

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE MATERIAL
COMPUESTO CON MATRIZ DE POLIURETANO TERMOFUSIBLE REACTIVO Y UN
REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO

HEYDER CAMILO ALVAREZ RUBIANO

CAROL JULIET MORENO ARISTIZABAL

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA

2020

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE MATERIAL
COMPUESTO CON MATRIZ DE POLIURETANO TERMOFUSIBLE REACTIVO Y UN
REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO

HEYDER CAMILO ALVAREZ RUBIANO

CAROL JULIET MORENO ARISTIZABAL

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DIRECTOR: JOSÉ LUDDEY MARULANDA AREVALO
DOCENTE

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN:

FIRMA DE PRESIDENTE DE
JURADO

FIRMA DEL JURADO

CONTENIDO

RESUMEN.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivo general.....	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3. MARCO TEÓRICO	9
3.1 Clasificación de los materiales compuestos	10
3.2 Clasificación según el tipo de matriz.....	11
3.3 Matrices poliméricas.....	11
3.4 Clasificación según el tipo de refuerzo.....	14
3.5 Fibras de refuerzo.....	15
3.6 Fibra de vidrio	16
3.7 Hotmelts.....	19
4. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS	21
4.1 Materiales.....	21
4.2 Equipos.....	22
4.3 Diseño y construcción de molde	25
4.4 Elaboración y mecanizado de probetas	26
4.4.1 Elaboración de láminas de material compuesto.....	26
4.4.1.1 Calentamiento.....	26
4.4.1.2 Moldeo.....	28
4.4.1.3 Enfriamiento – Curado	29
4.4.1.4 Determinación de porcentajes de refuerzo.	29
4.4.2 Normalización de probetas	30
4.5 Desarrollo de pruebas y ensayos.....	32
4.5.1 Ensayo a tracción.....	32
4.5.2 Ensayo de flexión.....	33
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	35
5.1 Ensayo de flexión a tres puntos.....	35
5.2 Ensayo de tracción.....	37
5.3 Aplicaciones.....	41
6. CONCLUSIONES.....	45
7. BIBLIOGRAFÍA	46

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1– Clasificación amplia de los materiales compuestos.	9
Ilustración 2 - Representación esquemática y geométrica de partículas de refuerzo en un tipo de matriz.....	10
Ilustración 3 - Estructura molecular de los termoplásticos.....	12
Ilustración 4– Refuerzos discontinuos.	14
Ilustración 5– Refuerzos continuos.	15
Ilustración 6 - Representación bidimensional de la estructura red poliédrica de la fibra de vidrio.....	17
Ilustración 7– Horno de atmósfera controlada.	23
Ilustración 8– Balanza digital ADAM Modelo PGL 2002.	24
Ilustración 9– Máquina universal de ensayos VEB modelo 282/80.....	24
Ilustración 10– Dimensiones molde de teflón en centímetros.	25
Ilustración 11– Molde de teflón.	26
Ilustración 12– Presentación del adhesivo termofusible.	27
Ilustración 13– Fibras de Vidrio Alineadas..	28
Ilustración 14– Imperfecciones superficiales en la matriz.	29
Ilustración 15– Lámina con extremos eliminados.....	31
Ilustración 16– Dimensiones de corte de láminas (medidas en milímetros).	31
Ilustración 17– Rotura de probeta en ensayo de tracción.....	32
Ilustración 18 – Esquema ensayo de tensión.....	33
Ilustración 19 – Resistencia a flexión Vs porcentaje de fibra.	36
Ilustración 20 – Resistencia a flexión Vs porcentaje de fibra corta.	37
Ilustración 21– Esfuerzo máximo a tracción Vs porcentaje de fibra.....	38
Ilustración 22 – Deformación vs porcentaje de fibra.....	39
Ilustración 23 – Módulo de elasticidad a tracción vs porcentaje de fibra.	40
Ilustración 24 -Curvas esfuerzo Vs deformación, fibra larga alineada.....	40
Ilustración 25 - Curvas esfuerzo Vs deformación fibra corta alineada al azar.....	41
Ilustración 26- Esfuerzo máximo vs contenido de fibra de fique y vidrio..	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1– Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio.	19
Tabla 2– Propiedades de poliuretano reactivo.	22
Tabla 3– Tiempos de Fusión del Poliuretano Reactivo para un volumen de 250 ml.	27
Tabla 4– Cantidad y Porcentaje de Fibra por Lote.	30
Tabla 5– Resultados ensayo a tracción.	33
Tabla 6 – Valores de Esfuerzos a Diferentes Porcentajes de Fibra.	35
Tabla 7 – Propiedades matriz poliéster con fibra de vidrio al 30%.	44

RESUMEN

El presente proyecto buscó elaborar y caracterizar probetas de material compuesto con matriz de poliuretano reactivo y refuerzo de fibra de vidrio.

Para la elaboración de las probetas, se llevan a cabo varias etapas, una de ellas es la preparación de la fibra, desarmándola de una presentación tejida inicialmente a una de fibra larga unidireccional con 22 cm de longitud aproximadamente y fibra corta de 3 cm de longitud. Se funde la matriz de poliuretano termofusible reactivo en las instalaciones del centro de consultoría en ensayos no destructivos (CECEND) de la Universidad Tecnológica de Pereira y se procede a realizar distintos especímenes con el fin de estudiar cual presentaba mejores características; se obtienen cuatro lotes de probetas de fibra larga unidireccional, con proporciones de 2%, 11%, 18% y 26% en relación en peso respectivamente, de igual manera se construyen dos lotes de probetas con fibra corta con orientación al azar con una relación en peso de 12% y 15% respectivamente. De dichos lotes se obtuvieron probetas para ensayar a tensión y flexión en las instalaciones del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira, bajo las normas ASTM D7264/D para flexión, y ASTM D3039/D para tracción.

En los ensayos de tensión se determina que la fibra larga posee mejores propiedades mecánicas que la fibra corta, al tener una mejor adherencia a la matriz y presentar menos imperfecciones, al igual que para ambas disposiciones de la fibra a medida que aumenta el porcentaje de fibra también lo hace el esfuerzo máximo a la tensión.

Para el caso del ensayo a flexión, al igual que en el ensayo a tensión el lamina reforzado con fibra larga obtiene mejores propiedades que el reforzado con fibra al azar, sin embargo el máximo de esfuerzo a flexión se presenta cuando el porcentaje de fibra es de 18%.

Se recomienda seguir estudiando este tipo de matriz con diferentes refuerzos, ya que en los ensayos de flexión las probetas no rompen y recuperan su estado inicial.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la humanidad desde aspectos tan diversos como sociales, culturales y técnicos ha sido influenciado de manera directa por el descubrimiento de nuevos materiales y formas de construcción. El concepto de material compuesto posee más antigüedad de la que se pensaría, ya que este se observaba y/o utilizaba inconscientemente, ya fuese en la construcción de viviendas utilizando refuerzos de adobe y paja, o por el contrario en materiales comunes como la madera en la cual las fibras se unen con un refuerzo de lignina. Partiendo de ello se puede definir un material compuesto como aquella unión no química de dos o más materiales ordinarios, con el fin de obtener un nuevo agregado que posea mejores propiedades mecánicas que las particulares de los otros materiales utilizados en la creación de éste. El objetivo principal de construir materiales compuestos es obtener propiedades mecánicas que no alcanzaría ninguno de los constituyentes de éste por sí solo.

Por otra parte el uso de materiales compuestos posee un mayor auge en la industria aeroespacial y naval, aunque actualmente debido a sus excelentes propiedades son usados en la fabricación de artículos deportivos, industrias de transporte, electrodomésticos, biomateriales entre otras aplicaciones. En los materiales compuestos se pueden identificar dos fases o componentes principales, una fase discontinua más rígida llamada refuerzo y otra fase continua, generalmente menos rígida llamada matriz, algunos autores aluden una tercera fase llamada interface, la cual se encuentra comprendida entre las dos anteriormente mencionadas. El refuerzo al ser la del componente más rígido es el encargado de absorber las tensiones, aumentar la rigidez y la resistencia del conjunto, mientras que la matriz se encarga de dar estabilidad al conjunto transfiriendo las cargas al refuerzo, actuar como fijador al mantener las fibras del refuerzo en su posición, proteger al refuerzo de cualquier deterioro que se presente en el exterior y evitar la propagación de grietas.

Cuando se habla de la clasificación de los materiales compuestos, resulta ser un poco complejo, ya que estos pueden catalogarse tanto por su tipo de refuerzo como por su matriz. Cuando los catalogamos en cuanto al refuerzo se habla de refuerzos continuos, discontinuos y fibras, mientras que de por su matriz se dividen en tres tipos: matriz orgánica o polimérica, matriz metálica y matriz cerámica. En el presente trabajo se pretende elaborar probetas con matriz polimérica o plástica, más específicamente con poliuretano reactivo y un refuerzo de fibra de vidrio con diferentes disposiciones.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Elaborar y caracterizar probetas de material compuesto con matriz de poliuretano reactivo y refuerzo de fibra de vidrio.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar mecánicamente las probetas de material compuesto por medio de ensayos de tensión y flexión.
- Estudiar la interfase matriz-refuerzo generada a partir de la creación de las probetas de material compuesto por una matriz de poliuretano reactivo y un refuerzo de fibra de vidrio.
- Analizar las propiedades mecánicas de las probetas de ensayo, para determinar posteriormente posibles aplicaciones en la industria.

