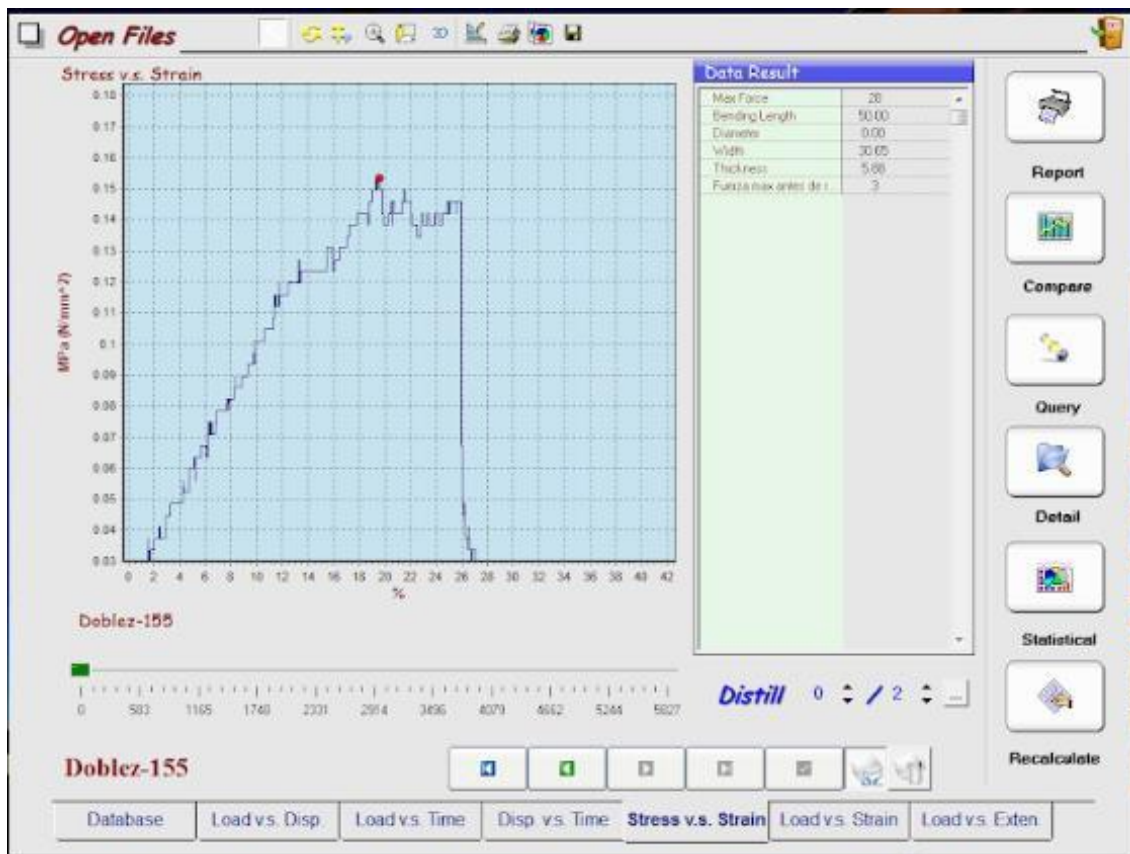
Nota. Montaje maquina universal de ensayos.

En la figura 20 se muestra la gráfica donde se aprecian los resultados del ensayo para la probeta Blanco dando como resultado; resistencia máxima a la flexión de 0,68 MPa y una elongación de 8,9%. Evidenciando un comportamiento de un material rígido y antes de llegar a su punto de resistencia máxima, muestra un comportamiento fluctuante, y apreciando el montaje realizado en el ensayo en la figura 21.

En las siguientes figuras 22 y 23, se muestra la gráfica esfuerzo deformación 70%-30%. (1) y el montaje del ensayo a flexión 70%-30%. (1)

Figura 22.

Grafica esfuerzo deformación 70%-30%. (1).



Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta 70%-30% (1) brindada por el software SATURN PLUS.

Figura 23.

Ensayo a flexión 70%-30%. (1).



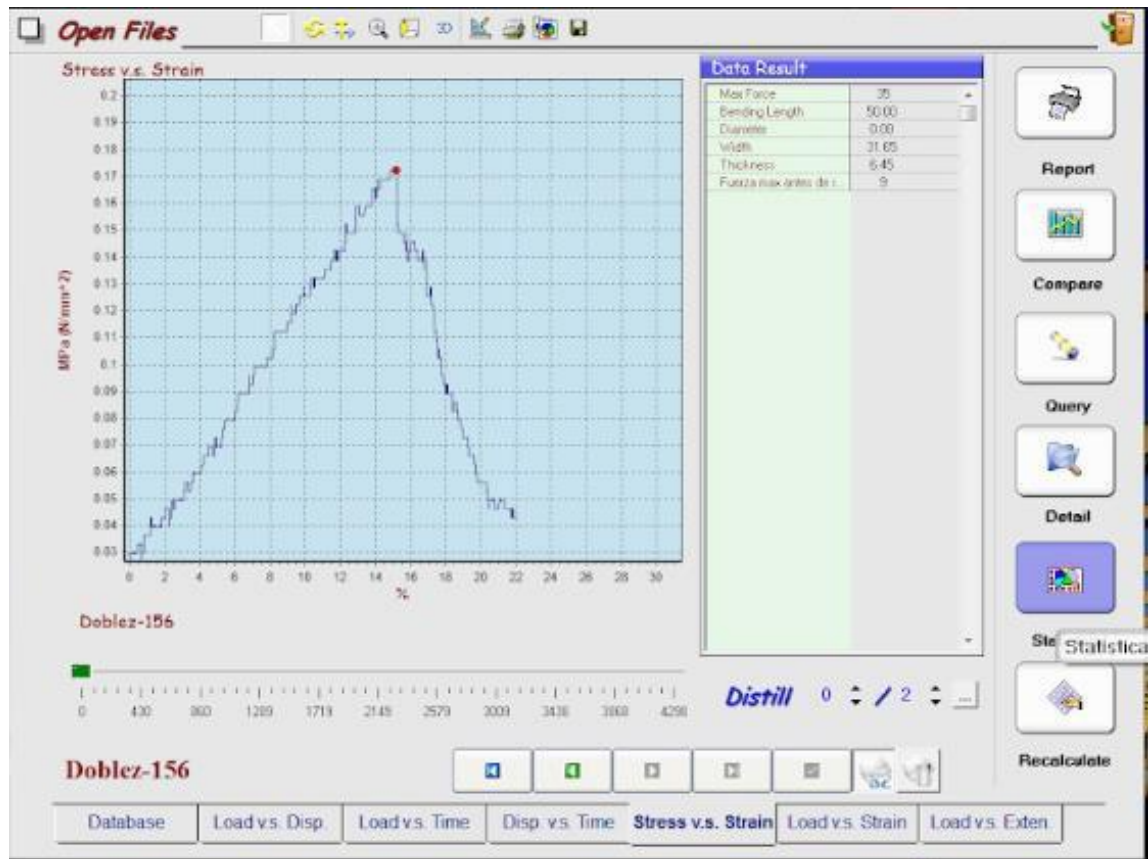
Nota. Montaje maquina universal de ensayos.

En la figura 22 se muestra la gráfica donde se aprecian los resultados del ensayo para la probeta 70%-30% (1) dando como resultado; resistencia máxima a la flexión de 0,154 MPa y una elongación de 19,5%. En la gráfica podemos ver los puntos de esfuerzo último y esfuerzo de fractura muy notorios aunque el comportamiento de la gráfica fue oscilante mostrando el comportamiento elástico del material. Se aprecia el montaje realizado en el ensayo en la figura 19.

En las siguientes figuras 24 y 25, se muestra la gráfica esfuerzo deformación 70%-30%. (2) y el montaje del ensayo a flexión 70%-30%. (2)

Figura 24.

Grafica esfuerzo deformación 70%-30%. (2).



Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta 70%-30% (2) brindada por el software SATURN PLUS.

Figura 25.

Ensayo a flexión 70%-30%. (2).



Nota. Montaje maquina universal de ensayos.

En la figura 24 se muestra la gráfica donde se aprecian los resultados del ensayo para la probeta 70%-30% (2) dando como resultado; resistencia máxima a la flexión de 0,173 MPa y una elongación de 15%. La grafica muestra un punto claro de esfuerzo último teniendo tendencia a la fluctuación antes y después del punto de esfuerzo último, por esta razón no se logra apreciar de forma clara el punto de esfuerzo de ruptura, teniendo como comportamiento un material elástico. Se aprecia el montaje realizado en el ensayo en la figura 21.

En la figura 26, se muestra la gráfica esfuerzo deformación 50%-50%. (1)

Figura 26.

Grafica esfuerzo deformación 50%-50%. (1).



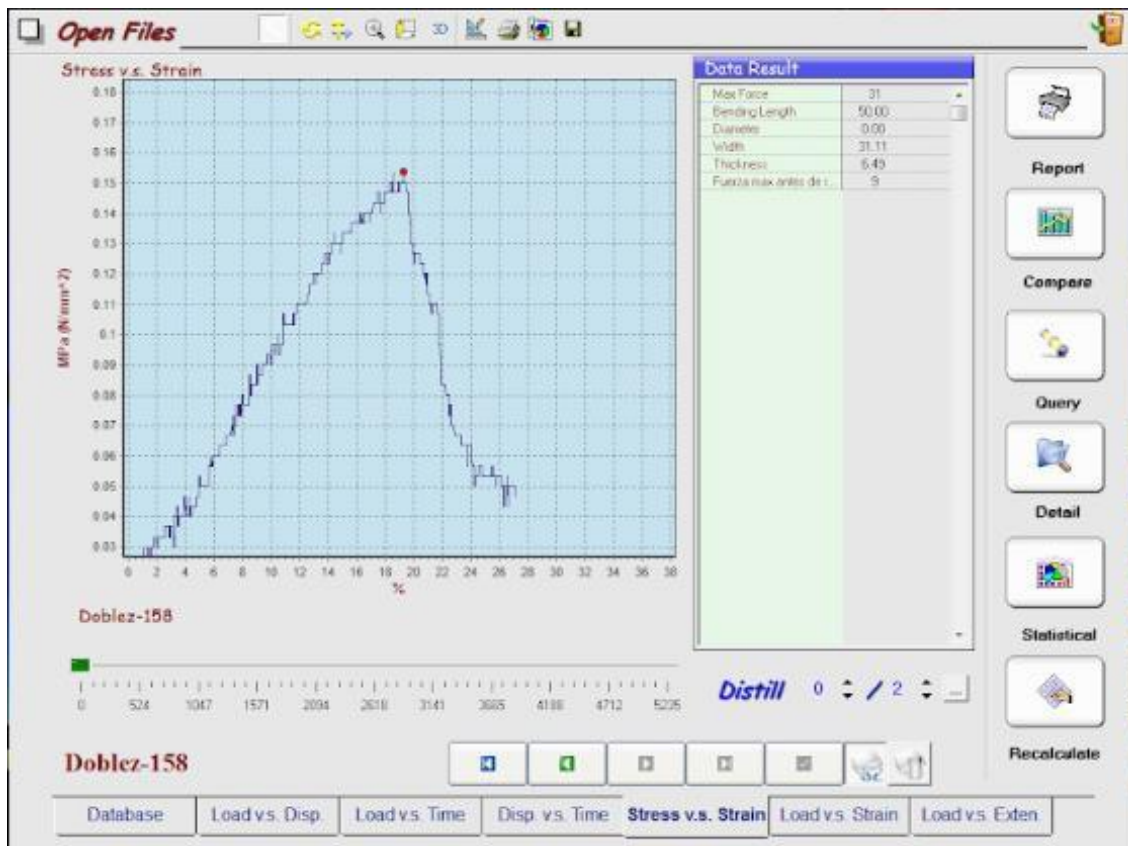
Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta 50%-50% (1) brindada por el software SATURN PLUS.

En la figura 22 se muestra la gráfica donde se aprecian los resultados del ensayo para la probeta 50%-50% (1) dando como resultado; resistencia máxima a la flexión de 21,8 N y un desplazamiento de 15,7mm. En la gráfica se aprecia claramente el punto de esfuerzo último, siendo poco claro el esfuerzo de fractura debido a un leve comportamiento oscilante al finalizar la gráfica, al inicio de la gráfica antes del punto de esfuerzo último se presenta mayor fluctuación pero debido a sus resultados de resistencia máxima y desplazamiento hay un comportamiento de un material de tendencia elástica.

En la siguiente figura 27, se muestra la gráfica esfuerzo deformación 50%-50%. (2).

Figura 27.

Gráfica esfuerzo deformación 50%-50%. (2).



Nota. Resultados de la gráfica esfuerzo vs deformación de la probeta 50%-50% (2) brindada por el software SATURN PLUS.

En la figura 27 se muestra la gráfica donde se aprecian los resultados del ensayo para la probeta 50%-50% (2) dando como resultado; resistencia máxima a la flexión de 0,155 MPa y una elongación de 19,5%. En la gráfica es claro un punto de esfuerzo último, aunque se presenta fluctuación continua y el punto de esfuerzo de fractura no es muy claro, mostrando los resultados de elongación y carga máxima con un comportamiento elástico.

De las anteriores gráficas y tablas obtenemos resultados de las 5 probetas puestas a ensayo, de las cuales podemos concluir que la probeta que tuvo resultados más altos fue la probeta llamada Blanco con un valor de carga de 100N, que está realizada con solo resina epoxi y curada a una temperatura de 100°C en un tiempo de residencia de 12h. Las siguientes probetas con valores altos de tensión y flexión son las probetas nombradas 70%resina epoxi-30%ripio de llanta tienes valores de 35N la probeta de proporción 70%-30 (2) con el mayor valor y 28N para la probeta de proporción 70%-30% (1), estas cuentan en su proporción con mayoría de resina epoxi que le brinda estas propiedades de rigidez, y el ripio en diferentes proporciones para así brindar variedad en la morfología y estructura interna del material.

Por último la probeta 50%resina epoxi-50%ripio de llanta (1) obtuvo un valor de 22N y la probeta 50%-50% (2) un valor de 31N, su proporción genera fallos en su estructura haciendo que pierda rigidez, gracias a su combinación de granulometría de ripio esto debido a que su estructura interna está compuesta por dos tamaños de ripio con diferencias entre ellos, generando posibles modos de falla que daba como consecuencia la fractura del material.

Las probetas fueron comparadas con el material PP (polipropileno) del cual tenemos un valor de carga máxima de 6010N [38] esto comparado con las probetas de diferente proporción como la de 70%-30% (2) la cual obtuvo un valor de carga máxima de 35N y la probeta de proporción 50%-50% (2) que obtuvo una carga máxima de 31N. Siendo estas las de mejor comportamiento de flexión en su respectiva proporción.

Ya comparadas con el PP (polipropileno), podemos encontrar diferencias en la capacidad de carga ya que el PP cuenta con un valor mayor de carga máxima que el de las dos probetas 70%-30% y 50%-50% siendo el PP un material con mejor comportamiento a la flexión con diferencia significativa al material compuesto elaborado.

3.3 Ensayo de expansión térmica

Para la realización de este ensayo se tomó como referencia la norma ISO 10545-8 haciendo una adaptación del ensayo de dilatación térmica lineal. Esta Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 10545-8 es una traducción idéntica de la Norma Internacional ISO 10545- 8:1994, define un método de ensayo para la determinación del coeficiente de dilatación lineal de origen térmico de las baldosas cerámicas. [39]

Para este ensayo se sometieron las probetas 70%resina epoxi-30% ripio de llanta y 50%resina epoxi-50%ripio de llanta de las diferentes proporciones que se manejaron a intervalos de 10min partiendo de 20°C incrementando de 10°C hasta llegar a 100°C y realizando medidas de volumen a las probetas en el transcurso de cada 10min, este ensayo está diseñado para el análisis térmico de fluidos pero en esta ocasión se adaptó para realizarlo con sólidos, en este caso con el material polimérico.

Para la realización de este ensayo se utilizó un bañador térmico, el cual estaba operando con agua como fluido de contacto con las probetas, este bañador cuenta con un termómetro incorporado en su estructura mediante el cual se hace la toma de la lectura de temperatura. Para tomar la media de volumen de las probetas se utilizó un calibrador pie de rey el cual nos da las medidas en milímetros (mm).

Tabla 7.

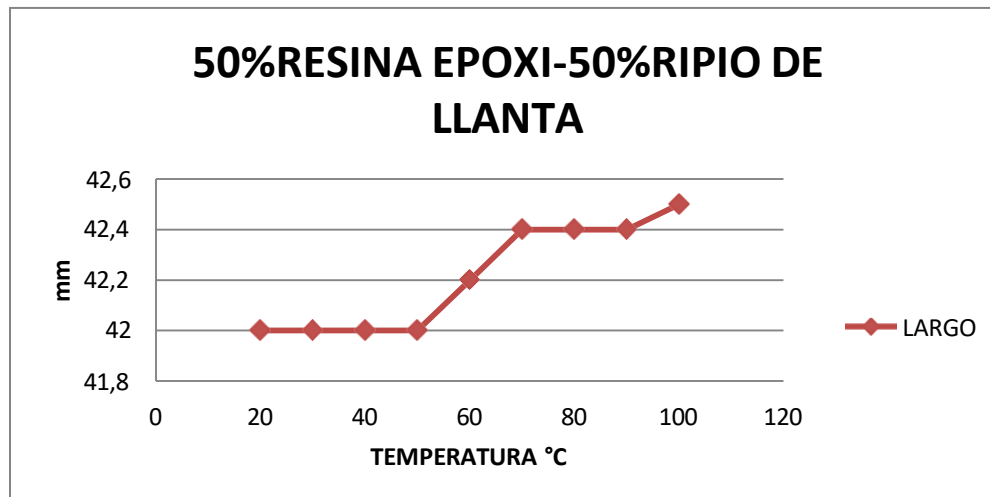
Datos ensayo de expansión térmica 50%resina epoxi-50%ripio de llanta.

TIPO DE PROBETA	TEPERATURA	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
50%RESINA EPOXI- 50%RIPIO DE LLANTA	20°C	42	30	7
	30°C	42	30	7
	40°C	42	30	7
	50°C	42	30	7
	60°C	42,2	30,2	7
	70°C	42,4	30,4	7,1
	80°C	42,4	30,4	7,1
	90°C	42,4	30,4	7,2
	100°C	42,5	30,5	7,4

Nota. Resultados ensayo de dilatación térmica.

Figura 28.

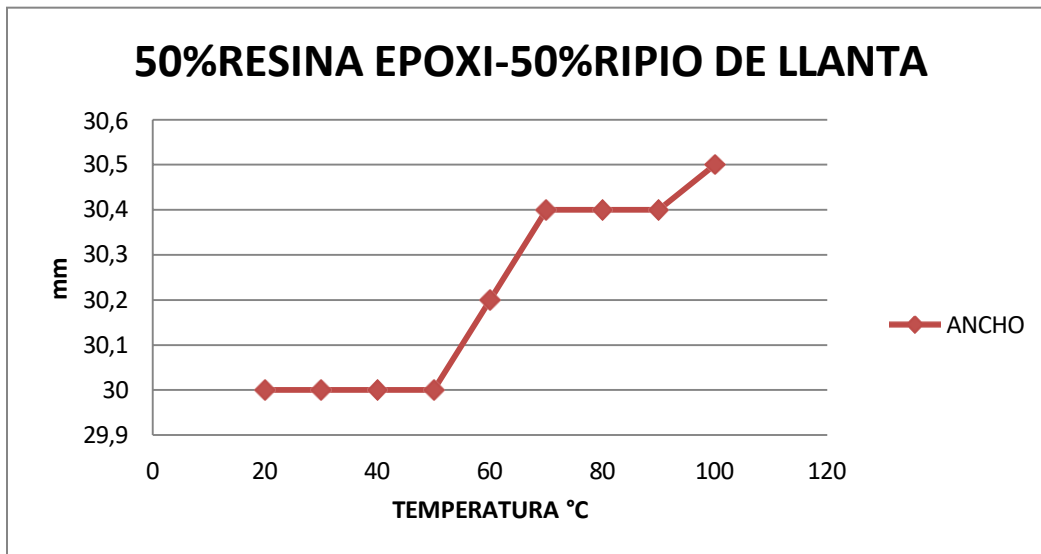
Grafica 50%-50% datos largo.



Nota. Resultados dilatación térmica largo probeta 50%-50%.

Figura 29.

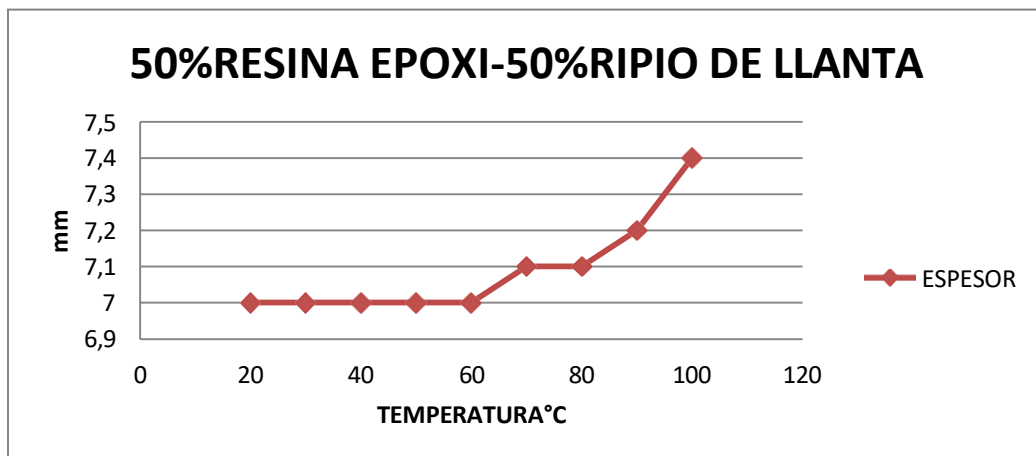
Grafica 50%-50% datos ancho.



Nota. Resultados dilatación térmica ancho probeta 50%-50%.

Figura 30.

Grafica 50%-50% datos espesor.



Nota. Resultados dilatación térmica espesor probeta 50%-50%.

En este ensayo para la probeta de proporción 50%-50% se encuentran incrementos en el largo, ancho, y espesor de esta sin llegar a ser cambios muy significativos en su estructura física, donde analizando las gráficas anteriores no se alcanza a apreciar un aumento de un milímetro (mm), notando que el material tiene un buen comportamiento a la exposición térmica en

temperaturas de 20°C a 100°C que fueron las temperaturas referenciadas en el ensayo en un lapso de tiempo de 10min por intervalo.

Tabla 8.

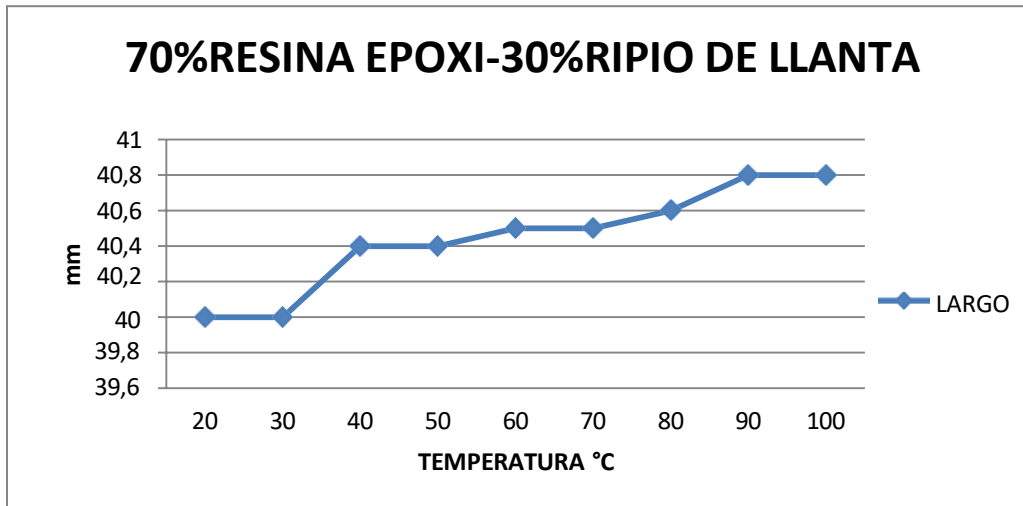
Datos ensayo de expansión térmica 70%resina epoxi-30%ripio de llanta.

TIPO DE PROBETA	TEPERATURA	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
70%RESINA EPOXI-30%RIPIO DE LLANTA	20	40	28	6
	30	40	28	6
	40	40,4	28,4	6
	50	40,4	28,4	6
	60	40,5	28,5	6,4
	70	40,5	28,5	6,4
	80	40,6	28,6	6,4
	90	40,8	28,8	6,6
	100	40,8	28,8	6,8

Nota. Resultados ensayo de dilatación térmica.

Figura 31.

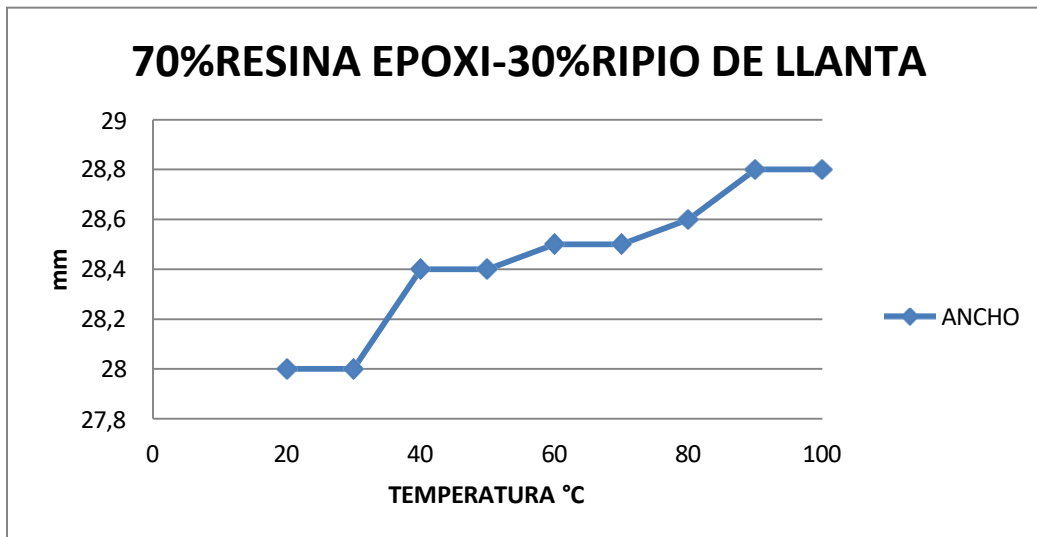
Grafica 70%-30% datos largo.



Nota. Resultados dilatación térmica largo probeta 70%-30%.

Figura 32.

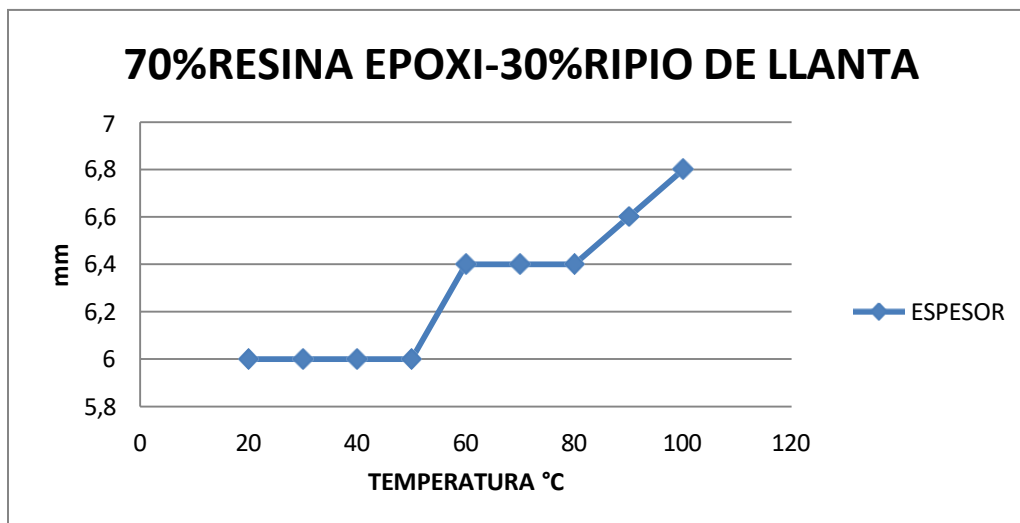
Grafica 70%-30% datos ancho.



Nota. Resultados dilatación térmica ancho probeta 70%-30%

Figura 33.

Grafica 70%-30% datos espesor.



Nota. Resultados dilatación térmica espesor probeta 70%-30%.

Para este ensayo la probeta de proporción 70%-30% presenta incrementos en el largo, ancho, y espesor de la misma sin llegar a ser cambios muy significativos en su estructura física, donde realizando el análisis de las gráficas anteriores no se alcanza a apreciar un aumento de un milímetro (mm), mostrando que el material posee un buen comportamiento a la exposición térmica en temperaturas de 20°C a 100°C que fueron las temperaturas referenciadas en el ensayo en lapsos de tiempo de 10min por intervalo.

Tabla 9.

Coefficiente de dilatación térmica lineal.

TIPO DE PROBETA	COEFICIENTE DE DILATACION TERMICA LINEAL (1/°C)
50%RESINA EPOXI-50%RIPIO DE LLANTA	0,0001488
70%RESINA EPOXI-30%RIPIO DE LLANTA	0,0002500

Nota. Resultados de coeficiente de dilatación térmica para cada probeta.

Tabla 10.

Coefficiente de dilatación térmica

lineal de PP

(Polipropileno).

MATERIAL	COEFICIENTE DE DILATACION TERMICA LINEAL (1/°C)
PP	0,00001[35]

Nota. Resultado coeficiente de dilatación térmica PP.

En el análisis de los resultados obtenidos por cada probeta podemos apreciar que aunque los cambios en expansión en juntas no es muy significativo si se logra apreciar en los resultados que la probeta elaborada en proporción 50%-50% tiene un cambio en su volumen menor al de la otra probeta en diferente proporción. Las probetas fueron comparadas con el material PP (polipropileno) del cual tenemos un valor de coeficiente lineal de dilatación de $0,00001 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, las probetas sometidas a este ensayo con resultados de $0,0001488 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ y $0,0002500 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ para proporción 50%-50% y 70%-30% respectivamente, el PP tuvo un coeficiente lineal de dilatación menor que las probetas estudiadas en este ensayo.

4. ANALISIS DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS EN LAS MUESTRAS DEL MATERIAL COMPUESTO, REALIZANDO UN ANÁLISIS MORFOLÓGICO Y UN ENSAYO DE SOLUBILIDAD EN DIFERENTES SOLVENTES, ANALIZANDO IMÁGENES ESTRUCTURALES Y OBTENIENDO RESISTENCIA A LA ACCIÓN DE DISOLVENTES PARA SU CORRESPONDIENTE ANÁLISIS

Para realizar el ensayo de solubilidad se tomó como referencia una adaptación de una norma Ecuatoriana INEN 925. Esta norma establece el método para determinar el grado de solubilidad de los materiales bituminosos,[39] nosotros adaptamos a nuestro material compuesto polimérico.