3. MARCO TEÓRICO

A través de la historia diferentes autores han brindado importantes definiciones acerca del concepto de material compuesto, concluyendo la mayoría en que “un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes, de manera que presenta la mejor combinación posible” [1], dichas fases anteriormente mencionadas, no deben disolverse ni fusionarse una en otra completamente, puesto que en esta familia de materiales las fases son visibles debido a que no se presenta una unión química para así lograr un efecto sinérgico, por lo tanto las propiedades del material dependen de la orientación del refuerzo y estas mismas varían ya que a lo largo del volumen del material se pueden presentar diferentes formas y una mayor o menor cantidad del constituyente de las fases. Las fases presentes en los materiales compuestos son tres, una primera fase llamada matriz la cual se caracteriza por ser continua en todo el volumen del material, actuando como ligante al encargarse de mantener el refuerzo en la posición indicada, una segunda fase llamada refuerzo la cual es discontinua a lo largo del volumen del material, puesto que es el elemento resistente en la unión y dependiendo la disposición de este se alteran algunas de las propiedades mecánicas del compuesto, por último algunos autores hablan de la existencia de una tercera fase que hace referencia al estado comprendido entre las anteriormente mencionadas y es llamada interfase, cuya importancia radica en el estudio de la interacción refuerzo - matriz. [1]

	Ejemplos
Materiales compuestos naturales	Madera Hueso Bambú Músculos y otros tejidos
Materiales microcompuestos	Aleaciones metálicas: p. ej. aceros Termoplásticos endurecidos: p. ej. poliestireno de impacto, ABS. Hojas para moldeo continuo (SMC) Termoplásticos reforzados
Macrocomposites (Productos ingenieriles)	Acero galvanizado Vigas de hormigón armado Palas de helicópteros Esquís

Ilustración 1– Clasificación amplia de los materiales compuestos. Fuente:

Hull, D., (2003), *An introduction to Composites Materials*, Barcelona, España: Editorial

Reverté S.A

Es importante resaltar que el objetivo de construir materiales compuestos radica en obtener un compuesto que proporcione una alta resistencia mecánica acompañada a su vez por un peso mucho menor al ofrecido por otro tipo de especímenes particulares, regido por el principio de acción combinada, por dicha razón la combinación de refuerzos y matrices debe estar alineada de acuerdo a este principio. La combinación de diversos tipos de matrices y refuerzos siempre está orientada a suplir alguna necesidad específica, puesto que todas las propiedades mecánicas no se mejoran en conjunto al crear un nuevo compuesto, en la mayoría de los casos algunas de las propiedades mecánicas se mejoran en detrimento de las restantes. Las principales propiedades que buscan mejorarse al dar paso a un nuevo compuesto suelen ser: resistencia, rigidez, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, peso, resistencia a la fatiga, comportamiento respecto a la temperatura, aislamiento acústico, aislamiento y conductividad térmica. La demanda de materiales actualmente tiende a exigir mejores relaciones en cuanto resistencia/peso y rigidez/peso, dándole un mayor auge a los compuestos elaborados a partir de matrices poliméricas, ya que su uso está destinado a la industria aeronáutica y automotriz, sectores que requieren materiales muy sensibles al peso y la resistencia. [2]

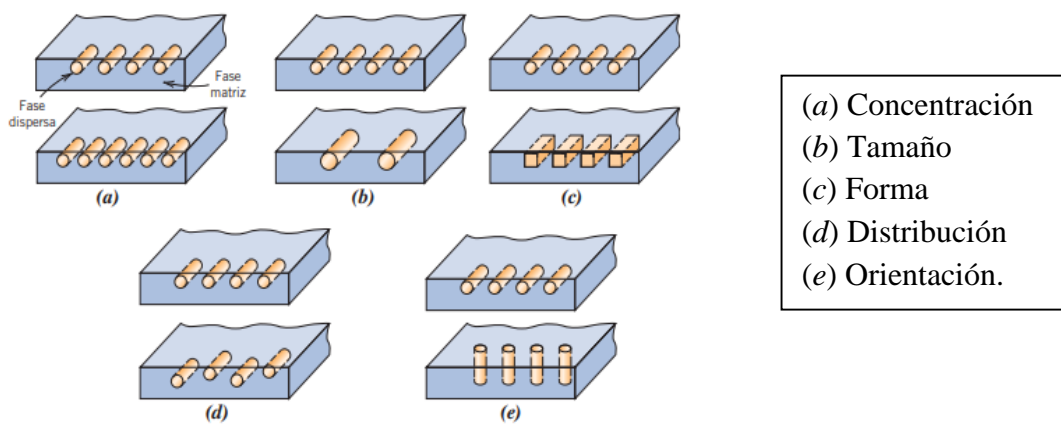


Ilustración 2 - Representación esquemática y geométrica de partículas de refuerzo en un tipo de matriz. Fuente:

Flinn, R. A; Trojan P. K. (1994), *Engineering materials and their applications*, Editorial Wiley.

3.1 Clasificación de los materiales compuestos

Los materiales compuestos se pueden clasificar según su tipo de matriz o según su tipo de refuerzo, cuando se habla de la clasificación según su matriz los materiales compuestos pueden ser de matriz metálica, cerámica o polimérica. Todos los tipos de materiales pueden

estar compuestos por refuerzos continuos, discontinuos o en forma de partículas, variando dichas disposiciones se pueden obtener distintas propiedades mecánicas a lo largo del compuesto.

3.2 Clasificación según el tipo de matriz

Los materiales compuestos con matriz metálica (MMC) se caracterizan por poseer una alta resistencia y un peso muy bajo, los materiales compuestos con matriz cerámica (CMC) a diferencia de los materiales cerámicos comunes poseen alta tenacidad y resistencia en rangos de bajas temperaturas, este tipo de matrices es muy afín a ser reforzada con carburos de silicio y óxido de aluminio; por último los materiales compuestos con matriz polimérica tendrán un mayor énfasis en este escrito debido a que son el objeto de estudio del trabajo, este tipo de matriz es de gran importancia en gran variedad de industrias, debido a las ventajas que ofrece con respecto a otros tipos de matrices, la principal ventaja radica en que no hay presencia del fenómeno corrosivo debido a la ausencia de óxidos de hierro que reaccionan al entrar en contacto con un ambiente rico en oxígeno. Este tipo de compuestos en especial pueden ser moldeados en diversas formas debido a la composición de su matriz, en la mayoría de los casos se suelen utilizar fibras orgánicas o inorgánicas para actuar como refuerzo en estos compuestos. Dentro de este tipo de materiales destacan los compuestos por matriz termoestable y los compuestos por matriz termoplástica, debido a que son los que se usan con mayor frecuencia en la industria. [3]

3.3 Matrices poliméricas

Tal como afirma Besednjak (2005, p, 21), a grandes rasgos resulta complejo establecer una clasificación para la matrices poliméricas, ya que dependiendo sus características se pueden establecer muchas de ellas, la más general podría establecerse por la forma de obtención de la matriz, dando paso a polímeros naturales y sintéticos, haciendo referencia al primer caso polímeros como el caucho natural, la celulosa, la seda, entre otras, mientras que si nos referimos a polímeros sintéticos se puede hacer alusión a compuestos como plásticos, pinturas, recubrimientos, adhesivos, entre otros. De manera más objetiva se puede hablar de una clasificación de las matrices poliméricas basados en el comportamiento térmico del polímero, más específicamente su procesabilidad y comportamiento durante el proceso de formado, basándose en este criterio conjuntamente acogido, se puede hablar de polímeros termoplásticos, elastómeros y termoestables.

Los termoplásticos son el tipo de polímero más utilizado en la fabricación de materiales compuestos, esto debido a las múltiples ventajas que ofrecen; este tipo de polímeros se caracterizan porque se llevan a ciertas temperaturas elevadas para convertirse en fluidos, para de esta manera brindar una mejor moldeabilidad, pudiendo ser adaptado en cualquier tipo de forma que será preservada después del proceso de enfriado y curado. La estructura molecular de los termoplásticos puede ser lineal o ramificada, lo cual es clave para poder fluir en presencia de calor. Algunos de los ejemplos más comerciales de termoplásticos son policarbonatos, polipropilenos, poliamidas, polietilenos y poliuretanos (termoplástico de estudio en este documento) [3].

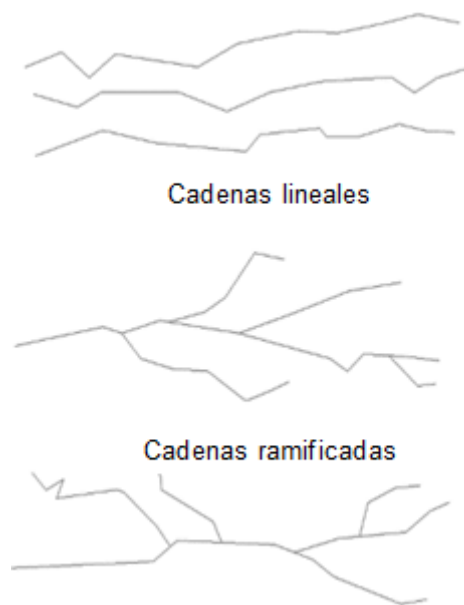


Ilustración 3 - Estructura molecular de los termoplásticos. *Fuente:*

Besednjak A., 2005, *Materiales compuestos, procesos de fabricación de embarcaciones*, Catalunya España, Ediciones UPC.

Los elastómeros son polímeros que poseen estructuras moleculares formadas por cadenas con un alto grado de libertad, convirtiéndolos en compuestos muy flexibles, tienen enlaces dobles a lo largo de la cadena reticulados en pequeños tramos, dando lugar a un estado gomoelástico característico de este tipo de matriz en temperatura ambiente, además son insolubles e infusibles, algunos de los elastómeros más conocidos son el caucho natural y sintético, el caucho de nitrilo, el caucho estireno-butadieno, polibutadieno, entre otros.

Por último, las matrices termoestables, al contrario de los polímeros termoplásticos no fluyen bajo efecto de temperatura, puesto que su estructura molecular entrecruzada promueve la

descomposición química del polímero a altas temperaturas, dando paso a un fenómeno de carbonización, estos compuestos a temperatura ambiente suelen ser duros pero a su vez frágiles. Su estructura molecular entrecruzada es propicia para ser reforzado con cualquier tipo de fibra, supliendo de esta manera algunas de las falencias que presentan en solitario.

Tal como lo afirma Marcovich (1996, p.5), las matrices termoestables ofrecen muchas ventajas respecto a los tipos de matrices anteriormente mencionados, el costo de las mismas ha dado paso a un sinnúmero de técnicas de elaboración de materiales compuestos y más aún diversos tipos de refuerzos, ya sean granulados o fibrosos, tales como madera, fibras naturales, harinas, etc. La composición química de los polímeros termoplásticos permite que estos mejoren sus propiedades de entrecruzamiento al someterse a altas temperaturas, permitiendo formar enlaces en la cadena que permiten una adhesión muy importante entre el refuerzo y la matriz; muchas de las matrices a base de poliéster pueden utilizarse a temperaturas tan altas como 250 °C, pero ofreciendo desventajas tan notorias como la pérdida de propiedades a partir del tiempo. Otra acotación importante en el proceso de formación de matrices poliméricas, son las pérdidas volumétricas surgidas a partir del proceso de curado. Algunos de los tipos de matrices termoestables más utilizadas son las resinas poliéster, epóxicas y termoplásticas, la primera de ellas, se utiliza principalmente en la mayoría de laminados debido a su bajo costo, en su mayoría se refuerzan con vidrio y tienen auge en la industria de la construcción de viviendas, además de aplicaciones en la fabricación de transportes terrestres y marítimos. Los problemas de contracción en las resinas poliéster se contrarrestan con agregados de mezclas termoplásticas, para al final del proceso, contener fibras reforzantes, rellenos minerales en polvo y lubricantes. [4]

El polímero básico de las resinas epóxicas se producen comúnmente por reacciones que involucran epiclorhidrina y bisfenol, a partir de estas resinas se pueden producir una gran variedad de estructuras entrecruzadas que se pueden modificar con posterioridad con diluyentes y/o plastificantes, las propiedades mecánicas obtenidas de las resinas epóxicas son mejores que las obtenidas a partir de las matrices poliéster, los refuerzos se agregan a este tipo de matrices para controlar el fenómeno de la contracción y la resistencia al impacto.

Una matriz polimérica por acción propia no está diseñada para suplir todas las propiedades que ofrecen los aceros convencionales, tales como la dureza, la resistencia al impacto, la temperatura de servicio, la rigidez y resistencia a la tracción, la estabilidad dimensional y

deformación por fluencia; por esta razón se utilizan los refuerzos para subsanar algunas de las deficiencias mencionadas.

3.4 Clasificación según el tipo de refuerzo

Al hablar de la clasificación según el tipo de refuerzo se hace referencia al tipo de disposición geométrica bajo el cual está formado el material compuesto, partiendo de ello se pueden presentar refuerzos discontinuos y refuerzos continuos.

Los refuerzos discontinuos se presentan en diversos tipos, se puede hacer referencia a plaquetas y partículas cuando las dimensiones del refuerzo son las mismas en todas las direcciones, también se puede hacer referencia a refuerzos de fibra corta o fibra discontinua cuando el material tiene una longitud mayor a su sección transversal. Cuando se utilizan refuerzos como partículas, el aumento en las propiedades del material no es muy elevado, esto debido a que el comportamiento del material suele ser isótropo, siendo de los materiales compuestos menos costosos y más fáciles de fabricar. Dependiendo el tipo de partícula se pueden suplir algunos defectos del material, por ejemplo, si se utilizan partículas cerámicas se puede lograr una alta rigidez y buen comportamiento a altas temperaturas, mientras que si por el contrario se refuerza con partículas más dúctiles, se obtendrá un alto grado de tenacidad a la fractura en matrices frágiles. El uso de refuerzos en forma de plaqueta no suele aportar mucha ganancia en cuanto a propiedades mecánicas del material, pero en comparación con los refuerzos en partículas se logra una mayor compactación en el compuesto. Una de las ventajas que ofrece el uso de plaquetas es que es un refuerzo bidimensional, con lo cual se logra obtener igual resistencia en su plano. Por último, cuando se emplean fibras cortas, la longitud de éstas influye demasiado en las propiedades del material, adquiriendo generalmente características anisotrópicas, las propiedades son mejores en la orientación de las fibras. [1, 2]

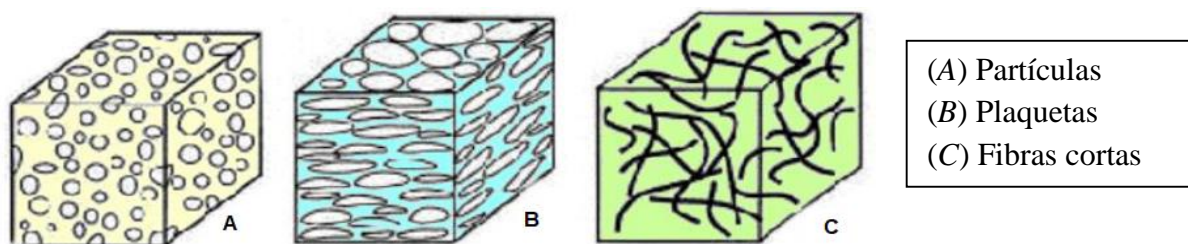


Ilustración 4– Refuerzos discontinuos. *Mendoza, S.M. (2019). Materiales compuestos [Diapositivas]. Fuente:*

http://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/12194/mod_resource/content/0/Unidad%205%20-%20materiales%20compuestos%20-%202019.pdf

Por otra parte, al hablar de refuerzos continuos se tienen diferentes tipos de los mismos, todas variando en la forma del mismo; se presentan refuerzos en forma continua o fibra larga cuando la longitud del refuerzo es mucho mayor que la sección transversal del mismo, por lo general son elementos en forma de hilo, su relación L/D es mayor a 100, siendo L la longitud de la fibra y D el diámetro de la misma, un aumento en la longitud de la fibra es indiferente al cambio de las propiedades del compuesto, puesto que solo se afectaría por un aumento en la cantidad de refuerzo. Los refuerzos laminados están formados por dos o más láminas que poseen dos de sus dimensiones mayores a una tercera, este tipo de refuerzos se componen de un número finito de láminas con diferente orientación, logrando propiedades iguales en toda la longitud del material, cada lámina puede ser un material, ya sea fibra larga, corta o tejidos de dos dimensiones. Por último los refuerzos tejidos hacen referencia a estructuras que reciben el nombre de sándwich y actúan como esqueleto al entrar en contacto con la matriz, a partir de este tipo de refuerzos se obtiene una elevada resistencia a esfuerzos de flexión, a su vez una alta rigidez y una alta capacidad de aislamiento. [5]

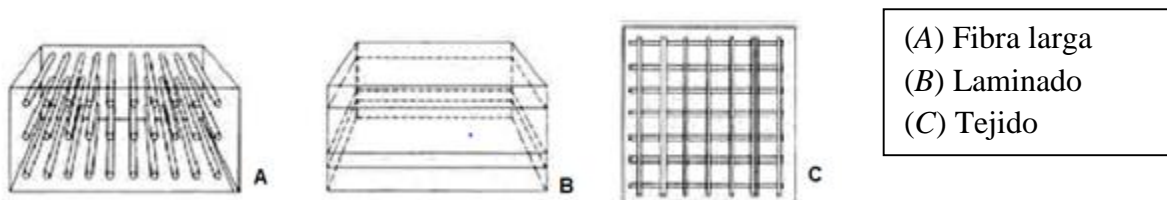


Ilustración 5– Refuerzos continuos. Fuente:

Pérez Alonso, C. (2016). *Naval composites: Los materiales compuestos y la industria naval* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona España.