Para el objetivo propuesto se busca identificar propiedades poliméricas del material compuesto, como en el ensayo de solubilidad identificando niveles de solvencia en diferentes compuestos como lo son; el benceno, soda caustica y ácido sulfúrico. Se tomaron como referencias estos compuestos químicos con el fin de analizar su reacción a estos tipos de solventes, el ensayo de solubilidad se llevó acabo diluyendo el ácido sulfúrico 1:3 y la soda caustica del mismo modo y el benceno en estado puro, debido a que el compuesto no es miscible en agua.

La prueba se realizó con probetas de diferentes proporciones y geometrías, con el fin de generar un mejor análisis. Se utilizaron probetas 50% ripio-50% resina epoxi y 30% ripio- 70%resina epoxi que fueron conformadas con el fin de realizar este estudio, a cada probeta inicialmente se pesó y midió registrando los datos hallados, seguidamente se sumergió en 25ml de cada compuesto con un tiempo de duración en el solvente de 5min cada uno. Se observó cada probeta en los diferentes solventes y buscando identificar los diferentes niveles de solvencia presentes en cada probeta, se generó la tabla 11 con el objetivo de distinguir la reacción de las probetas con cada solvente.

Tabla 11.

Distinción niveles de solvencia.



CASOS DE SOLUBILIDAD	COLOR
Insolubilidad total del disolvente	Orange
Insolubilidad parcial	Green
Solubilidad parcial	Red
Solubilidad total en el disolvente	Blue





Nota. Asignación de color a cada tipo de solvencia presente en el ensayó.



Después de la distinción del nivel de solvencia y cumplido el tiempo de residencia en el solvente se procedió a retirar las probetas del solvente, pesando y midiendo nuevamente la probeta buscando cambios físicos dentro de las mismas.

Tabla 12.

Condiciones de operación y equipos del proceso.

ENSAYO DE SOLUBILIDAD		
EQUIPO/MATERIAL	CONDICIONES DE OPERACIÓN	IMAGEN
Baker	Volumen, 25ml. Temperatura ambiente	
Balanza de precisión	Gramaje (gr) Temperatura ambiente	

Soda caustica	Temperatura ambiente. Diluido en 25ml	
Benceno	Temperatura ambiente. Puro 25ml	
Ácido sulfúrico	Temperatura ambiente. Diluido en 25ml	
Pipeteado	Temperatura ambiente.	

Pipeta graduada	Temperatura ambiente. 25ml	
Calibrador pie de rey	Medida en mm	

Nota. Equipos empleados para el ensayo de solubilidad.

Para el análisis morfológico se conformó una probeta en proporción 70% resina epoxi-30% ripio la cual contaba con un espesor de 2mm, esto debido a que los equipos utilizados requieren que una luz que atravesase el material para generar un imagen clara.


El equipo utilizado fue un microscopio Motic de referencia BA210, el cual cuenta con una cámara Moticom2 de 2.0MP acoplada a un computador con un software Motic Images, que generaba capturas modificables sobre la estructura mostrada en la probeta.

Se tomaron 2 imágenes de diferentes ubicaciones sobre la probeta, dos de ellas con aumento de 4x/0.1 Se tomaron estas imágenes con este aumento debido a que un lente mayor no generaba visualización de la estructura de la probeta, al obtener la imagen en el computador dentro del software se ajustaron parámetros que ayudaban a la correcta visualización de la imagen como los son, el brillo, saturación, entre otros.

En correctas condiciones el equipo a utilizar sería un microscopio electrónico de barrido, ya que este permite analizar mejor la estructura del material debido a las imágenes que este capta, con el cual no se contó para este ensayo.

Tabla 13.

Condiciones de operación y equipos del proceso.

ENSAYO MORFOLOGICO		
EQUIPO/MATERIAL	CONDICIONES DE OPERACIÓN	IMAGEN
Microscopio Motic de referencia BA210	Temperatura ambiente.	
Computador	Software Motic Images	
Laminas porta objetos	Temperatura ambiente.	

Nota. Equipos empleados para el ensayo morfológico.

4.1 Análisis de solubilidad en diferentes solventes

En el ensayo de solubilidad, se generaron datos de análisis para una correcta aplicación del ensayo propuesto.

Primero se realizó el ensayo a las probetas con 50% ripio-50% resina epoxi, donde se analizaron con los solventes propuestos todos a temperatura ambiente, en un volumen de 25ml por un tiempo estimado de 5min para cada solvente.

Para ello se generó la tabla 9, con el fin de clasificar los niveles de solvencia para cada compuesto.

Se realizó la tabla 14 de datos tomados en el ensayo.

Tabla 14.

Datos tomados del ensayo de solubilidad para la probeta 50%-50%.

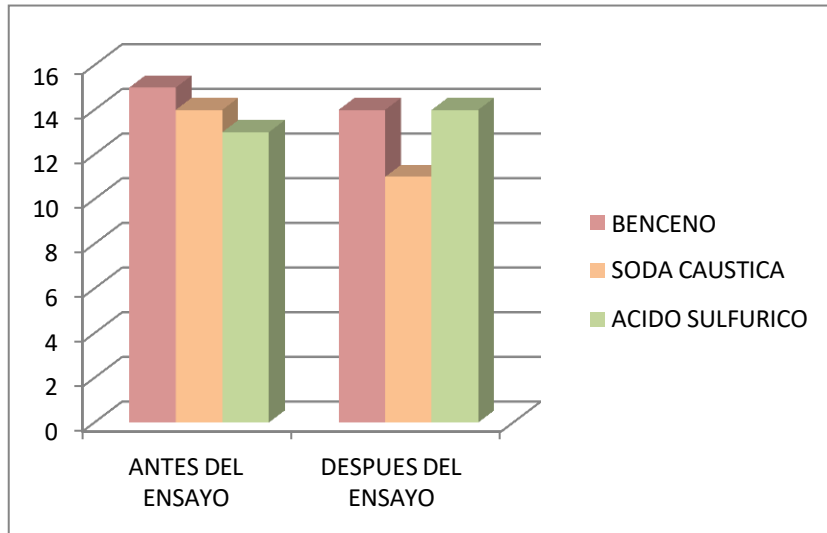
TIPO DE PROBETA	ANTES DEL ENSAYO					SOLUBILIDAD
	TIPO DE SOLVENTE	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	PESO (gr)	
50%RESINA EPOXI-50%RIPIO DE LLANTA	Benceno	15	7	8	0,8	
	Soda Caustica	14	10	8	1,09	
	Ácido sulfúrico	13	11	8	1,03	
	DESPUES DEL ENSAYO					
	Benceno	14	8	8,5	0,86	
	Soda Caustica	11	10	8	1,1	
	Ácido sulfúrico	14	11,5	8	1,02	

Nota. Resultados obtenidos para el ensayo de solubilidad en probetas 50%-50%.

Las probetas después de sumergidas fueron pesadas y medidas, con el fin de ver cambios en los aspectos físicos de las muestras, aunque a simple vista podemos ver que los niveles de solvencia fueron bajos.

Figura 34.

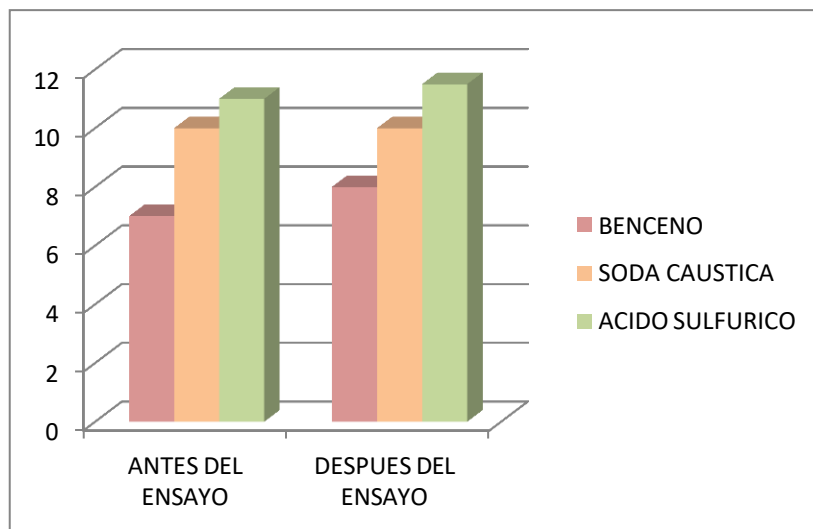
Largo probetas 50%-50% antes y después de ser sumergidas en los solventes.



Nota. Resultados solubilidad largo probeta 50%-50%.

Figura 35.

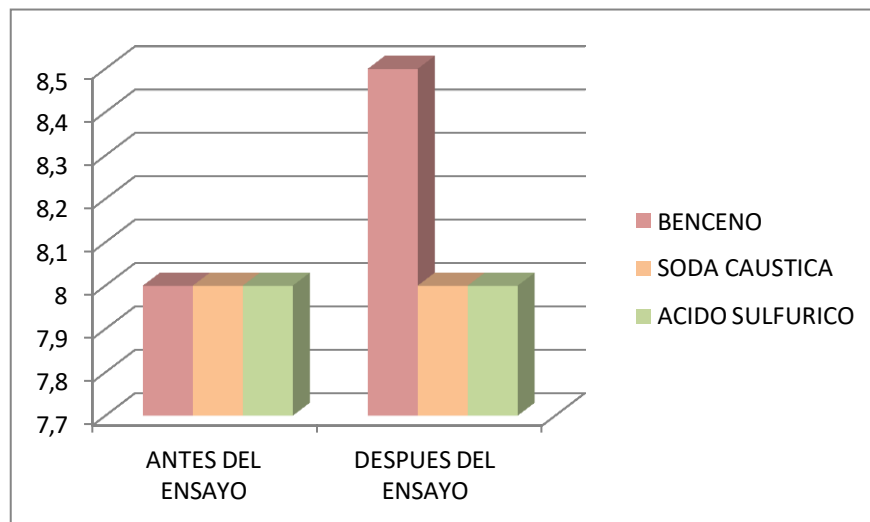
Ancho probetas 50%-50% antes y después de ser sumergidas en los solventes.



Nota. Resultados solubilidad ancho probeta 50%-50%.

Figura 36.

Espesor probetas 50%-50% antes y después de ser sumergidas en los solventes.



Nota. Resultados solubilidad espesor probeta 50%-50%.

En las gráficas se muestra por color el nivel de solubilidad de cada solvente al cual se sometieron las probetas de estudio, cada grafica muestra el cambio en largo, ancho y espesor del cambio físico que tuvieron las probetas de proporción 50% resina epoxi-50% ripio de llanta al ser sumergidas en estos químicos.

El cambio en las probetas con los solventes tuvo variaciones en cada uno de ellos, como en el benceno que su longitud disminuyo al este tener una solvencia mayor que los otros compuestos y su espesor y ancho aumentaron. Podemos notar que en el caso de soda caustica las probetas tuvieron una absorbencia del compuesto en solución, y su peso aumento, logrando varias su espesor y ancho.

En el caso del ácido sulfúrico, siendo este un ácido fuerte no tuvo mayor disolvencia en el tiempo de sumergido, hay notables diferencias físicas en la probeta como el cambio en el peso y podemos concluir que la probeta tuvo de nuevo una absorbencia en el ácido, esto alterando su cambio en el largo.

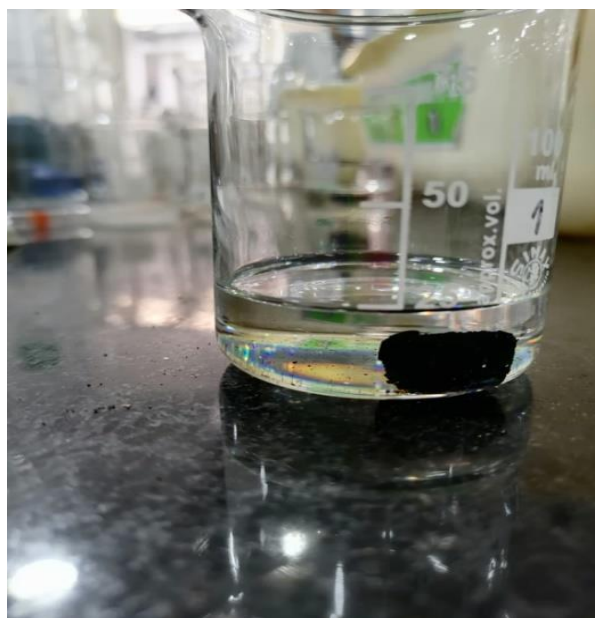
El benceno fue el compuesto que logro disolver de forma parcial las probetas de proporción 50% resina epoxi-50%ripio de llanta, notando este cambio de forma física.

En la actualidad, el Benceno se recupera de las fuentes de carbón y petróleo. La gran mayoría del Benceno producido en el mundo se deriva de las industrias petroquímicas y de refinación de petróleo. [40]

Las probetas logran disolverse de manera más visible en el solvente benceno, ya que la elaboración de estas probetas consta de ripio de llanta el cual es un derivado del petróleo y sus polaridades son afín, la probeta de proporción 70%-30% consta en más porcentaje de resina epoxi y su dilución en el solvente benceno fue menor que la probeta de proporción 50%-50%, que en su elaboración hay mas alto contenido de ripio de llanta, esto causando una solvencia mayor en el tiempo de sumergida. Al contener las probetas menor porcentaje de resina epoxi en su matriz, se encuentran más expuestas a solubilidad en los solventes orgánicos, menos resina menos resistencia a la solubilidad.

Figura 37.

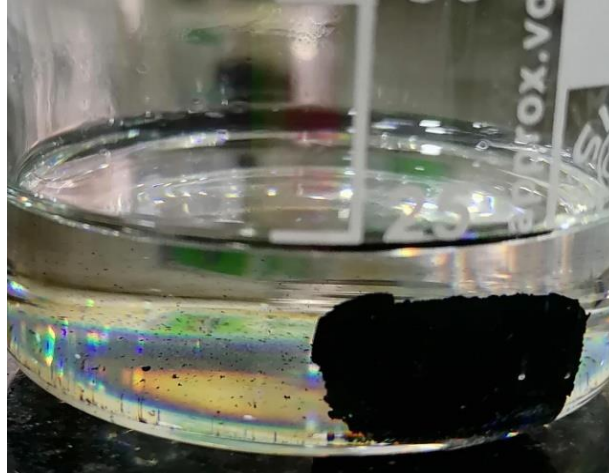
Probeta 50%-50% sumergida en benceno.



Nota. Se sumerge la probeta en benceno para determinar la solubilidad.

Figura 38.

Probeta 50%-50% sumergida en benceno, con aumento.



Nota. Se aprecia simple vista la solubilidad del material en el benceno.

En la figura 38, se logra apreciar la probeta sumergida en benceno con una disolución parcial de la misma, pasados los 5 minutos de ensayo, se puede observar material particulado desprendido de la probeta.

Tabla 15.

Datos tomados del ensayo de solubilidad para la probeta 70%-30%.

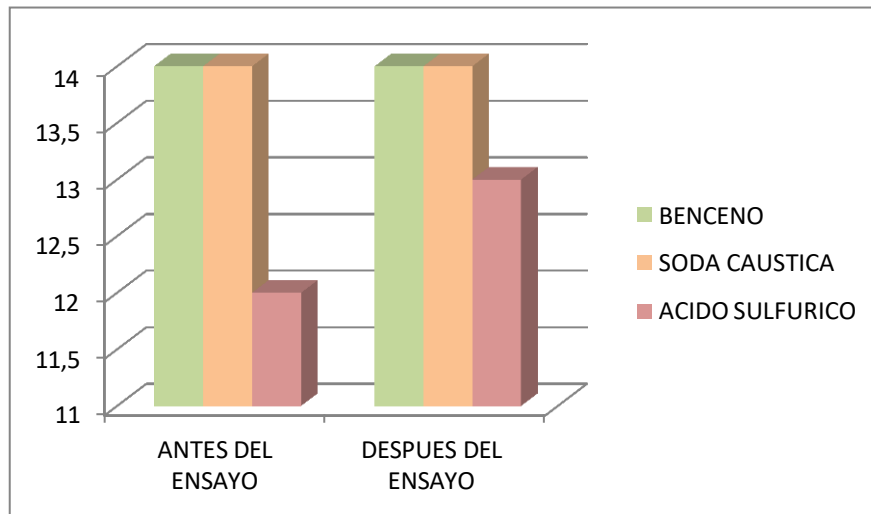
TIPO DE PROBETA	ANTES DEL ENSAYO					SOLUBILIDAD
	TIPO DE SOLVENTE	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	PESO (gr)	
70%RESINA EPOXI-30%RIPIO DE LLANTA	Benceno	14	7,4	7	1,3	
	Soda Caustica	14	12	7,4	1,1	
	Ácido sulfúrico	12	11	8,2	1,01	
	DESPUES DEL ENSAYO					
	Benceno	14	8	7	1,33	
	Soda Caustica	14	12	7	1,13	
Ácido sulfúrico	13	11	8	1,01		

Nota. Resultados obtenidos para el ensayo de solubilidad en probetas 70%-30%.

En la tabla 13, se reflejan los resultados obtenidos del ensayo de solubilidad con las probetas 70%resina epoxi-30%ripio de llanta, se muestra el antes y después del ensayo con los datos de largo, ancho, espesor y peso.

Figura 39.

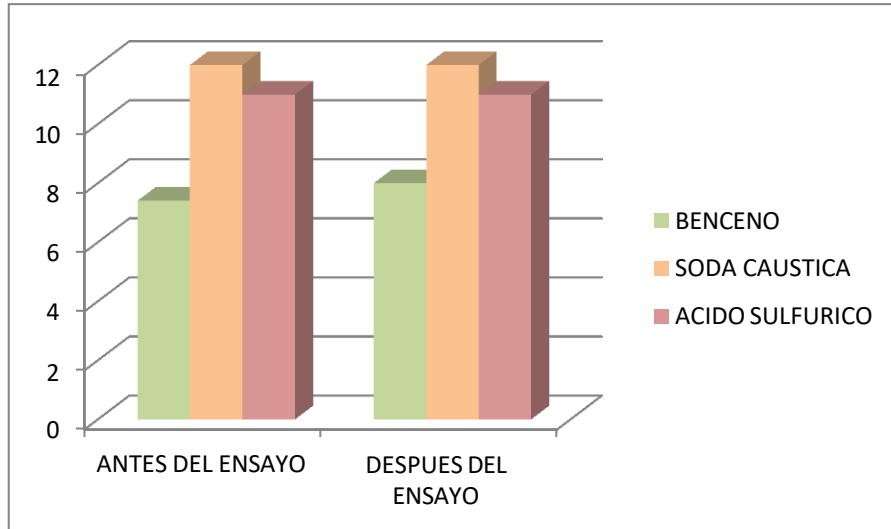
Largo probetas 70%-30% antes y después de ser sumergidas en los solventes.



Nota. Resultados solubilidad largo probeta 70%-30%.

Figura 40.

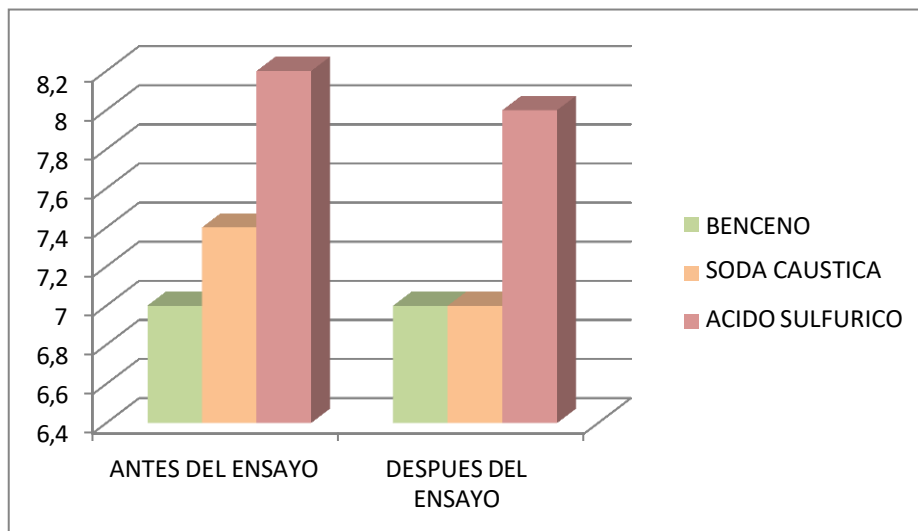
Ancho probetas 70%-30% antes y después de ser sumergidas en los solventes.



Nota. Resultados solubilidad ancho probeta 70%-30%.

Figura 41.

Espesor de las probetas 70%-30% antes y después de ser sumergidas en los solventes.



Nota. Resultados solubilidad espesor probeta 70%-30%.

Los solventes utilizados en el ensayo como la soda caustica se utilizaron de forma sólida blanco disponible en comprimidos, hojuelas, gránulos y como una solución. Absorben fácilmente el agua del aire, así que debería ser almacenado en un contenedor hermético. Es bastante soluble en agua con liberación de calor. [41]

En su forma pura, el Ácido Sulfúrico es un líquido aceitoso, sin color y sin olor. Es muy corrosivo. Puede formar soluciones con el agua en cualquier proporción. [42] como el caso del ensayo siendo un ácido mineral fuerte y un oxidante fuerte.

El benceno utilizado en el ensayo, se evapora al aire rápidamente y es sólo ligeramente soluble en agua. El benceno es sumamente inflamable. [43] utilizado de forma pura como solvente orgánico siendo el más soluble con las probetas estudiadas.

A diferencia de las probetas 50%resina epoxi-50%ripio de llanta, podemos observar que las probetas 70%resina epoxi-30%ripio de llanta, son más resistentes a la solvencia de los compuestos químicos a los que se sometieron a ensayo, los datos obtenidos con el ensayo nos

muestra diferencia en las variables de largo, ancho, espesor y peso aunque no de la misma dimensión que en el ensayo con la probeta 50%-50%, estos cambios fueron mínimos. También observamos una secuencia de absorción de la probeta en los solventes, y se puede ver que el benceno sigue siendo el compuesto químico que genera más solubilidad en las probetas.

La variación del peso es mínima en las probetas 70%-30%, haciéndolas más resistentes a la absorción que las probetas 50%-50%. El cambio de proporción en su elaboración es evidente en los datos tomados en el ensayo de solubilidad, la probeta que contiene más resina epoxi es más resistente en solvencia y absorción que la que contiene mismas proporciones.

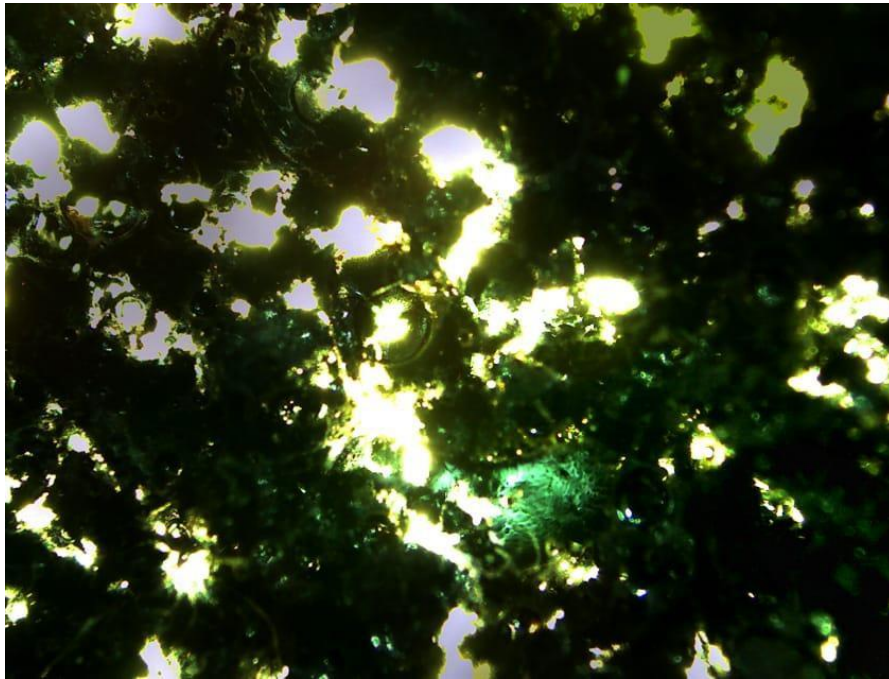
4.2 Análisis morfológico.

Para la ejecución de este ensayo se elaboró una probeta de 2 milímetros (mm) de espesor, para observar la topografía superficial a escala sub manométrica donde se va a apreciar la composición del material.

Las figuras a continuación se tomaron con un tipo de lente de aumento 4x/0.1 con el software Motic Images, se tomaron 2 imágenes en 2 diferentes áreas en la probeta.

Figura 42.

Imagen en aumento 4x/0.1, área 1.



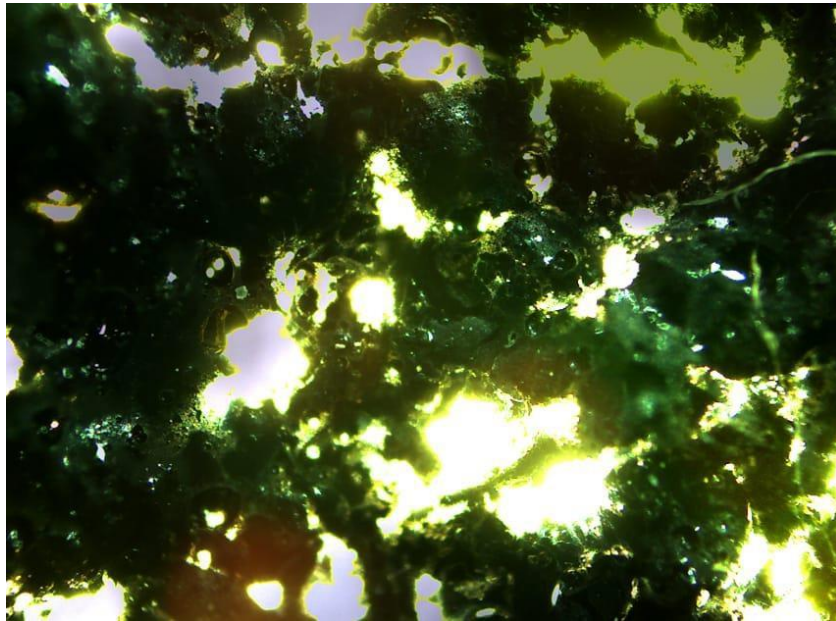
Nota. Imagen del material a través del microscopio tomada con el software Motic Images.

En la figura 42, podemos observar espacios iluminados del conjunto de resina epoxi y ripio de llanta, esta figura es la probeta en proporción 70%-30% que en su mayoría es resina epoxi.

La homogeneidad de la probeta es reducida, encontramos espacios vacíos con solo resina y aglomeración en puntos específicos del área. La estructura de la probeta no es regular, es una estructura amorfa y esto la hace menos resistente, ya que sus vacíos iluminados posiblemente son modos de falla.

Figura 43.

Imagen en aumento 4x/0.1, área 2.



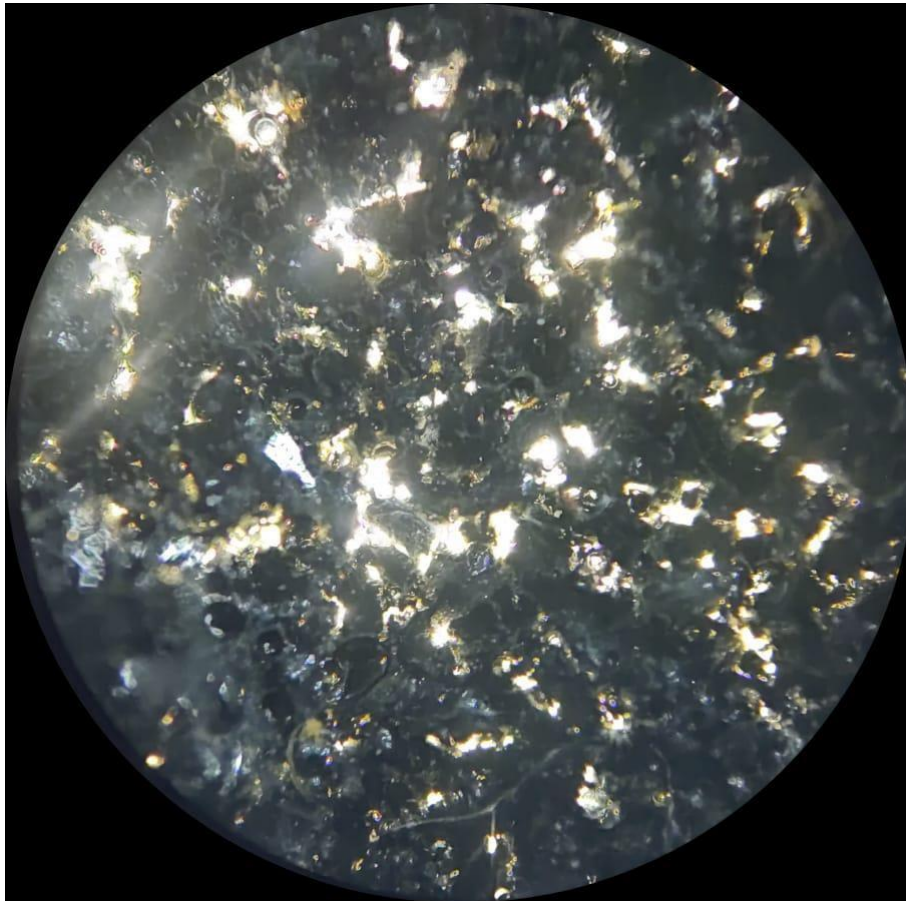
Nota. Imagen del material a través del microscopio tomada con el software Motic Images.

En las anteriores figuras, en las áreas estudiadas se aprecian las mismas características físicas, las partes iluminadas pertenecen a la resina epoxi y las oscuras al ripio de llanta.

En las imágenes con lente 4x/0.1, se observa la diferencia de componentes con una mejor resolución. La estructura de la probeta tiene características irregulares en su estructura, teniendo en cuenta que su proporción es 70%resina epoxi y 30%ripio de llanta. En su estructura la mayoría del material compuesto se conforma con resina epoxi, esto ofreciendo las propiedades de la resina con la característica polimérica que brinda el ripio de llanta.

Figura 44.

Imagen tomada desde el visor del microscopio, en aumento 4x/0.1.



Nota. Imagen del material a través del microscopio tomada desde el visor del mismo.

En la figura 44, podemos observar la imagen de mejor calidad y podemos analizar mejor la distribución de resina epoxi y el ripio de llanta, encontramos mayor cantidad de resina epoxi haciendo su estructura amorfa.

La imagen de los compuestos estudiados a escala 4x/0.1 es clara y se observan cambios en el tamaño, la forma y la distribución de los segmentos ricos en resina epoxi, este resultado nos sugiere que esta reforzada y modificada, este fenómeno afecta la morfología y la estructura en este tipo de materiales compuestos que tienen grandes propiedades, pues pequeños cambios en su morfología del material compuesto pueden suponer cambios importantes en las propiedades

químicas y mecánicas finales del material.

EPILOGO

El material compuesto elaborado con resina epoxi y ripio de llanta, llega a ser un gran sustituto para plásticos rígidos como lo son el PET y el PP en diferentes tipos de usos, esto por las propiedades mecánicas analizadas en el proyecto y su comparación con datos generalizados de otros polímeros, agregando propiedades aislantes y con resistencia al contacto con productos químicos.