3.5 Fibras de refuerzo

Tal como afirma Pérez Alonso, C. (2016, p. 19) las fibras por sí solas ya representan un elemento muy resistente, sin embargo su eficiencia no es óptima, por lo tanto resulta necesario combinarlas con cierto tipo de matrices para que se transfieren las cargas y lograr de esta manera un mejor efecto en conjunto. Las fibras son las que aportan resistencia mecánica, rigidez y dureza al material, pero para lograr óptimos parámetros de estas propiedades mecánicas resulta indispensable tener varios aspectos en cuenta, el primero de ellos es la longitud y el diámetro de la fibra, a partir de esto como se había dicho

anteriormente se pueden obtener fibras largas y cortas, de tal manera que cuando se logra una relación L/D (Siendo L la longitud y D el diámetro) grande, la resistencia del compuesto se ve mejorada, por lo tanto se puede anotar que dependiendo el requerimiento del material, si se necesita una resistencia alta es vital usar fibras continuas. La orientación es el segundo factor de peso en la conformación de materiales compuestos, se pueden evidenciar tres orientaciones principales en los materiales compuestos, las cuales son: fibras alineadas continuas, fibras discontinuas y alineadas y por último fibras discontinuas orientadas al azar; el tipo de orientación de los refuerzos está relacionado con un principio fundamental de los materiales compuestos, el cual hace referencia a que estos se pueden diseñar para soportar condiciones de carga diferentes; cuando se diseña con fibras en dos direcciones perpendiculares entre sí, la matriz obtiene buena resistencia en estas direcciones, mientras que si se refuerza con disposiciones más complejas como tejidos entrecruzados a 45, 60 o 90 grados, se obtendrá resistencia en todas las direcciones del entrecruzamiento; también se pueden orientar las fibras en la direcciones donde se tendrán las máximas tensiones, pero para este caso es indispensable realizar ensayos que confirmen que la resistencia del material no cederá ante la resistencia de las cargas. [5]

El tercero de los parámetros hace referencia a la cantidad de refuerzo, una gran cantidad de fibras aumentan la rigidez y resistencia mecánica del compuesto, ya que son los que poseen las propiedades mecánicas del material, sin embargo la literatura recomienda que el volumen de fibra no debe exceder el 80% del total del material, ya que por esto no se logra que las fibras queden envueltas completamente en la matriz y no se dará una transferencia de cargas que es el principal objetivo del refuerzo. Como se ha suscrito anteriormente, el refuerzo es el constituyente que aporta las propiedades al compuesto, por esta razón se deben tener en cuenta las prestaciones que ofrece cada tipo de refuerzo (vidrio, carbono, naturales, sintéticas, etc.) Las propiedades de la matriz también son muy importantes, ya que estas son las que se encargan de mantener el refuerzo en su posición y transferir las cargas que se presenten en el material al mismo, siendo el tipo de matriz más usada la polimérica; es importante resaltar que la matriz se encarga de proporcionar las propiedades químicas, eléctricas y térmicas al laminado final. [5]

3.6 Fibra de vidrio

Según lo indican varios autores, la fibra de vidrio al igual que la fibra de carbono se convierten en los principales refuerzos de materiales con matrices poliméricas, esto debido al

sinfín de características que poseen , las cuales comprenden el bajo costo, la disponibilidad, facilidad de manipulación, propiedades de aislamiento térmico, adherencia matriz-fibra, estabilidad dimensional, resistencia a agentes químicos, propiedades dieléctricas, incombustibilidad, alta resistencia mecánica específica, entre otras la convierten en uno de los más importantes refuerzos al momento de construir materiales compuestos.

Tal como lo afirma Besednjak (2005, p. 40) la fibra de vidrio está constituida principalmente por sílice que se combina con óxidos de alúmina, alcalinos y alcalinotérreos, estos en función de sus cantidades dan lugar a distintas características en la fibra resultante. La fibra de vidrio está compuesta por numerosos filamentos muy finos basados en dióxidos de silicio (SiO_2) que presentan una elevada resistencia mecánica debido a sus enlaces covalentes entre el silicio y los radicales de oxígeno, a partir de esta composición, los átomos integran una red tridimensional con una estructura amorfa, logrando así características isotrópicas a lo largo del volumen del material. Existen dos formas de obtención de fibra de vidrio, la primera es por medio de bolas, la cual consiste en adicionar materias primas como arena, caolinita o dolomita a un horno durante un periodo de tiempo determinado, posterior a varios procesos se obtienen bolas de un diámetro aproximado de 20 mm, las cuales regresan al horno para realizar el proceso de hilado, en el cual si se obtienen por estirado mecánico da lugar a fibras continuas y reciben el nombre de *sillionne*, mientras que se si se obtienen por un estirado por fluido da lugar a fibras discontinuas y reciben el nombre de *verranne*; cabe resaltar que como se ha mencionado anteriormente las propiedades mecánicas de las fibras continuas (*sillionne*) son mucho mejores que las propiedades otorgadas por las fibras discontinuas (*verranne*). [3]



Ilustración 6 - Representación bidimensional de la estructura de la red polidéica de la fibra de vidrio. Fuente:

Hull, D., (2003), *An introduction to Composites Materials*, Barcelona, España: Editorial Reverté S.A

El segundo método para la obtención de fibra de vidrio se llama fusión directa o hilado bajo fusión, el cual consiste en pasar vidrio fundido por agujeros perfectamente dimensionados distribuidos en una superficie de platino, obteniendo monofilamentos de vidrio muy flexibles; el comportamiento de la fibra de vidrio es muy diferente a partir de su fabricación, esto debido a que esta se torna más flexible a medida que disminuye el diámetro del filamento. En el proceso de formación de los hilos se utiliza una técnica que mejora la formación, estirado, enrollado y posterior tejido, la cual recibe el nombre de *ensimaje*, la cual consiste en aplicar un agente de acoplamiento de tipo silano disuelto en agua y aplicado por medio de pulverización a las fibras durante dicho proceso. [1]

Existen distintos tipos de fibra de vidrio, dependiendo de sus componentes:

- Vidrio A (alcalino): muy sensible a la humedad pero tiene buena resistencia al ataque de soluciones químicas y ácidas; alto contenido de sílice
- Vidrio B (boro): alta durabilidad y buenas propiedades eléctricas; alto contenido de borosilicato.
- Vidrio C: (químico): poseen una alta resistencia frente a agentes químicos empleando capas superficiales de laminado, propiedades mecánicas entre vidrio A y E.
- Vidrio D (dieléctrico): muy utilizado para componentes electrónicos y de telecomunicaciones debido a sus propiedades dieléctricas (pérdidas eléctricas muy débiles)
- Vidrio E (eléctrico): es el tipo de fibra más utilizada debido a sus grandes propiedades, tales como alta densidad, resistencia a la humedad, propiedades eléctricas y cualidades de rigidez, resistencia y desgaste.
- Vidrio tipo R o S (Resistencia): se utilizan en campos militares y aeroespaciales, debido a su gran resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (μm)	5 - 13	10 - 20	10	10
Densidad (Kg/m^3)	2500	2580	2480	2590
Modulo de elasticidad (GPa)	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4 - 4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8,6	5	5,1	5

Tabla 1– Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio. *Fuente:*

Reddy, J.N & Miravete, A. (1995), *Practical Analysis of composites laminates*, U.S, editorial CRC press.

3.7 Hotmelts

Tal como afirma Marulanda J. L. (2017, p. 3), al hablar de hotmelts básicamente se está haciendo referencia a productos que se dosifican en caliente, cuyas fórmulas están compuestas en su mayoría por polímeros para proporcionar buena resistencia y adherencia en caliente; se usan principalmente en procesos donde la velocidad de curado juega un papel demasiado importante, ya que no llevan disolventes y solidifican rápidamente, además presentan muy buenas características, tales como altos esfuerzos de adhesión a múltiples sustancias, buena resistencia al calor, química y no envejecen rápidamente, a su vez son fáciles de procesar. Por otra parte se limitan por la dificultad que presentan al penetrar sustratos de baja porosidad o humedecer superficies rugosas, también absorben contaminantes de la superficie y no logran mojar superficies altamente termo-conductoras. [6]

Los adhesivos hotmelt se calientan antes de procesar y se aplican en estado fundido. Cuando el adhesivo se enfría, acumula su fuerza inicial a través de un proceso físico de endurecimiento. Las moléculas de agua (del sustrato o del aire) activan una reacción química que transforma el adhesivo en elastómero. Después de catalizar completamente, los adhesivos hotmelt reactivos ofrecen una unión más fuerte con una resistencia superior a la humedad, al calor y a los productos químicos. Los grupos reactivos en el adhesivo también forman fuertes enlaces químicos (covalentes) con reactivos asociados idóneos en la superficie del sustrato, lo que extiende significativamente la gama de adherencia. Jowat ofrece adhesivos reactivos

hotmelt con base de poliuretano y poliolefina en diversas formas de suministro, así como un nuevo adhesivo sin relleno tipo PUR reactivo de alto desempeño en forma granulada, para las demandas más altas de aspecto y calidad.

4. METODOLOGÍA Y EXPERIMENTOS

En este capítulo se describen los materiales, equipos y metodología utilizados en las diferentes etapas experimentales, con el fin de cumplir con el objetivo general del proyecto: elaborar y caracterizar probetas de material compuesto con matriz de poliuretano reactivo y refuerzo de fibra de vidrio. Para llevar a cabo esta finalidad se realizó una constante revisión bibliográfica donde se pudieron determinar las características individuales de cada una de las fases del compuesto, para posteriormente desarrollar las demás etapas del proyecto, las cuales consistieron en diseño y adquisición del molde, fabricación de probetas y realización de ensayos para caracterización. La fase de diseño y construcción del molde se llevó a cabo en el taller de máquinas herramientas, la fabricación de probetas se realizó en el centro de ensayos no destructivos y finalmente los ensayos de caracterización se ejecutaron en el laboratorio de resistencia de materiales, todos adscritos a la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

4.1 Materiales

El refuerzo del compuesto elaborado fue fibra de vidrio tipo E, en una presentación tejida, la cual se desarticuló para obtener fibras largas de aproximadamente 22 cm de longitud y fibras cortas de 3 cm de longitud para los distintos tipos de lotes realizados (las propiedades mecánicas del refuerzo se encuentran en la Tabla N° 1); la matriz del laminado consiste en un tipo de matriz termoplástica, más exactamente poliuretano termofusible reactivo producido por la empresa alemana JOWAT SE, multinacional que se dedica a la fabricación y comercialización de gran cantidad de adhesivos y complementos de los mismos, las características técnicas de la matriz utilizada están consignadas en la tabla N° 2.