Siendo una opción a considerar al realizar el diseño de revestimientos, tuberías, pequeños contenedores y empleado con material aislante. Siendo posiblemente usado como material de remplazo en polímeros de mismas características, pero de alto costo comercial.

5. CONCLUSIONES

Se logró conformar el material compuesto, mediante la operación de moldeo con ripio de llanta y resina epoxi, estas en diferentes proporciones. Las propuestas para la elaboración de este proyecto fueron 50%resina epoxi-50%ripió de llanta, 30%resina epoxi-70%ripió de llanta y 70%resina epoxi-30%ripió de llanta, de las cuales solo se conformaron 50%resina epoxi-50%ripió de llanta y 70%resina epoxi-30%ripió de llanta ya que la probeta con proporción 30%resina epoxi-70%ripió de llanta tenía poca cantidad de resina generando baja adherencia entre los dos compuestos, afectando su estructura y siendo poco moldeables. El molde se realizó según las normas ASTM D7264/D7264M-21 y D3039/D3039M-17, con el fin de garantizar un correcto ensayo y análisis de los resultados generados por las pruebas de tensión y flexión.

Se realizaron los ensayos mecánicos para las probetas moldeadas, estos constaron de tres pruebas las cuales fueron; ensayo a tensión, ensayo a flexión y expansión térmica llegando a obtener resultados para el análisis de cada ensayo. El ensayo a tensión se realizó con la maquina universal de ensayos donde las probetas nombradas 70%-30% obtuvieron los mejores resultados promediados a 244,010N, como carga máxima y 8,253KN/m como resistencia a la tensión. Las probetas nombradas 50%-50% fueron las que obtuvieron los valores más bajos incluso sobre la probeta nombrada blanco, la cual está conformada con solo resina epoxi, los valores promediados para la carga máxima y resistencia a la tensión respectivamente de las probetas 50%-50% son; 182,700N y 6,133KN/m. Para el ensayo a flexión las probetas 70%-30% siguieron siendo las que mejores resultados arrojaron como carga máxima, el valor promedio de las probetas es; 31,5N y las probetas en promedio 50%-50% tienen un valor de 26,5N, en este caso las probetas conformadas con el ripio tienen valores más bajos que el blanco. El ensayo de expansión térmica se realizó solamente a las probetas conformadas con el ripio, en los análisis para este ensayo se concluye que la expansión térmica en temperaturas de rango de 20°C a 100°C es mínima, en este ensayo la probeta que mejor resultado obtuvo fue la 50%-50% arrojando una expansión volumétrica menor que la probeta 70%-30%. Para este objetivo se concluye que el material a ensayo de tensión y flexión presenta buen comportamiento en proporción 70%-30% aunque en flexión este por debajo de la probeta blanco, en el ensayo térmico en general se obtienen buenos resultados comparados frente al material PP

(polipropileno) encontrando diferencias en la expansión lineal con las probetas estudiadas.

En el análisis químico del material se cuenta con dos ensayos, un análisis de solvencia y un estudio morfológico. En el ensayo de solubilidad en diferentes solventes, se seleccionaron diferentes compuestos químicos de uso comercial como lo son el benceno, soda caustica y ácido sulfúrico, dos de ellos en solución. En los datos arrojados por la prueba de solubilidad se obtuvieron diferentes niveles de solvencia los cuales se clasificaron en; insolubilidad total en el disolvente, insolubilidad parcial, solubilidad parcial, solubilidad total en el disolvente. Se sometieron las probetas nombradas 70%-30 y 50%-50% al ensayo, obteniendo datos después de sumergir cada probeta 5min en el solvente. Para la probeta nombrada 50%-50% y realizando el respectivo análisis, presento mayores cambios en su estructura física ya sea por solvencia o absorbencia al solvente, el benceno fue el solvente con mayor solubilidad clasificado como solubilidad parcial, la soda caustica y el ácido sulfúrico tuvieron baja solvencia en las probetas presentando más absorbencia y mostrando cambios en el peso de la probeta. La probeta nombrada 70%-30% presento comportamientos similares, aunque tuvo más resistencia a la solvencia que la probeta 50%- 50% siendo el benceno el más agresivo, obteniendo como clasificación insolubilidad parcial. La soda caustica y el ácido sulfúrico fueron los solventes menos agresivos y la probeta tuvo un comportamiento de nuevo de absorbencia variando su estructura física y peso. Para el ensayo morfológico se analizaron imágenes con un microscopio electrónico Motic de referencia BA210, con el que cuenta la universidad y mediante el cual se obtuvieron imágenes con un aumento de 4x/0,1. Las imágenes obtenidas nos brindan conocimiento de la estructura interna del material, se observan cambios en el tamaño, la forma y la distribución de los segmentos ricos en resina epoxi, este resultado nos sugiere que esta reforzada y modificada, este fenómeno afecta la morfología y la estructura en este tipo de materiales compuestos que tienen grandes propiedades. Concluyendo que el material es bastante resistente a solventes en proporción 70%resina epoxi-30%ripio de llanta, brindando niveles de solvencia altos en diferentes compuestos químicos, en el ensayo morfológico se puede apreciar que al añadir ripio de llanta a la resina epoxi, podemos alterar la estructura y consigo obtener propiedades con características poliméricas reforzadas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Vega Dueñas, M., 2020. *Iniciativas nacionales para el reciclaje de llantas usadas en Colombia*. [En línea] Repository.uamerica.edu.co. Disponible en: <<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7844/1/233203-2020-I-GA.pdf>> [Accedido 11 Abril 2022].
- [2] Transporte, P. and compuestos, T., 2020. *Tipos de materiales compuestos*. [En línea] AIMPLAS. Disponible en: <<https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/>> [Accedido 1 Junio 2022].
- [3] Blanco Rodríguez, J. and David Cruz Sosa, J., 2018. *Influencia de los desechos de llantas del parque automotor en el medio ambiente y en la sociedad de la ciudad de bogotá en la localidad de Puente Aranda*. [En línea] Repository.usta.edu.co. Disponible en: <<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13759/2018juanblanco.pdf;jsessionid=349F503F2D3D3DB7C50D8FC61236844B?sequence=1>> [Accedido 10 Junio 2022].
- [4] López Fuentes, J. and Torres Trujillo, J., 2017. *Alternativas para el manejo de llantas usadas en la ciudad de Bogotá D.C.* [En línea] Repository.udistrital.edu.co. Disponible en: <<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4006/proyecto%20de%20grado%20JJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [Accedido 1 Junio 2022].
- [5] Michelin.com.co. 2019. *¿Cuándo cambiar mis llantas? | Michelin Colombia*. [En línea] Disponible en: <<https://www.michelin.com.co/auto/consejos-y-asesoria/consejos-automoviles/cuando-debo-cambiar-mis-llantas#:~:text=Diez%20a%C3%B1os%20es%20el%20lapso,de%20la%20banda%20de%20Orodamiento.>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [6] Helloauto.com. 2022. *¿Qué es la Llanta? - Glosario de mecánica | Hello Auto*. [En línea] Disponible en: <<https://helloauto.com/glosario/llanta>> [Accedido 26 abril 2022].

- [7] Hankook Driving Emotion. 2017. *Funciones de la llanta*. [En línea] Disponible en: <<https://www.hankooktire.com/co-es/services-tips/tire-guide/functions.html>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [8] Motion, C., 2018. *Partes que componen una llanta - Car Motion*. [En línea] Car Motion. Disponible en: <<https://www.carmotion.com.mx/partes-que-componen-una-llanta>> [Accedido 2 Marzo 2022].
- [9] Schwarz, Z., 2020. *¿Qué son los polímeros y cómo se clasifican? - ZS España*. [En línea] ZS España. Disponible en: <<https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/que-son-los-polimeros-y-como-se-clasifican/>> [Accedido 12 Abril 2022].
- [10] Proasur. 2022. *La resina, tipos y recomendaciones para su uso.* [En línea] Disponible en: <<https://proasur.com/es/blog/resina-en-los-procesos-productivos-de-proasur/>> [Accedido 26 Abril 2022].
- [11] Laresinaepoxi 2022. *LA Resina Epoxi*. [En línea] Disponible en: <<https://laresinaepoxi.com/resina-epoxica/>> [Accedido 9 Mayo 2022].
- [12] Cromtek. 2019. *Máquina Universal de ensayo: ¿qué es y para qué sirve?* [En línea] Disponible en: <<https://www.cromtek.cl/2020/10/29/maquina-universal-de-ensayo-que-es-y-para-que-sirve/>> [Accedido 9 Abril 2022].
- [13] Industrial Consulting, I., 2021. *Ensayo de flexión en materiales ¿Cuándo se realizan?*. [En línea] Infinitia Industrial Consulting. Disponible en: <<https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayo-de-flexion-en-materiales-cuando-se-realizan/#:~:text=Un%20ensayo%20de%20flexi%C3%B3n%20es,en%20la%20innovaci%C3%B3n%20de%20materiales.>> [Accedido 2 Mayo 2022].
- [14] Aceros Levinson | Aceros | Plásticos | Metales. 2022. *Ensayo De Tensión | Aceros Levinson*. [En línea] Disponible en: <<https://www.aceroslevinson.com/2020/07/ensayo-de-tension/>> [Accedido 26 Abril 2022].

- [15] Areatecnologia.com. 2022. *Ensayo de Traccion. Ensayo, Grafica, Formulas, Problemas.* [En línea] Disponible en <<https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>> [Accedido 26 Abril 2022].
- [16] Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos. 2022. *Solubilidad polímeros.* [En línea] Disponible en: <<https://www.mexpolimeros.com/solubilidad%20pol%C3%ADmeros.html>> [Accedido 26 Abril 2022].
- [17] Portal.uah.es. 2022. *Prácticas Tecnología de Polímeros.* [En línea] Disponible en : <https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-66329/TAB42351/praclabo.htm> [Accedido 26 Abril 2022].
- [18] Gune, C., 2022. *Análisis morfológico y estructural de los materiales.* [En línea] Cicenergigune.com. Disponible en: <<https://cicenergigune.com/es/analisis-morfologico-estructural-materiales#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20morfol%C3%B3gico%20y%20estructural,como%20informaci%C3%B3n%20sobre%20sus%20superficies.>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [19] León Molina, H., 2011. *Caracterización térmica, morfológica y determinación de las propiedades de resistencia a la tensión de mezclas de polivinil alcohol (PVOH) y almidón de yuca.* [En línea] Repositorio.unal.edu.co. Disponible en: <<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8734/291431.2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [20] Alutal.com.br. 2019. *Termocupla, cómo funciona, tipos, consejos y modelos.* / Alutal. [En línea] Disponible en : <<https://www.alutal.com.br/es/termopar>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [21] Vargas Álvarez, J., 2018. *Diseño de horno eléctrico para tratamientos térmicos con atmósfera controlada.* [En línea] Repository.libertadores.edu.co. Disponible en: <<https://repository.libertadores.edu.co/bitstream/handle/11371/1562/duartediego2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20hornos%20de%20tratamiento%20t%C3%A9rmico,los%20cual%20impacta%20en%20las>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [22] Pérez González, A., 2017. *Mecapedia-Módulo de elasticidad.* [En línea] Mecapedia.uji.es. Disponible en:

- <http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm> [Accedido 2 Junio 2022].
- [23] Portal de arquitectura ARQHYS.com. 2019. *Limite elastico*. [En línea] Disponible en: <<https://www.arqhys.com/construccion/limites-elasticos.html>> [Accedido 5 June 2022].
- [24] Tenso, U., 2019. *Glosario de terminos*. [En línea] Tenso.es. Disponible en: <<http://www.tenso.es/utilidades/glosario.asp?termino=L%EDmite%20el%Elstico>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [25] Cornejo Arteaga, P., 2020. *Propiedades del benceno y sus usos en la industria*. [En línea] Uaeh.edu.mx. Disponible en: <<https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n7/m7.html>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [26] Máxima Uriarte, J., 2021. *Ácido sulfúrico*. [En línea] características.co. Disponible en: <<https://www.caracteristicas.co/acido-sulfurico/>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [27] Quimpac.com.co. 2019. *Soda Caústica en Escamas*. [En línea] Disponible en: <<https://www.quimpac.com.co/index.php/soda-caustica-en-escamas>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [28] Grupo Pochteca | Venta de materias primas para la Industria. 2018. *Qué es la sosa cáustica y para qué sirve | Grupo Pochteca*. [En línea] Disponible en: <<https://mexico.pochteca.net/conoce-que-es-la-sosa-caustica-y-para-que-sirve/>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [29] Grupo, A. and →, V., 2021. *Resina de Poliéster y Epoxy DIFERENCIAS | Grupo AST*. [En línea] Astgrupo.com. Disponible en: <<https://astgrupo.com/blog/resinas-de-poliester-resinas-epoxi/>> [Accedido 10 Junio 2022].
- [30] Motorex. 2018. ▷ *Diferencias entre la resina de poliéster y la resina epoxi | Motorex*. [En línea] Disponible en: <<https://www.motorex.com.pe/blog/diferencias-resina-poliester-epoxi/>> [Accedido 5 Junio 2022].
- [31] Pasquesi, A., 2017. *Tipos de monómeros*. [En línea] Geniolandia. Disponible en: <<https://www.geniolandia.com/13176222/tipos-de-monomeros>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [32] Ambientebogota.gov.co. 2022. *Guía para el manejo de llantas usadas*. [En línea] Disponible en: <<https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/506375/Gu%C3%ADa+para+el+manejo+de+llantas+usadas.pdf/f875a669-7451-47b1-892d-caf6f8294eb4>> [Accedido 1 Mayo 2022].

- 2022].
- [33] 1library.co. 1990. *Norma técnica colombiana 2836*. [En línea] Disponible en: <<https://1library.co/document/z1e17vey-norma-tecnica-colombiana.html>> [Accedido 6 Junio 2022].
- [34] Tecnologia, A., 2019. *Escala de Dureza de Mohs. Dureza de los Materiales Aprende Facil*. [En línea] Areatecnologia.com. Disponible en: <<https://www.areatecnologia.com/materiales/escala-de-dureza-de-mohs.html>> [Accedido 8 Junio 2022].
- [35] Pérez Ronquillo, R. and Pujadas Torner, J., 2022. *Diseño de un CD Interactivo Didáctico sobre las Propiedades Mecánicas de Materiales Plásticos*. [En línea] Upcommons.upc.edu. Disponible en: <<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3178>> [Accedido 2 Junio 2022].
- [36] Archila González, D. and Figueroa Parra, g., 2017. *Análisis de la resistencia al corte, tracción, flexión y compresión en probetas de plástico reciclado..* [En línea] Repository.ugc.edu.co. Disponible en: <<https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5517/1.%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> [Accedido 2 Junio 2022].

- [37] Normalizacion.gob.ec. 2014. *Norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 10545-8*. [En línea] Disponible en <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE_INEN_ISO_10545-8.pdf> [Accedido 3 Abril 2022].
- [38] de Ll., C., 2019. *Propiedades físicas polipropileno (PP)*. [En línea] Elaplas.es. Disponible en: <<https://www.elaplas.es/wp-content/uploads/polipropileno.pdf>> [Accedido 4 Junio 2022].
- [39] Normalizacion.gob.ec. 2017. *Materiales bituminosos. determinación de la solubilidad en solventes orgánicos*. [En línea] Disponible en: <<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/925.pdf>> [Accedido 1 Marzo 2022].
- [40] Documentacion.ideam.gov.co. 2022. *Benceno*. [En línea] Disponible en: <<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia7.pdf>> [Accedido 2 Mayo 2022].
- [41] Mejía, N., 2020. *Soda Cáustica / ALSUM*. [En línea] ALSUM. Disponible en: <<https://alsum.co/handbook/soda-caustica/>> [Accedido 1 Junio 2022].
- [42] Atsdr.cdc.gov. 2022. *ToxFAQs™: Anhídrido sulfúrico y ácido sulfúrico (Sulfur Trioxide and Sulfuric Acid) | ToxFAQ | ATSDR*. [En línea] Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts117.html#:~:text=El%20C3%A1cido%20sulf%20C3%BArico%20es%20un,bater%20C3%ADa%20y%20sulfato%20de%20hidr%20C3%B3geno.> [Accedido 4 Junio 2022].
- [43] Atsdr.cdc.gov. 2019. *Resumen de Salud Pública: Benceno (Benzene) | PHS | ATSDR*. [En línea] Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs3.html#bookmark1> [Accedido 5 Junio 2022].