Characteristics/ Directions for Use: Short open time and high initial strength. Contains a fluorescence marker for detection. Especially if PVC foils are used, resistance against a potential migration of plasticisers must be tested thoroughly.

Processing temperature [°C]:	110 – 130 130 – 150	(roller application) (spraying)
Appearance:	colourless opaque	
Density at 23 °C [g/cm ³]:	approx. 1.15 ± 0.05	(Jowat test method)
Softening point [°C]:	approx. 74 ± 2	(ring and ball)
Reaction time [d]:	approx. 2 – 3	(depending on substrate and available moisture)

The properties of the substrates and the processing conditions will influence the processes of joining and bonding. Customer trials before use are therefore recommended.

Specification: Viscosity at 140 °C [mPas]: 23,000 ± 3,000
(Brookfield, Thermosel, spindle 28, 10 rpm)

Tabla 2– Propiedades de poliuretano reactivo. Fuente:

https://www.jowat.com/technical-data-sheets/642.00/TD64200_Englisch.PDF

4.2 Equipos

Para la elaboración del compuesto se hizo uso de los siguientes equipos:

- Al hacer uso de una matriz termoplástica, se hace necesario realizar la fundición de la misma, para que fluidificada se pueda moldear de manera más sencilla, para cumplir con este proceso se empleó un horno de atmósfera controlada marca THERMO SCIENTIFIC modelo Heratherm OGS100 ubicado en las instalaciones del centro de estudios y consultoría en ensayos no destructivos (CECEND) de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Las siglas OGS del modelo traducen textualmente: *“horno con convección por gravedad para aplicaciones de laboratorio estándar”*; este tipo de hornos resulta ser muy útil en los procesos de fundición debido a sus diferentes características, tales como el control térmico de alta precisión que se ajusta en pasos de un décimo grado hasta los 250 °C / 626 °F, posee regulador mecánico para ventilar la cámara y su temporizador para procesos que conllevan un control riguroso. [8]

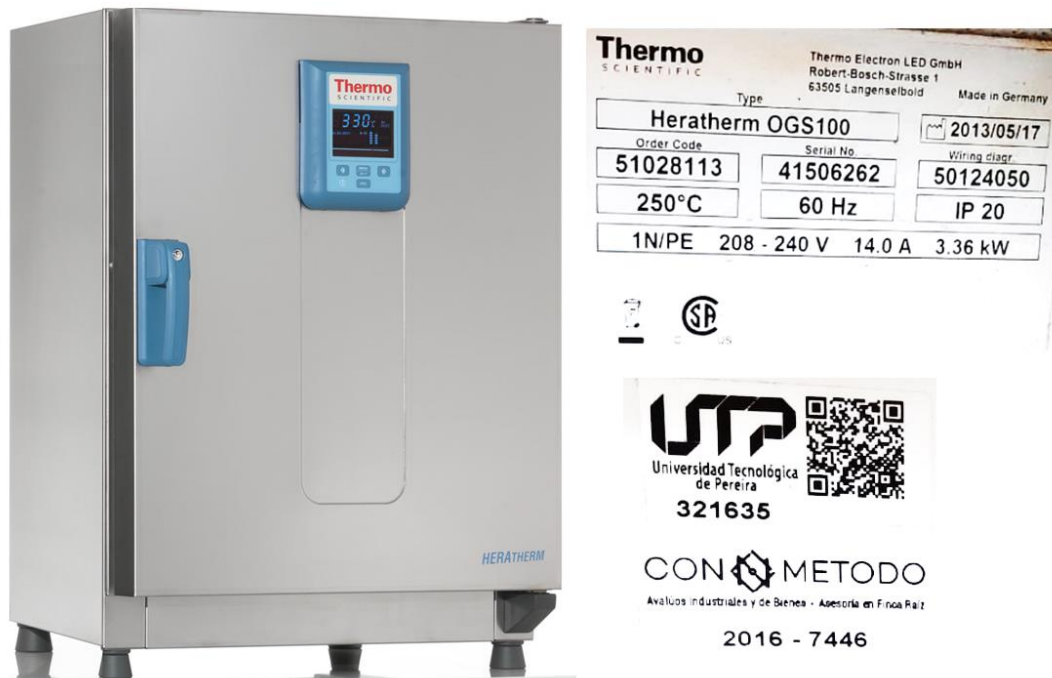


Ilustración 7– Horno de atmósfera controlada THERMO SCIENTIFIC Modelo Heratherm OGS100. Fuente: *Los autores*.

- El control de la proporción en masa del compuesto se realizó mediante el uso de una balanza digital ADAM modelo PGL 2002 ubicada en las instalaciones del centro de estudios y consultoría en ensayos no destructivos (CECEND) de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Este equipo cuenta con su respectivo sello de calibración, por parte de Metrolabor, que cuenta con la acreditación del organismo nacional de acreditación de Colombia (ONAC) con fecha del 22 de noviembre del 2019.

	PGL 2002
Capacidad Máxima	2000 g
Legibilidad	0.01 g
Repetibilidad (s.d.)	0.02 g
Linealidad ±	0.04 g



Ilustración 8– Balanza digital ADAM Modelo PGL 2002. Fuente:

<http://www.adamequipment.com/pdf/922.pdf>

- Los ensayos de tracción para los diferentes lotes de probetas se realizaron en una máquina universal de ensayos VEB modelo 282/80 de capacidad máxima de carga 350 kp/cm², la cual posee un cabezal fijo y otro móvil, ubicada en las instalaciones del laboratorio de resistencia de materiales de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Ilustración 9– Máquina universal de ensayos VEB modelo 282/80. Fuente: *Los autores*.

4.3 Diseño y construcción de molde

El diseño del molde se realizó con base en las normas que dirigen ambos ensayos, ASTM D7264/D para flexión, y ASTM D3039/D para tracción, de tal forma que de cada lote del laminado se obtuvieran probetas para ambos ensayos. El molde fue construido a partir de láminas de teflón comercial, realizando un maquinado de las mismas y disponiendo de estas para que tuvieran las dimensiones mostradas en la ilustración 10; el material se elige por su fácil maquinabilidad, su excelente comportamiento a temperaturas altas y lo más importante la no adhesión del compuesto al molde.

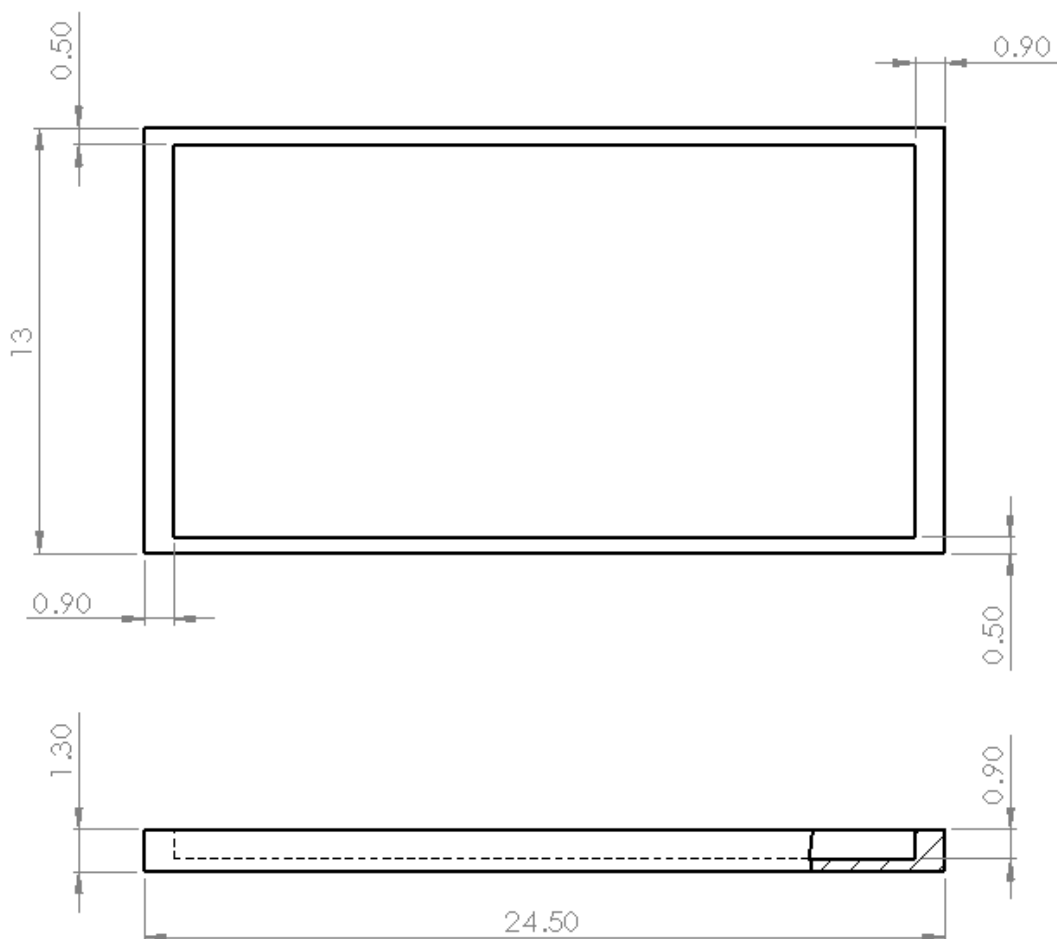


Ilustración 10– Dimensiones molde de teflón en centímetros. Fuente: *Los autores*.