ANEXOS

ANEXO 1

FICHA TECNICA RESINA EPOXI



COLREPOX® 6090A – 1956 B

FT-018-VD

➤ DESCRIPCIÓN

Es un sistema epóxico libre de solventes, de viscosidad media para coledas resistentes al impacto.

➤ USOS

Para aplicación de plantillas, patrones para fundición, útiles y accesorios para herramienta.

➤ VENTAJAS

- Sistema epóxico libre de solventes.
- Fácil de aplicar con brocha, espátula o por coleda.
- Cubre muy bien los bordes agudos.
- Se puede utilizar para impregnación con fibra de vidrio.
- Viscosidad manejable
- Se puede emplear con carga como sistema para coleda o relleno.
- Buenas propiedades humectantes
- Curado a temperatura ambiente
- Mínima contracción al emplearse con tejido de vidrio
- Muy buena estabilidad dimensional
- Excelentes propiedades mecánicas

➤ DATOS TÉCNICOS PARA LA MEZCLA

Apariencia	Líquido transparente ámbar
Relación de la mezcla – peso	100 : 20
Densidad a 20°C:	1,07 +/-0,002 g/cm ³
Viscosidad (25°C):	1.300-1.500mPas
Tiempo de uso (para 100 grmezcla):	35 – 40 minutos a 25°C
Tiempo de desmolde:	20-24 horas
Tiempo mínimo de curado:	24-36 horas

➤ PROPIEDADES MECANICAS

Propiedades después del endurecimiento

Curado: 7 días/temperatura ambiente o 12 horas/60°C

La Muestra A comprende un laminado constituido por 7 capas de cinta de vidrio QF 5T, de 3 mm de espesor.

		g/cm ³	1,1	1,6-1,8	1,1
Densidad			—	—	45-75
Dureza Shore D	ISO 868				
Resistencia a la compresión	ISO 904	N/mm ²	—	55	
Resistencia a la flexión	ISO 178	N/mm ²	270-300	40	25-30
Módulo de elasticidad a la flexión	ISO 178	N/mm ²	17000-18000	6900-7900	400-500
Resistencia al impacto	ISO 179	kJ/m ²	90-190	2,5	50-65
Contracción lineal (Probetas: 500 x 75 x 4 mm)		%	0,1-0,3	—	0,3-0,5
Coeficiente de vidrio	ISO DR 1833	%	33-66	—	—
Absorción de agua 16 días/23°C		%	0,48	0,45	—
1 hora/100°C		%	0,42	0,62	—
Temperatura de deflexión	ISO 75	°C	45-55 (*)	45-55	—

(*) Determinado mediante ensayos de material sin refuerzo

RECOMENDACIONES PARA EL MEZCLADO

Mezcla 1: Sin Carga: para la producción de laminados por aplicación manual.

La resina y el endurecedor deben mezclarse muy bien a 20-25°C. Impregnar cada capa de tejido de vidrio con la mezcla resultante y aplicarla manualmente. Como paso previo a la construcción de la estructura que contendrá dicho tejido, tratar los moldes o modelos con un agente de despegue para asegurar un desmolde sin inconvenientes. Para garantizar la adherencia del laminado a las capas superficiales o a capas de acoplamiento, comenzar su aplicación cuando estas se encuentren aun pegajosas al tacto. Como regla general, el espesor total del laminado deberá ser de 5-8mm.

Mezcla 2: Con Carga: Se utiliza como sistema para coleda. Las cargas en polvo deben ser secas y calentadas a 50°C antes de mezclarse con la resina, facilitándose así una dispersión

Colrecox 6090A – 1956BPA



COLREPOX® 6090A – 1956 B

FT-018-V0

homogénea en la misma y obteniéndose, de esta manera, una mezcla sin aire, en gran medida. El endurecedor deberá revolverse minuciosamente dentro de la mezcla resina/carga únicamente cuando esta haya enfriado hasta temperatura ambiente (20-25°C).

Mezcla 3: Sin Carga: Proporciona un sistema de colada transparente. Para obtener coladas transparente libres de aire y resistentes al impacto, la mezcla deberá ser desgasificada bajo vacío antes de su aplicación.

NOTA: Las recomendaciones así propuestas son solamente una guía de cómo usar el producto. Cualquier otra modalidad de aplicación depende de la habilidad y experiencia del aplicador.

➤ EMPAQUE y PRESENTACIÓN

Resina 4.0Kg - 20Kg
Endurecedor 0.8Kg-4.0Kg

➤ MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Tanto la resina como el endurecedor deben ser almacenados en lugares secos a una temperatura entre 18 °C y 25 °C, en sus envases originales y bien sellados. Se deben tratar de consumir los envases parcialmente llenos, para minimizar la probabilidad de alteración de los productos. La vida de almacenamiento en los envases originales es de un año.

Las resinas epóxicas y sus endurecedores son productos químicos y por lo tanto deben seguirse las precauciones de manejo indicados por el fabricante.

➤ SEGURIDAD

El endurecedor es corrosivo y pueden causar irritaciones severas en la piel y en los ojos. No haga contacto con los ojos, piel y la ropa. No inhale vapores.

Mantenga el recipiente bien cerrado cuando no lo esté usando o durante el transporte.

Si se presenta contacto con:

Ojos: Lávese inmediatamente con agua por un tiempo no menor a 15 minutos.

Piel: Lávese inmediatamente y en forma abundante con agua y jabón.

Inhalación: Salga inmediatamente a un sitio donde haya aire fresco. Suministre oxígeno si hay dificultad para respirar.

Ingestión: Si la persona está consciente, suministre abundante agua. Acuda inmediatamente al médico.

Nota: Los datos contemplados en esta ficha técnica han sido realizados bajo condiciones estándar a nivel de laboratorio. Se pueden presentar algunos cambios debido a variaciones de humedad o temperatura al momento de la aplicación; por lo tanto siempre se recomienda hacer ensayos previos y representativos para asegurar resultados exitosos en campo.

Es una política de COLQUIMICOS asegurar la calidad constante de sus productos, pero no se asume ninguna responsabilidad por los resultados no exitosos, debido al empleo inadecuado de los productos o a una inadecuada aplicación de los mismos.

Última actualización: Septiembre 2013.

Colrepol 6090A – 1956B Ag.

ANEXO 2 NORMAS

ASTM D3039/D3039M – 17

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: D3039/D3039M – 17

Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D3039/D3039M; 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 approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

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

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, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.4 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- D792 Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement
- D883 Terminology Relating to Plastics
- D2584 Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins

¹ 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 Oct. 15, 2017. Published November 2017. Originally approved in 1971. Last previous edition approved in 2014 as D3039/D3039M – 14. DOI: 10.1520/D3039-17.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

- D2734 Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics
- D3171 Test Methods for Constituent Content of Composite Materials
- D3878 Terminology for Composite Materials
- D5229/D5229M Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials
- E4 Practices for Force Verification of Testing Machines
- E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing
- E83 Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems
- E111 Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus
- E122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process
- E132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature
- E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods
- E251 Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages
- E456 Terminology Relating to Quality and Statistics
- E1012 Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application
- E1237 Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D3878 defines terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology D883 defines terms relating to plastics. Terminology E6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E456 and Practice E177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D3878 shall have precedence over the other standards.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *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 dimensions, shown within square brackets: [M] for mass, [L] for length, [T] for time, [Θ] for thermodynamic temperature,

and $[\text{nd}]$ 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.

3.2.2 *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.

3.2.3 *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.

3.2.4 *transition strain, $\epsilon^{\text{transition}} [\text{nd}]$, 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.

3.2.4.1 *Discussion*—Many filamentary composite materials show essentially bilinear behavior during force application, 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 force application and ply delamination.

3.3 Symbols:

A —average cross-sectional area of a coupon.

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

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

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

E —modulus of elasticity in the test direction.

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

F^{ts} —ultimate shear strength in the test direction.

h —coupon thickness.

L_g —extensometer gage length.

L_{min} —minimum required bonded tab length.

n —number of coupons per sample population.

P —force carried by test coupon.

P^f —force carried by test coupon at failure.

P^{max} —maximum force carried by test coupon before failure.

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

w —coupon width.

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

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

δ —extensional displacement.

ϵ —general symbol for strain, whether normal strain or shear strain.

ϵ —indicated normal strain from strain transducer or extensometer.

σ —normal stress.

ν —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 the force. The ultimate strength of the material can be determined from the maximum force 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° plies, the effect is not as significant.

7. Apparatus

7.1 *Micrometers and Calipers*—A micrometer with a 4 to 7 mm [0.16 to 0.28 in] nominal diameter ball interface shall be

used to measure the specimen thickness when at least one surface is irregular (such as the bag-side of a laminate). A micrometer with a 4 to 7 mm [0.16 to 0.28 in.] nominal diameter ball interface or with a flat anvil interface shall be used to measure the specimen thickness when both surfaces are smooth (such as tooled surfaces). A micrometer or caliper, 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 dimensions. For typical specimen geometries, an instrument with an accuracy of ± 0.0025 mm [± 0.0001 in.] is adequate for thickness measurement, while an instrument with an accuracy of ± 0.025 mm [± 0.001 in.] is adequate for width measurement.

7.2 Testing Machine—The testing machine shall be in conformance with Practices E4 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 Force Indicator—The testing machine force-sensing device shall be capable of indicating the total force 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 force with an accuracy over the force range(s) of interest of within $\pm 1\%$ of the indicated value. The force range(s) of interest may be fairly low for modulus evaluation, much higher for strength evaluation, or both, as required.

Note 1—Obtaining precision force data over a large range of interest in the same test, such as when both elastic modulus and ultimate force 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 force 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 E1012 describes bending evaluation guidelines and describes potential sources of misalignment

during tensile testing. In addition to Practice E1012, 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_x) and width plane (B_y) 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 and Eq 2 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. 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

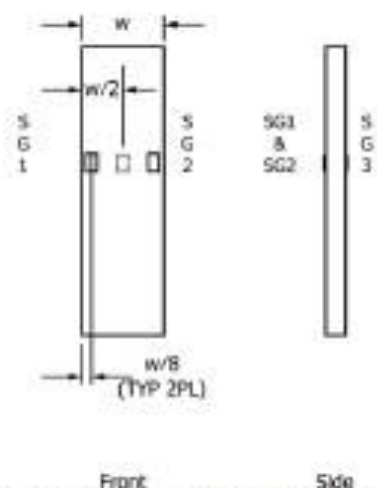


FIG. 1 Gage Locations for System Alignment Check Coupon

in the location near the grip. Concern over modulus data scatter would be reason to evaluate bending strains over the modulus evaluation force 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 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.

$$B_y = \frac{\epsilon_{\text{ave}} - \epsilon_1}{\epsilon_{\text{ave}}} \times 100 \quad (1)$$

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

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, %;
- ϵ_1, ϵ_2 , and ϵ_3 = indicated longitudinal strains displayed by Gages 1, 2, and 3, respectively, of Fig. 1, $\mu\epsilon$; and
- ϵ_{ave} = $((\epsilon_1 + \epsilon_2)/2 + \epsilon_3)/2$

Note 3—Experimental error may be introduced by sources such as poor system alignment, specimen preparation and strain gage precision and calibration. These sources of error may result in an average calculated strain (ϵ_{ave}) of 0, causing B_y and B_z (Eq 1 and Eq 2) to approach infinity as the average calculated strain is the denominator. To minimize the potential for this occurrence during system alignment evaluation, it is recommended that force be applied to the alignment coupon until all three strain gages measure positive strain of no less than 500 $\mu\epsilon$ with an ϵ_{ave} of no less than 1000 $\mu\epsilon$. If these conditions can not be met, the test configuration should be adjusted prior to performing further system alignment evaluation.

7.3 Strain-Indicating Device—Force-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.].³ Gage calibration certification shall comply with Test Methods E251. 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.⁴

7.3.1.1 Surface preparation of fiber-reinforced composites in accordance with Practice E1237 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. 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 Ω 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 14.

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 E83, Class B-1 requirements for the strain range of interest and shall be calibrated over that strain range in accordance with Practice E83. 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 4—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

³ A typical gage would have a 0.25-in. active gage length, 350- Ω resistance, a strain rating of 3 % or better, and the appropriate environmental resistance and thermal coefficient.

⁴ Tuttle, M. E. and Brinson, H. F., "Resistance-Grid 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.

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 E122 should be consulted. Report the method of sampling.

Note 5—If specimens are to undergo environmental conditioning to equilibrium, and size of each 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 General Requirements	Mandatory Shape and Tolerances
8.2.2 Specific Recommendations	Nonmandatory Suggested Dimensions
8.2.3 Detailed Examples	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 force 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

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 ^a
specimen width tolerance	$\pm 1\%$ of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	$\pm 4\%$ 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	$\pm 1\%$ tab thickness
tabs:	
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

^a See 8.2.2 or Table 2 for recommendations.

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.

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.

TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations^a

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, ^b
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	50 [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]	aramy cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	aramy cloth	—	—

^a 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.

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 force 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 must be able to withstand significant compressive forces. Some types of emery cloth have been found ineffective in this application because of disintegration of the abrasive.

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]_ns laminate configuration. The tab material is commonly applied at 45° to the force 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:

$$L_{min} = F^*h/2F^m \quad (3)$$

where:

- L_{min} = minimum required bonded tab length, mm [in.];
- F^{*m} = ultimate tensile strength of coupon material, MPa [psi];
- h = coupon thickness, mm [in.]; and
- F^m = 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 insuffi-

cient 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 them from 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 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 [D792](#). Volume percent of the constituents may be evaluated by one of the matrix digestion procedures of Test Method [D3171](#), or, for certain reinforcement materials such as glass and ceramics, by the matrix burn-off technique of Test Method [D2584](#). The void content equations of Test Methods [D2734](#) are applicable to both Test Method [D2584](#) and the matrix digestion procedures.

8.3.4 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 The recommended pre-test condition is effective moisture equilibrium at a specific relative humidity as established by Test Method [D5229/D5229M](#); however, if the test requestor does not explicitly specify a pre-test conditioning environment, no conditioning is required and the test specimens may be tested as prepared.

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

Note 6—The term moisture, as used in Test Method [D5229/D5229M](#), includes not only the vapor of a liquid and its condensate, but the liquid itself in large quantities, as for immersion.

- DRAWING NOTES**
1. INTERPRET DRAWINGS IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5M-2003, SUBJECT TO THE FOLLOWING:
 2. ALL DIMENSIONS IN HIGHLIGHTS WITH DECIMAL TOLERANCES AS FOLLOWS:
NO DECIMAL .5 .3
 3. ALL ANGLES HAVE TOLERANCE OF $\pm .5^\circ$.
 4. FLY ORIENTATION DIRECTION TOLERANCE RELATIVE TO \perp WITHIN $\pm .5^\circ$.
 5. FINISH ON MACHINED EDGES NOT TO EXCEED 1.6 μ (CONFORMS IN ACCORDANCE WITH ASA B46.1, WITH ROUNDNESS RESO-FIT IN MICROMETRES).
 6. VALUES TO BE PROVIDED FOR THE FOLLOWING, SUBJECT TO ANY RANGES SHOWN ON THE FIELD OF DRAWING: MATERIAL, LAY-UP, FLY ORIENTATION REFERENCE RELATIVE TO \perp , 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.