Adicional al molde de teflón se fabricó otro espécimen en acero, el cual al momento de la fundición tuvo que ser recubierto con cinta teflón comercial, para evitar la adhesión del laminado al molde y así mismo eludir el desperdicio de material. El proceso de fabricación de este molde es relativamente sencillo, se inicia cortando 3 láminas de acero calibre 18, dos de

estas láminas con dimensiones 22 cm x12 cm y una restante con 25 cm x 14 cm. A esta última se le realizan dobleces de 1.5 cm en todos sus extremos para obtener la misma forma de la ilustración 11, posteriormente se realizan perforaciones de ¼” con taladro de mano y se suelda una tuerca en los agujeros para la posterior extracción de las probetas con ayuda de tornillos de la misma dimensión.

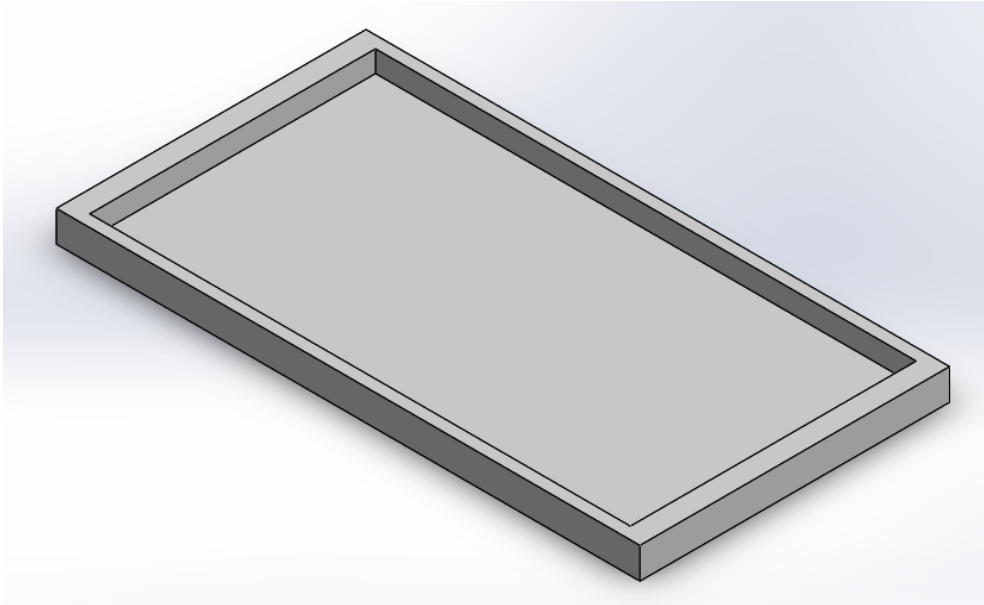


Ilustración 11– Molde de teflón. Fuente: *Los autores*.

4.4 Elaboración y mecanizado de probetas

4.4.1 Elaboración de láminas de material compuesto

El cumplimiento de parámetros como el tiempo de fundición y curado se llevan a cabo de acuerdo a indicaciones del fabricante, documentación bibliográfica, inspecciones visuales y sugerencias del director del trabajo. La elaboración del laminado con lleva a tres fases fundamentales las cuales son calentamiento, moldeo y curado; el proceso de elaboración se describe a continuación:

4.4.1.1 Calentamiento

Para la fase inicial se encendió el horno de atmósfera controlada, programando su temperatura a 140 °C. De acuerdo al fabricante la temperatura de fusión de este adhesivo se da a partir de los 75 °C, sin embargo, al tener una superficie en el molde tan amplia se necesita una mayor fluidez de la matriz para cubrir todo el volumen, por esta razón se lleva a

los 140 °C. El tiempo promedio que permanece el adhesivo en el horno hasta su fusión total es aproximadamente 1,8 h para un volumen aproximado de 250 ml.

PROBETA	TIEMPO DE FUSIÓN [h]
1	2
2	2,5
3	1,3
4	1,5
PROMEDIO	1,8

Tabla 3– Tiempos de fusión del poliuretano reactivo para un volumen de 250 ml. Fuente: *Los autores.*

La variación en el tiempo de fundición depende principalmente de la exposición a la humedad del ambiente que puede tener el material antes de su proceso de calentamiento, ya que se evidencia en las probetas que tuvieron una exposición al ambiente, previo a ser ingresadas al horno, un aumento significativo en el tiempo de fundición y un grado de fluidez menor a comparación de las probetas ingresadas lo antes posible al horno. Tal como se aprecia en la ilustración 12, la humedad del ambiente que también puede absorber la matriz en un estado inicial se debe al periodo que tarda en abrirse el recipiente, dividirse y llevarse a una bolsa plástica en vacío con presencia de gel de sílice granular para mantenerlo seco, la segunda ocasión en que el adhesivo puede adquirir humedad del ambiente es en el momento que va a ser llevado al horno, pero este proceso conlleva menos tiempo que el primero, por lo tanto se asume que la mayor cantidad de humedad adquirida se presenta en el primer proceso.



Ilustración 12– Presentación del adhesivo termofusible. Fuente: *Los autores.*

4.4.1.2 Moldeo

La siguiente etapa es el moldeo, que consiste en el calentamiento previo de la parte inferior del molde, con la respectiva lámina de acero en el caso de ambos moldes, para facilitar el proceso de extracción de la probeta. Dichas láminas fueron recubiertas con teflón comercial en presentación de cinta para evitar la adhesión entre la matriz y el molde para así minimizar las imperfecciones en las probetas.

Una vez el molde se precalienta, se procede a aplicar la primera capa de la matriz líquida, la cual se fundió en un Beaker de 250 ml, se deja en el horno por aproximadamente 30 minutos con el fin de asegurar la distribución uniforme a lo largo de la superficie del molde, de igual manera, se pesan los porcentajes de fibra de vidrio que será empleada en cada disposición de refuerzo que tendrán los especímenes, tomando fibras de 20 cm para el caso de la fibra larga unidireccional y fibras cortas de 3 cm de longitud dispuestas al azar.

A lo largo del molde se acomodan las fibras de manera uniforme, posteriormente, se coloca otra capa de poliuretano y se deja nuevamente por 30 minutos dentro del horno para que el mismo se disipe de manera continua.

Las fibras alineadas inicialmente se ubicaron sobre la primera capa de adhesivo sin ningún tipo de sujeción, lo que generó que en la fase de enfriamiento se agruparan las fibras por sectores debido a la presión suministrada para conseguir un espesor uniforme y evitar la presencia de poros que afecten las propiedades del material. Para la corrección de este fenómeno se unieron en los extremos los hilos de fibra con cinta adhesiva de papel, tal como se muestra en la ilustración 13, asegurando que el refuerzo se repartiera de manera uniforme a lo largo del volumen del compuesto.



Ilustración 13– Fibras de Vidrio Alineadas. Fuente: *Los autores*.

4.4.1.3 Enfriamiento – Curado

El proceso de enfriamiento se inicia una vez la capa superior de la matriz cubre uniformemente la superficie del molde, ubicando una placa de teflón en la parte superior del laminado y sobre esta una placa de acero adicional cubierta con cinta teflón. Para asegurar la unión matriz – refuerzo resulta necesario la aplicación de presión, para esto, se procede a apagar el horno, se deja el molde en su interior y se posiciona entre dos placas que permiten la distribución uniforme de peso en su total cobertura, el enfriamiento lento presentado al interior del horno se da con la puerta del mismo entreabierta. Aplicar la presión antes de que el poliuretano este bien distribuido o un exceso de presión puedan ocasionar imperfecciones superficiales en el laminado, tal como se ve en la ilustración 14.



Ilustración 14– Imperfecciones superficiales en la matriz. Fuente: *Los autores*.

El tiempo de secado para un lote de probetas es aproximadamente 3 horas, pero su tiempo de curado debe ser de 4 días para obtener las propiedades finales del compuesto.