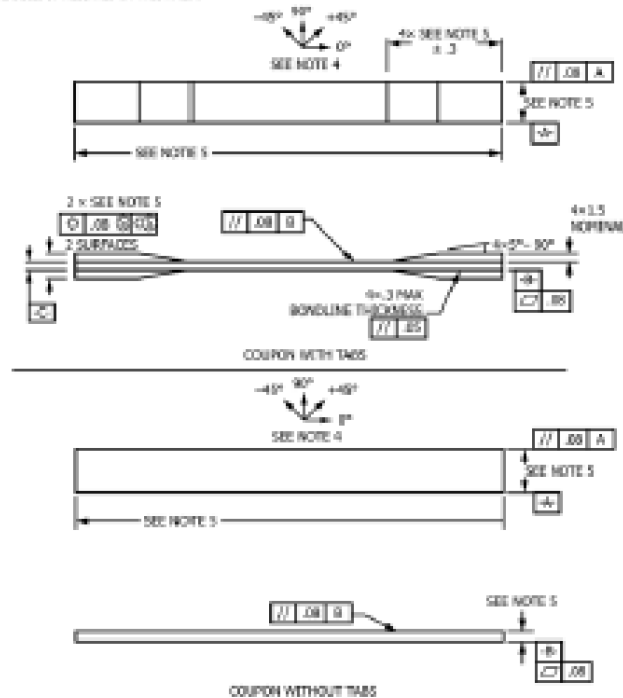


FIG. 2 Tension Test Specimen Drawing (SI)

10.3 If no explicit conditioning process is performed, the specimen conditioning process shall be reported as "unconditioned" and the moisture content as "unknown."

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 7—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.

11.2.2 Following final specimen machining, measure the specimen. The thickness and width shall be measured at three places in the gage section and report the averages of the thickness and width for the calculation of area to the accuracy in 7.1. Determine the specimen area as $A = w \times h$. Record the average area in units of mm^2 (in.^2).

Note 8—The test requester may request that additional measurements be performed after the machined specimens have gone through any conditioning or environmental exposure.

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 force application to maintain a nearly constant strain rate, as measured 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

- DRAWING NOTES:
1. INTERPRET DRAWINGS IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5M-1992, 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 $\overline{0^\circ}$ WITHIN ±.5°.
 5. FINISH ON MACHINED EDGES NOT TO EXCEED 64- $\sqrt{\text{ }}$ (SMOOTHNESS IN ACCORDANCE WITH ASA B46.1, WITH ROUGHNESS HEIGHT IN MICROMETERS.)
 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 $\overline{0^\circ}$, 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.

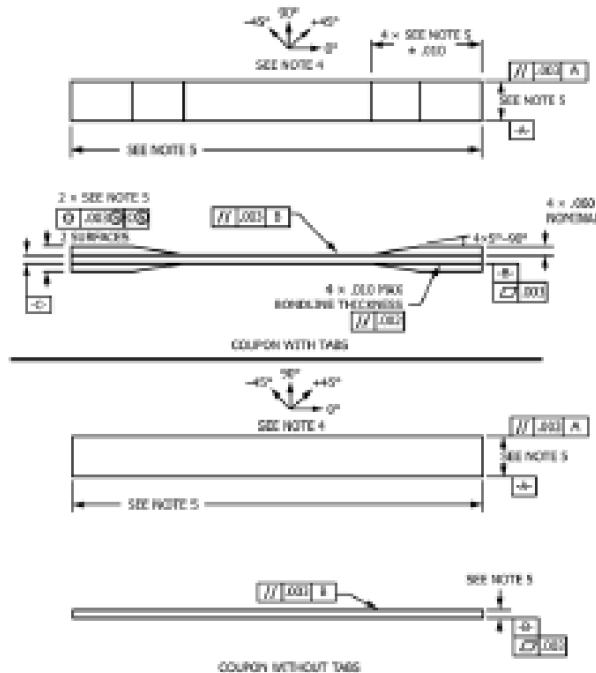


FIG. 3 Tension Test Specimen Drawing (Inch-pound)

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 min^{-1} .

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

Note 9—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 elevated temperature testing of a moist specimen place unre-

alistic 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. In the case where there is no fluid exposure control, the percentage moisture loss of the specimen prior to test completion may be estimated by placing a conditioned traveler coupon of known weight within the test chamber at the same time as the specimen is placed in the chamber. Upon completion of the test, the traveler coupon is removed from the chamber, weighed, and the percentage weight calculated and reported.

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 10—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 emery cloth (suggested grit of 80 to 180) between the specimen faces and the grip jaws (grip-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 30 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 4, 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 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.

$$B_y = \frac{|\epsilon_f - \epsilon_b|}{|\epsilon_f + \epsilon_b|} \quad (4)$$

where:

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

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

11.8 *Data Recording*—Record force versus crosshead displacement (and force versus strain, if extensometers are utilized) continuously or at frequent regular intervals. For this test method, a sampling rate of 2 to 3 data recordings per second, and a target minimum of 100 data points per test are recom-

mended. If a transition region or initial ply failures are noted, record the force, strain, and mode of damage at such points. Record the method used to determine the initial failure (visual, acoustic emission, etc.). If the specimen is to be failed, record the maximum force, the failure force, and the strain (or transducer displacement) at, or as near as possible to, the moment of rupture.

Note 11—Other valuable data that can be useful in understanding testing anomalies and gripping or specimen slipping problems includes force versus head displacement data and force 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.

12. Validation

12.1 Values for ultimate properties shall not be calculated for any specimen that breaks at some obvious flaw, unless such flaw constitutes a variable being studied. Retests shall be performed for any specimen on which values are not calculated.

12.2 *Grip/Tab Failures*—Reexamine the means of force 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.

13. Calculation

13.1 *Tensile Stress/Tensile Strength*—Calculate the ultimate tensile strength using Eq 5 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 6.

$$F^m = P^{max}/A \quad (5)$$

$$\sigma_i = P_i/A \quad (6)$$

where:

- F^m = ultimate tensile strength, MPa [psi];
- P^{max} = maximum force before failure, N [lbf];
- σ_i = tensile stress at *i*th data point, MPa [psi];
- P_i = force at *i*th data point, N [lbf]; and
- A = average cross-sectional area from 11.2.2, mm² [in.²].

13.2 *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 7 and report the results to three significant figures.

$$\epsilon_i = \delta_i/L_g \quad (7)$$

where:

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

13.3 Tensile Modulus of Elasticity:

Note 12—To minimize potential effects of bending it is recommended

TABLE 3 Specimen Alignment and Chord Modulus Calculation Strain Ranges

Tensile Chord Modulus Calculation Longitudinal Strain Range		Longitudinal Strain Checkpoint for Bending
Start Point $\mu\epsilon^a$	End Point $\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$
0000 ^b	3000	2000

^a 0000 $\mu\epsilon$ = 0.001 absolute strain.

^b This strain range is to be combined in the lower half of the stress/strain curve. For materials that fail below 0000 $\mu\epsilon$, a strain range of 25 to 50 % of ultimate is recommended.

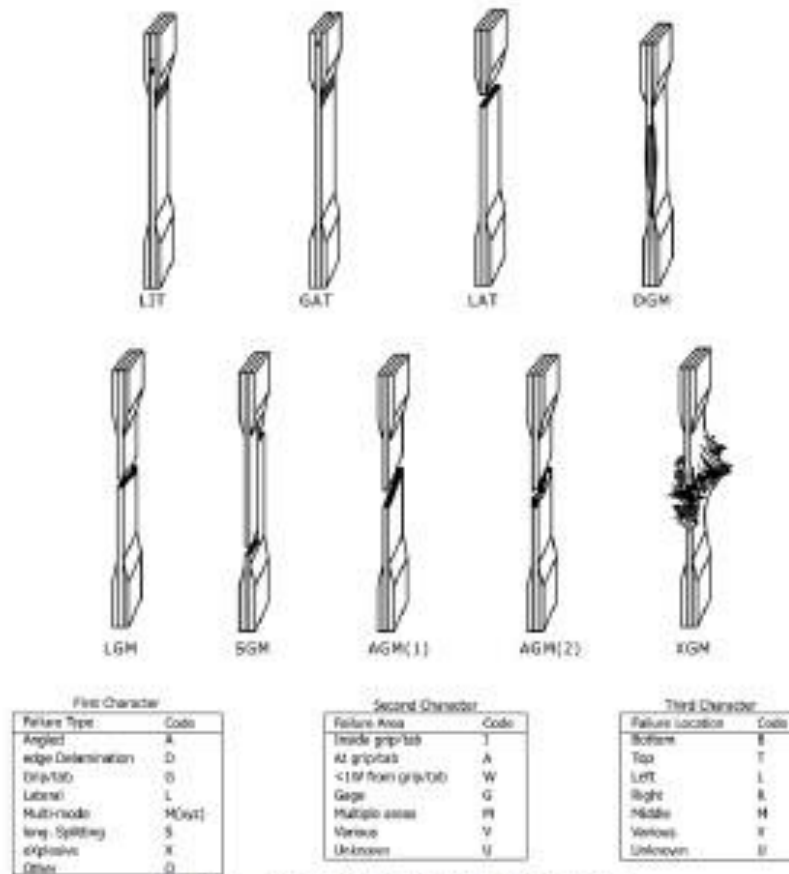


FIG. 4 Tensile Test Failure Codes/Typical Modes

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.

13.3.1 *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 Fig 8. 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.

13.3.1.1 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.

$$E^{\text{chord}} = \Delta\sigma/\Delta\epsilon \quad (8)$$

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).

13.3.2 *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, and the results to three significant figures. Test Method E111 provides additional guidance in the determination of modulus of elasticity.

Note 13—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.

13.4 Poisson's Ratio:

Note 14—If bonded resistance strain gages are being used, the error

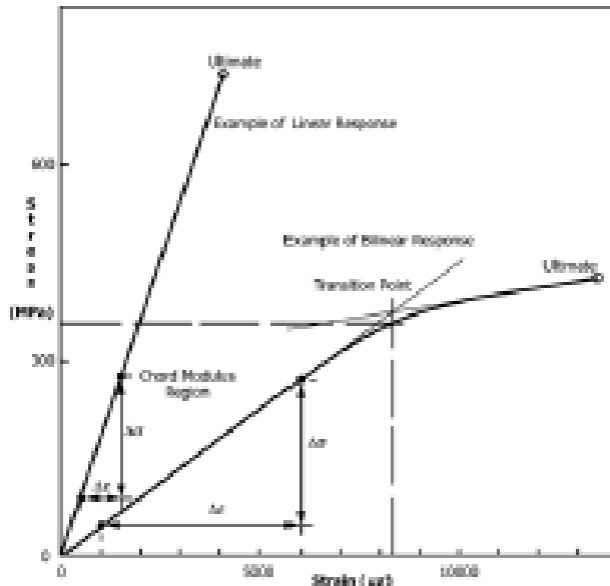


FIG. 5 Typical Tensile Stress-Strain Curves

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.

13.4.1 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 force), ϵ_t , at each of the two longitudinal strains (measured parallel to the applied force), ϵ_l , strain range end points. If data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use the closest available data point. Calculate Poisson's ratio by Eq 9 and report to three significant figures. Also report the strain range used.

$$v = -\Delta\epsilon_t / \Delta\epsilon_l \quad (9)$$

where:

- v = 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).

13.4.2 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 E132 provides additional guidance in the determination of Poisson's ratio.

13.5 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 longi-

tudinal 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.

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

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (10)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n-1)} \quad (11)$$

$$CV = 100 \times s_{n-1} / \bar{x} \quad (12)$$

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.

14. Report

14.1 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):

- 14.1.1 The revision level or date of issue of this test method.
- 14.1.2 The date(s) and location(s) of the test.
- 14.1.3 The name(s) of the test operator(s).
- 14.1.4 Any variations to this test method, anomalies noticed during testing, or equipment problems occurring during testing.
- 14.1.5 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.
- 14.1.6 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.
- 14.1.7 Ply orientation stacking sequence of the laminate.
- 14.1.8 If requested, report density, volume percent reinforcement, and void content test methods, specimen sampling method and geometries, test parameters, and test results.
- 14.1.9 Average ply thickness of the material.
- 14.1.10 Results of any nondestructive evaluation tests.
- 14.1.11 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.
- 14.1.12 Calibration dates and methods for all measurement and test equipment.

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

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

14.1.15 Dimensions of each test specimen.

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

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 Speed of testing.

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

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

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

14.1.24 Percent bending results for each specimen so evaluated.

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

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

14.1.27 Strain range used for chord modulus and Poisson's ratio determination.

14.1.28 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.

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

14.1.30 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.

14.1.31 Individual values of Poisson's ratio, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.32 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.

14.1.33 Individual values of transition strain (if applicable), and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.34 Failure mode and location of failure for each specimen.

15. Precision and Bias⁵

15.1 Precision:

15.1.1 The precision and bias of tension test strength and modulus measurements depend on strict adherence to the Test Method D3039/D3039M and are influenced by mechanical and material factors, specimen preparation, and measurement errors.

15.1.2 Mechanical factors that can affect the test results include: the physical characteristics of the testing machine (stiffness, damping, and mass), accuracy of force application and displacement/strain measurement, speed of force application, alignment of test specimen with applied force, parallelism of the grips, grip pressure, and type of force control (displacement, strain, or force).

15.1.3 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).

15.1.4 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 D3039/D3039M. 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.

15.1.5 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.

15.1.6 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.

⁵ A research report is available from ASTM International Headquarters. Request RR-1330-3005.

TABLE 4 Precision Statistics

Material	\bar{x}	s/\bar{x}	S_L	S_U	$S_L/\bar{x}, \%$	$S_U/\bar{x}, \%$
Strength, lbf						
A	342.06	0.46	10.60	12.70	3.12	3.73
B	8.52	0.52	0.85	0.92	6.04	10.84
C	156.37	3.04	10.05	10.05	6.94	6.94
F	66.16	3.20	1.52	2.40	2.30	3.63
G	121.52	1.59	3.02	3.02	3.23	3.23
Modulus, Msi						
A	25.57	0.05	0.03	0.06	2.00	3.00
B	1.30	0.05	0.04	0.06	3.12	4.57
C	12.36	0.29	0.37	0.44	2.98	3.54
F	3.85	0.06	0.04	0.06	1.01	2.28
G	9.47	0.16	0.12	0.20	1.29	2.00
Failure Strain, %						
A	1.36	0.06	0.07	0.09	4.95	6.15
B	0.06	0.04	0.03	0.06	12.47	13.00
C	1.29	0.03	0.06	0.06	5.25	5.27
F	2.04	0.15	0.07	0.16	3.19	8.00
G	1.27	0.03	0.05	0.05	3.83	4.13

15.1.7 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.⁴ Table 4 presents the precision statistics generated from this study as defined in Practice E691 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 4 are defined as:

- A M-G2601-6 uni-tape (0°)
- B M-G2601-6 uni-tape (90°)
- C M-G2601-6 uni-tape (90°)
- F Glass/epoxy fabric (7781 glass/Ciba H 7376 Epoxy) warp aligned
- G Carbon/epoxy fabric (66108 carbon/Ciba H 6376)

15.1.8 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

TABLE 5 Averages of the Coefficients of Variation

Parameter	Average of S_r/X , %	Average of S_R/X , %
Strength	5.11	6.00
Modulus	2.22	3.22
Failure strain	5.94	7.32

ity (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.

15.1.9 The consistency of agreement for repeated tests of the same material is dependent on lay-up configuration, material and specimen preparation techniques, test conditions, and measurements of the tension test parameters.

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

16. Keywords

16.1 composite materials; modulus of elasticity; Poisson's ratio; tensile properties; tensile strength

⁴ International Harmonization of Composite Materials—Phase 1: Harmonization of ASTM D3039/D3039M and ISO 527-5, Final Report, ASTM Institute for Standards Research, April 1987.