4.4.1.4 Determinación de porcentajes de refuerzo.

Para el caso del primer lote de probetas se pesó el recipiente almacenador de la fibra de vidrio antes y después de sacar la cantidad de fibra requerida, notando que este método no era muy efectivo porque no se lograba insertar una gran cantidad de fibra al compuesto, por lo tanto para las siguientes probetas se sacaron las cantidades de refuerzo requeridas y se organizaron de tal manera que fuera más fácil su inserción en el molde (Ver ilustración 13). El método para establecer el porcentaje de fibra, fue el porcentaje en peso, utilizando la ecuación (1):

$$\% \text{ Fibra} = \left(\frac{\text{Peso fibra de vidrio}}{\text{Peso total probeta}} \right) \times 100 \quad (1)$$

LOTE 1 (ALINEADA)				
<i>Peso inicial (gr)</i>	<i>Peso final (gr)</i>	<i>Cantidad fibra (gr)</i>	<i>Peso probeta (gr)</i>	<i>% de fibra</i>
64,77	63,03	1,74	111,35	1,56264032
<i>Tiempo de curado (hr)</i>		96	<i>T. fundido (hr)</i>	2
LOTE 2 (ALINEADA)				
<i>Peso inicial (gr)</i>	<i>Peso final (gr)</i>	<i>Cantidad fibra (gr)</i>	<i>Peso probeta (gr)</i>	<i>% de fibra</i>
N.A	N.A	48,14	186,29	25,84143
<i>Tiempo de curado (hr)</i>		96	<i>T. fundido (hr)</i>	2,5
LOTE 3 (ALINEADA)				
<i>Peso inicial (gr)</i>	<i>Peso final (gr)</i>	<i>Cantidad fibra (gr)</i>	<i>Peso probeta (gr)</i>	<i>% de fibra</i>
N.A	N.A	13,56	123,2	11,0064935
<i>Tiempo de curado (hr)</i>		96	<i>T. fundido (hr)</i>	1,3
LOTE 4 (ALINEADA)				
<i>Peso inicial (gr)</i>	<i>Peso final (gr)</i>	<i>Cantidad fibra (gr)</i>	<i>Peso probeta (gr)</i>	<i>% de fibra</i>
N.A	N.A	24,48	132,85	18,4267971
<i>Tiempo de curado (hr)</i>		96	<i>T. fundido (hr)</i>	1,5
LOTE 5 (AL AZAR)				
<i>Peso inicial (gr)</i>	<i>Peso final (gr)</i>	<i>Cantidad fibra (gr)</i>	<i>Peso probeta (gr)</i>	<i>% de fibra</i>
N.A	N.A	13,05	107,17	12,1769152
<i>Tiempo de curado (hr)</i>		96	<i>T. fundido (hr)</i>	1,8
LOTE 6 (AL AZAR)				
<i>Peso inicial (gr)</i>	<i>Peso final (gr)</i>	<i>Cantidad fibra (gr)</i>	<i>Peso probeta (gr)</i>	<i>% de fibra</i>
N.A	N.S	21,38	139,34	15,3437635
<i>Tiempo de curado (hr)</i>		96	<i>T. fundido (hr)</i>	1,8

Tabla 4– Cantidad y porcentaje de fibra por lote. Fuente: *Los autores*.

De cada lote se obtuvieron 4 probetas para el ensayo de flexión y 4 probetas para el ensayo de tracción respectivamente, estos especímenes de ensayo cumplen con los requisitos establecidos en las normas ASTM D7264/D y ASTM D3039/D, sus medidas se especifican en el numeral 4.4.2 de este documento.

4.4.2 Normalización de probetas

Una vez curadas las láminas de material compuesto con fibra de vidrio unidireccional (fibra larga) y al azar (fibra corta), de acuerdo a los porcentajes anteriormente expuestos en la tabla 4, se fabricaron probetas para los ensayos de compresión y flexión de acuerdo a las geometrías indicadas por las normas respectivas ASTM D7264/D para flexión, y ASTM D3039/D para tracción. Para obtener las probetas a partir de las láminas se siguieron los siguientes pasos:

- En primer lugar se quitó el material sobrante de los extremos, como muestra la Ilustración 15.



Ilustración 15– Lámina con extremos eliminados. Fuente: *Los autores*.

- A continuación, se cortaron las láminas con las dimensiones requeridas para los diferentes ensayos como muestra la ilustración 16, las formas de las probetas se realizaron en el cortador láser ubicado en el laboratorio de modelos de la universidad tecnológica de Pereira.

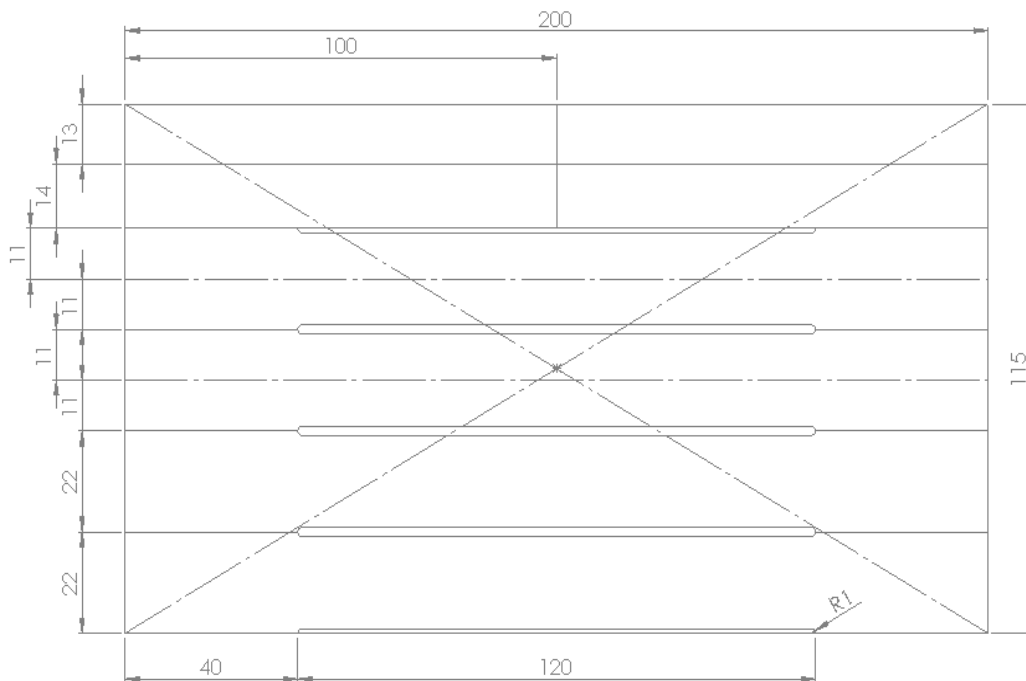


Ilustración 16– Dimensiones de corte de láminas (medidas en milímetros). Fuente: *Los autores*.

- Por último, se utilizó lija N°100 para eliminar irregularidades y rebabas de los bordes de las probetas que puedan generar concentradores de esfuerzos.

4.5 Desarrollo de pruebas y ensayos

4.5.1 Ensayo a tracción

Estas pruebas fueron realizadas mediante la máquina universal de ensayos ubicada en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira. Consiste en someter las probetas a una carga uniaxial de manera gradual hasta que ocurra la falla.



Ilustración 17– Rotura de probeta en ensayo de tracción. Fuente: *Los autores*.

Para cada proporción y disposición de fibra estudiada, se obtuvieron 4 probetas para ensayos de tracción y para correr cada una de las pruebas resulta necesario tomar la medida del espesor y del ancho en seis puntos diferentes utilizando un calibrador pie de rey dispuesto en las instalaciones del laboratorio de resistencia de materiales.

Se ajustaron las mordazas a las zonas más amplias de las probetas para dar inicio al ensayo de cada probeta. La máquina solicita como datos iniciales: el área transversal de las probetas (en milímetros cuadrados) y la distancia entre las mordazas (en milímetros). A partir de estos datos, la máquina de ensayos arroja como resultado la fuerza y esfuerzo máximo, además de la deformación unitaria soportada por el material.

Los resultados del ensayo se muestran en la tabla 5, en donde el esfuerzo máximo y la deformación son resultados que brinda la máquina de ensayos, mientras que el módulo de

elasticidad a tensión se calcula mediante la pendiente de la recta de la zona elástica del material, dicho valor se obtiene de una aproximación de Matlab utilizando los datos proporcionados por la misma máquina de ensayos.

Disposición	Porcentaje de fibra	Esfuerzo Máximo (MPa)		Deformación (mm/mm)		Módulo de elasticidad. (MPa)	
		Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Alineada	2%	11,23845	0,28055737	0,30167	0,2063304	261,6821	91,5776105
	11%	38,85958	18,3843045	0,10895	0,021558	368,1598	124,116778
	18%	44,18787	9,90668511	0,08745	0,0156775	591,8039	128,012775
	26%	51,69919	24,5144893	0,10173	0,0368365	542,0239	307,006554
Al azar	12%	9,94233	3,30741706	0,05991	0,020258	269,4444	100,115678
	15%	14,0645	3,98564027	0,07402	0,0156767	298,1732	117,355436

Tabla 5– Resultados ensayo a tracción. Fuente: *Los autores.*

4.5.2 Ensayo de flexión

Los ensayos de flexión en las probetas fueron realizados en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira, estos ensayos consisten en ubicar la probeta sobre dos apoyos de la máquina y aplicar fuerza mediante un punzón situado a media longitud entre ellos hasta que se genere la rotura del material.

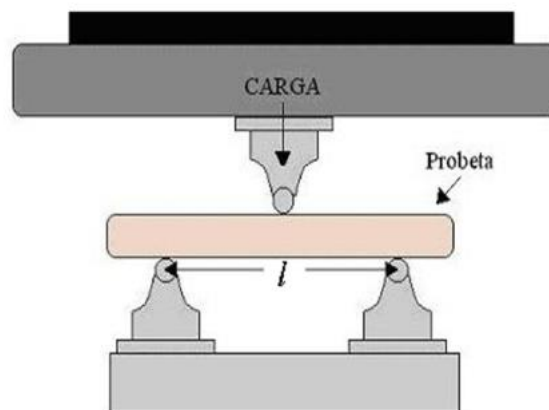


Ilustración 18 – Esquema ensayo de tensión. Fuente:

Navarro-García O. A. & Ramírez-Zambrano A. D., (2014), *Evaluación de las propiedades mecánicas de un material compuesto con fibra de fique y fibra de vidrio en una matriz de resina epóxica (Tesis de pregrado)*. Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla.