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 Bar Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2852, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9885 (phone), 610-832-9855 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy this standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com>

ASTM D7264/D7264M – 21

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: D7264/D7264M – 21

Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D7264/D7264M; 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 approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

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 D6272, 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 *Units*—The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system are not necessarily exact equivalents; therefore, to ensure conformance with the standard, each system shall be used independently of the other, and values from the two systems shall not be combined.

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, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.5 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D790 Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

D792 Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement

D883 Terminology Relating to Plastics

D2344/D2344M Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates

D2584 Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins

D2734 Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics

D3171 Test Methods for Constituent Content of Composite Materials

D3878 Terminology for Composite Materials

D5229/D5229M Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials

D5687/D5687M Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation

D6272 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending

D6856 Guide for Testing Fabric-Reinforced “Textile” Composite Materials

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

E122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process

E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E456 Terminology Relating to Quality and Statistics

2.2 Other Documents:³

ANSI Y14.5-1999 Dimensioning and Tolerancing—Includes Inch and Metric

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Laminas and Laminates Test Methods.

Current edition approved Jan. 1, 2021. Published February 2021. Originally approved in 2006. Last previous edition approved in 2015 as D7264/D7264M – 15. DOI: 10.1520/D7264-D7264M-21.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

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

ANSI B46.1-1995 Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D3878 defines the terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology D883 defines terms relating to plastics. Terminology E6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E456 and Practice E177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D3878 shall have precedence over the other documents.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *flexural modulus, E_f* —the ratio of stress range to corresponding strain range for a test specimen loaded in flexure.

3.2.2 *flexural strength, σ_f* —the maximum stress at the outer surface of a flexure test specimen corresponding to the peak applied force prior to flexural failure.

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
- δ = mid-span deflection of the specimen
- c = strain at the outer surface at mid-span of the specimen
- σ = 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).

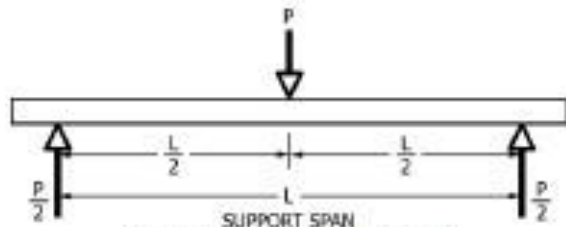


FIG. 1 Procedure A—Loading Diagram

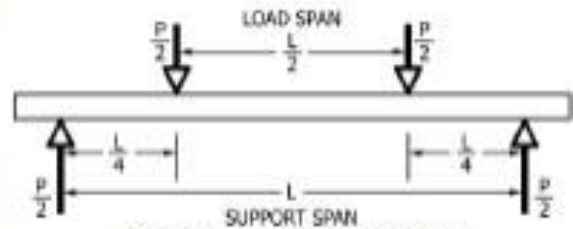


FIG. 2 Procedure B—Loading Diagram

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 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 D2344/D2344M.

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 D790 (a plastics-focused method covering three-point flexure) and D6272 (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 D2344/D2344M.

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 or testing environments, or both, and rate of straining. When evaluating several datasets, these parameters shall be equivalent for all data in the comparison.

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.

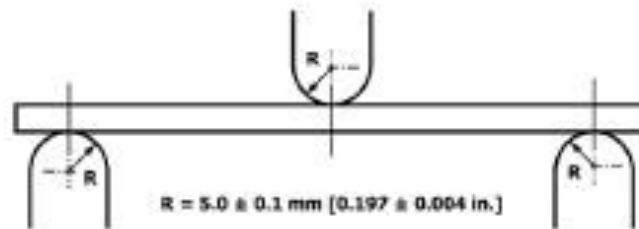
6.3 The calculation of the flexural properties in Section 13 of this standard is based on beam theory, while the specimens in general may be described as plates. The differences may in some cases be significant, particularly for laminates containing a large number of plies in the $\pm 45^\circ$ direction.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

6.4 Loading noses shall 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 shall 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.

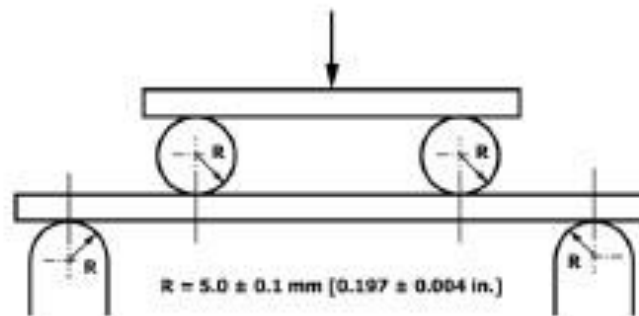
7. Apparatus

7.1 *Testing Machine*—The testing machine shall be properly calibrated and operate at a constant rate of crosshead motion with the error in the force application system not exceeding $\pm 1\%$ 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 E4.

7.2 *Loading Noses and Supports*—The loading noses and supports shall have cylindrical contact surfaces with a hardness ≥ 55 HRC and shall have finely ground surfaces free of



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)

indentation and burrs, with all sharp edges relieved. The radii of the loading nose and supports shall be 5.0 ± 0.1 mm [0.197 ± 0.004 in.], as shown in Fig. 3, unless otherwise specified or agreed upon between the interested parties. Loading noses and supports shall be arranged in a fixed, rotatable, or rolling arrangement. Typically, with composites, rotatable or fixed arrangements are used.

7.3 *Micrometers and Calipers*—For width and thickness measurements, the micrometers shall use a 4 to 8 mm [0.16 to 0.32 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 use of alternative measurement devices is permitted if specified (or agreed to) by the test requestor and reported by the testing laboratory. 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 ± 0.02 mm [± 0.001 in.] is adequate for thickness and width measurement, while an instrument with an accuracy of ± 0.1 mm [± 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 ± 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 ± 3 °C [± 5 °F] and the required vapor level to within ± 3 % relative humidity, as outlined in Test Method D5229/

D5229M. 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 ± 3 °C [± 5 °F] and the required vapor level to within ± 5 % relative humidity.

8. Test Specimens

8.1 *Specimen Preparation*—Guide D5687/D5687M provides recommended specimen preparation practices and shall 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 D6856. 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 shall not

DRAWING NOTES:

1. DRAWING INTERPRETATION PER ANSI Y14.5-1999 AND ANSI B46.1-1995.
2. SEE 8.2 AND 11.3 OF THIS TEST STANDARD FOR THE REQUIRED VALUES OF SPAN AND OVERALL LENGTH.

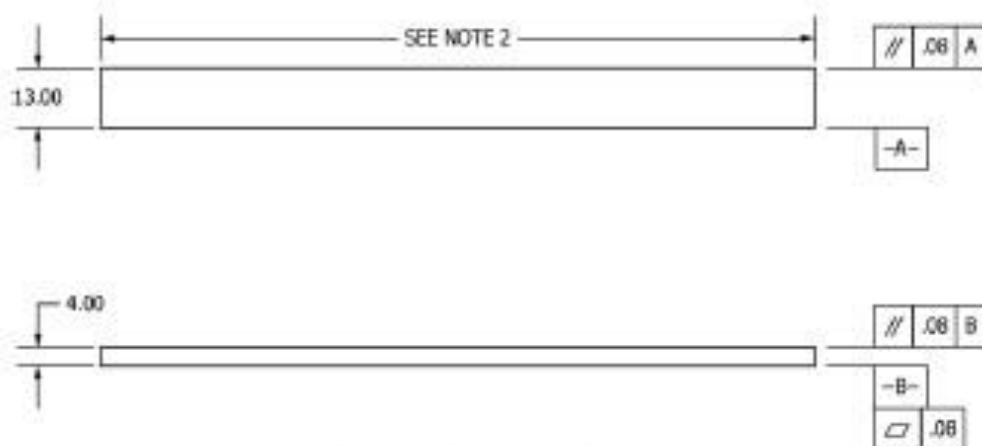


FIG. 4 Standard Flexural Test Specimen Drawing (SI)

DRAWING NOTES:

1. DRAWING INTERPRETATION PER ANSI Y14.5-1999 AND ANSI B46.1-1995.
2. SEE 8.2 AND 11.3 OF THIS TEST STANDARD FOR THE REQUIRED VALUES OF SPAN AND OVERALL LENGTH.

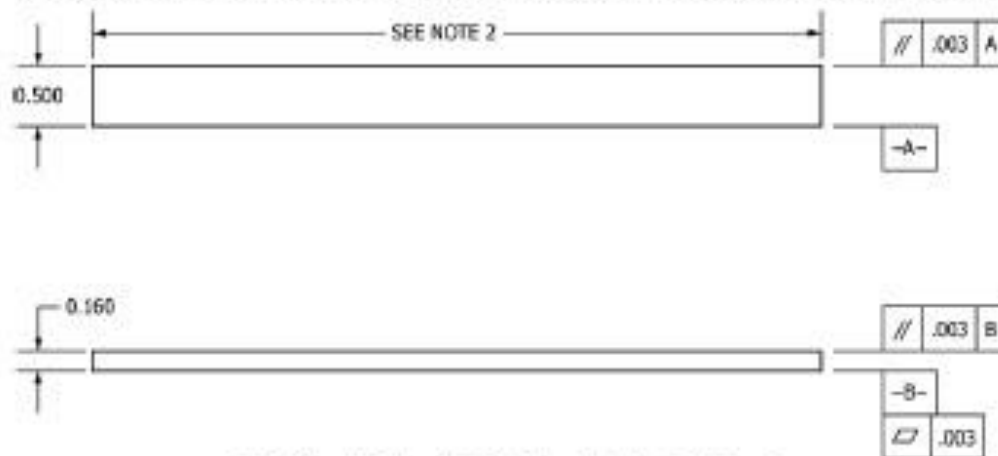


FIG. 5 Standard Flexural Test Specimen Drawing (Inch-Pound)

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 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 test 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.

8.3 If specific gravity, density, reinforcement volume, or void volume are to be reported, then obtain these samples from the same panels as the test samples. Specific gravity and density may be evaluated by means of Test Methods D792. Volume percent of the constituents may be evaluated by one of the matrix digestion procedures of Test Method D3171, or, for certain reinforcement materials such as glass and ceramics, by the matrix burn-off technique of Test Method D2584. Void content may be evaluated from the equations of Test Method D2734 and is applicable to both Test Methods D2584 and D3171.

8.4 *Labeling*—Label the specimens 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. 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 E122 shall 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 D5229/D5229M; however, if the test requester does not explicitly specify a pre-test conditioning environment, conditioning is not required and the test specimens shall be tested as prepared.

Note 4—The term moisture, as used in Test Method D5229/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, b , and thickness, h , at the specimen mid-section, and the specimen length, to the accuracy specified in 7.3.

11.3 Measure the span, L , 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 D790 for Procedure A and Test Method D6272 for Procedure B. The use of an alternative test rate is permitted if specified (or agreed to) by the test requestor and reported by the testing laboratory.

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) shall 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 test compensation (see Annex A2) adjustment must be made. This test 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 shall be calculated for any point on the load-deflection curve by the following equation (Note 6):

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

where:

- σ = 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

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

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.⁴ 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 ½ 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 shall be calculated for any point on the load-deflection curve by the following equation (Note 7):

$$\sigma = \frac{3PL}{4bh^2} \quad (2)$$

where:

- σ = 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
- 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 shall 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 shall be calculated as follows:

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

where:

- ϵ = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.],
- δ = 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 shall be calculated as follows:

$$\epsilon = \frac{48\delta h}{11L^2} \quad (4)$$

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

where:

- δ = mid-span deflection, mm [in.],
- ϵ = 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.⁵ 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:

⁵ 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, 1976, pp. 228-262.

$$E_f^{meas} = \frac{11L^3m}{64bh^3} \quad (7)$$

where E_f^{meas} , m , L , b , and h are the same as defined 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 shall 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:

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

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

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

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.

14. Report

14.1 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 of panel fabrication parameters, shall be the responsibility of the requestor):

- 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.

14.1.3.5 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

ANNEXES

(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.

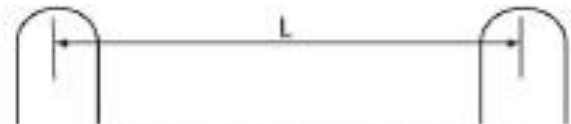


FIG. A1.1 Markings on Fixed Specimen Supports



FIG. A1.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

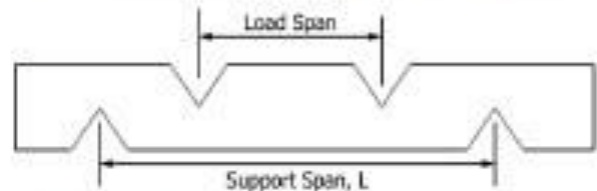


FIG. A1.3 Fixture Used to Align Loading Noses and Supports

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').

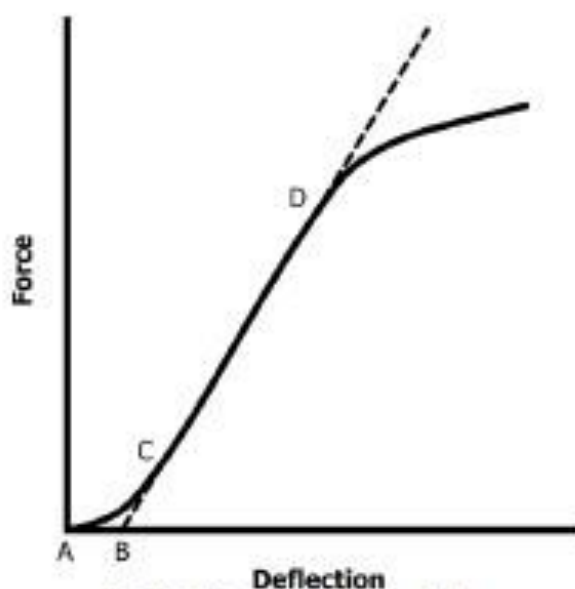


FIG. A2.1 Material with a Hookean Region

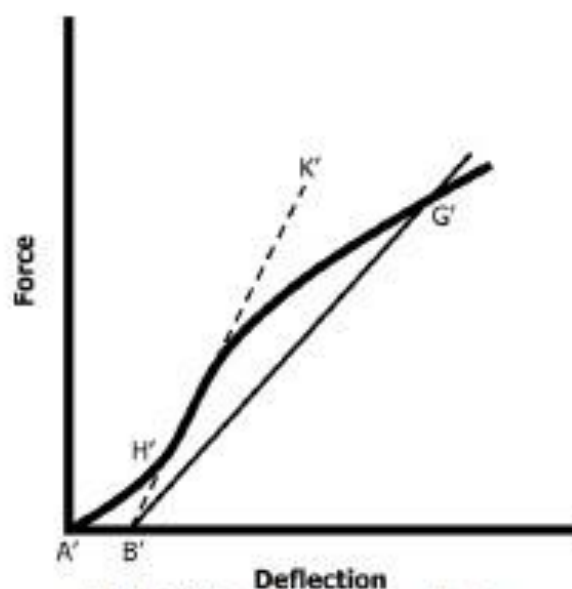


FIG. A2.2 Material without a Hookean Region

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 19380-2855, 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). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com>

ANEXO 3

RECOMENACIONES

Realizar estudios posteriores que permitan escalar el proceso a nivel piloto o escala industrial.

Realizar estudios posteriores que permitan evaluar la utilidad de las probetas con fines comerciales.

Estudiar la posibilidad de emplear un componente que refuerce la matriz de las probetas con el fin de encontrar una aplicabilidad a nivel industrial.

Es importante definir las condiciones de elaboración y proporciones adecuadas para la elaboración de las probetas, con el fin de evaluar las de mejor condición estructural.

Para la realización de los ensayos, se sugiere utilizar instrumentación digital para mejorar la precisión de la toma de los datos.

Es de suma importancia contar con los equipos y espacios adecuados para cada uno de los ensayos propuestos, garantizando la correcta ejecución del mismo.