En este ensayo se determinaron la fuerza máxima y la resistencia máxima a la flexión, el primer resultado es un valor que entrega la máquina y, a partir de este, se determinó la resistencia máxima a la flexión mediante la siguiente ecuación:

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

Dónde:

σ : resistencia máxima a la flexión [MPa],

P: fuerza máxima aplicada [N],

L: longitud entre apoyos [mm],

b: ancho de la probeta [mm]

h: espesor de la probeta [mm].

Para obtener el espesor de la probeta, se tomó un promedio de medidas entre tres probetas distintas en tres puntos longitudinales distintos en cada una. Esto se realizó para cada tipo de probeta de distinto porcentaje y distribución de fibra. Una vez finalizada la toma de datos se analizaron como se describe en la tabla 6.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos tras efectuar la metodología y procedimientos anteriormente descritos. Se lograron obtener seis lotes de probetas para realizar los correspondientes ensayos de tracción y flexión, dichos lotes se diseñaron con el fin de realizar una comparación entre porcentajes y disposiciones de fibra diferentes.

Se realizaron varios modelos de probetas, cada uno con diferentes porcentajes de sus respectivos componentes previamente mencionados. Cada probeta fue sometida a ensayos de laboratorio para poder determinar cuál modelo tiene mayor resistencia, para así establecer la mezcla ideal por la que debe estar compuesto este material.

Para los resultados expuestos en la Tabla 6, se tomaron los valores obtenidos en los ensayos de Flexión y Tracción para cada una de las muestras, según su respectivo porcentaje de fibra, redondeando a números enteros superiores para una mejor presentación, al igual que su alineación. Se realiza un promedio de las cuatro pruebas ejecutadas para tener un mayor grado de certidumbre.

	% FIBRA	Tracción [Mpa]	Flexión [Mpa]
Fibra larga	2%	11,33	12,58
	11%	48	24,54
	18%	44	42,35
	26%	52	40,80
Fibra corta	12%	11,7	16,25
	15%	16	23,21

Tabla 6 – Valores de esfuerzos a diferentes porcentajes de fibra. Fuente: *Los autores*.

5.1 Ensayo de flexión a tres puntos

Se realizó el ensayo de flexión a tres puntos a las placas obtenidas de todas las composiciones estudiadas. Los resultados obtenidos se encuentran reflejados en las ilustraciones 19 y 20.

La ilustración 19 muestra los resultados de tensión máxima a flexión obtenidos, diferenciando los cuatro porcentajes de fibra empleados para las probetas realizadas con fibra unidireccional. Se observa claramente la influencia de la cantidad de fibra empleada al pasar de 2 % a 18%, sin embargo, al pasar del 18% al 26% muestran una disminución del 4% en el esfuerzo máximo, aunque este valor sea pequeño, puede representar ahorros económicos significativos. Este fenómeno se puede asociar a la unión física ocurrida entre la matriz y el

refuerzo, idealmente se esperaría que la unión entre ambos componentes fuera la apropiada para que todos los esfuerzos aplicados a la matriz se vean reflejados al refuerzo y se obtenga una mejor resistencia de conjunto; caso contrario se evidencia en los dos últimos porcentajes de fibra asociados al gráfico de barras. Una correcta adhesión entre este tipo de matriz y el refuerzo tiene múltiples factores que juegan en contra, el primero de ellos es la humedad del ambiente que penetra la matriz antes de ser fundida, por lo cual obtiene cierta resistencia a fluir, lo que la convierte en una de las principales desventajas. Otra de ellas se puede asociar a las irregularidades del molde, lo cual desemboca en la aparición de poros en los especímenes de ensayo que se convertirán en concentradores de esfuerzo que afecten la isotropía del compuesto; por último el método de inserción de la fibra en el molde puede ocasionar que la matriz no logre la adhesión ideal al refuerzo, creando zonas donde el refuerzo se pueda desprender del material ligante con una mayor facilidad.

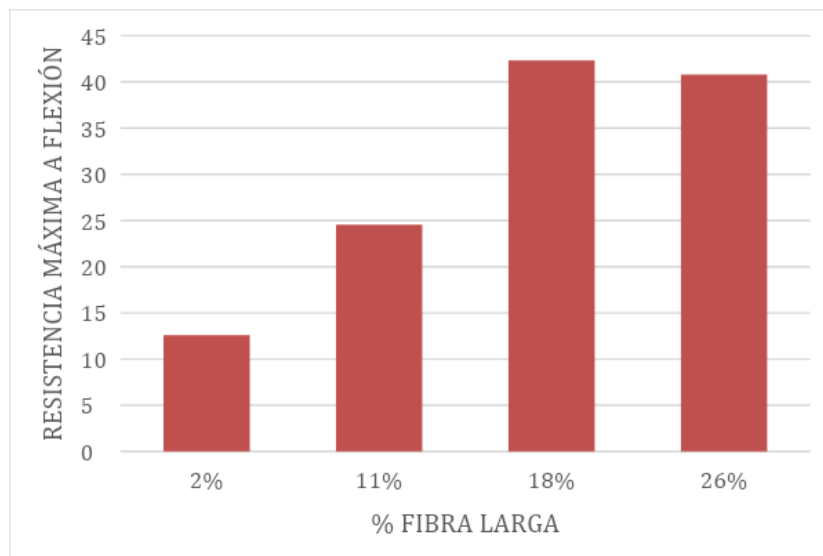


Ilustración 19 – Resistencia a flexión Vs porcentaje de fibra. Fuente: *Los autores*.

La ilustración 20 ilustra los resultados de tensión máxima obtenidos con probetas de refuerzo de fibra corta, los cuales muestran un comportamiento similar a las fibras unidireccionales, donde la resistencia máxima aumentó con el incremento de fibra.

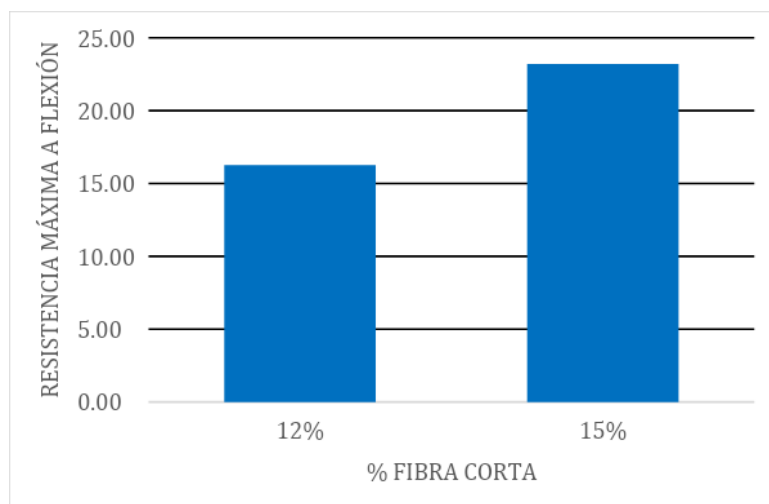


Ilustración 20 – Resistencia a flexión Vs porcentaje de fibra corta. Fuente: *Los autores*.

Los resultados obtenidos con las probetas de fibras largas presentan un valor de resistencia a la flexión mucho mayor al de las fibras al azar, ya que en estas últimas no se supera un valor de esfuerzo de 23,21 MPa, valor que es inferior al obtenido con una cantidad de fibra unidireccional de 11%, por lo tanto se puede afirmar que para efectos elásticos se recomienda utilizar fibras largas como refuerzo en proporciones moderadas.

Los valores más altos de resistencia a la flexión se obtuvieron al 18% de fibra unidireccional, esto puede suceder por la forma en la cual están ubicadas las fibras lo que se evidencia en una buena adhesión entre las fases del componente, ya que distribuye la carga de manera uniforme por todo el material. El aumento en la resistencia a la flexión se debe a la absorción de esfuerzo por parte de la fibra de vidrio, fenómeno en el cual se logra confirmar el objetivo de construir materiales compuestos.

Este material compuesto mostró muy buenas propiedades elásticas. Esta se define como la propiedad mecánica de los materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan. Durante la elaboración del ensayo, las probetas no presentaron rotura superficial, y una vez finalizado el ensayo, tendieron a recuperar su estado inicial, principalmente en las que contenían fibras alineadas.

5.2 Ensayo de tracción

Las ilustraciones 21, 22, 23, 24 y 25 muestran el comportamiento al ensayo de tracción realizado en las diferentes probetas.

Tal como en el ensayo de flexión, la incorporación de fibra de vidrio mejora las propiedades del material, mostrando un incremento en su resistencia. Los resultados de las fibras cortas siguen siendo considerablemente más bajos en comparación con los de las fibras largas.

Las fibras largas unidireccionales con los porcentajes de fibra correspondientes al 26% en peso, presentan la mayor resistencia a tracción, sin embargo, presentó fluctuaciones en las mediciones que pudieran deberse a una mala distribución de la fibra a lo largo de esta. Las tendencias de las gráficas de esfuerzo pueden verse punteadas en la ilustración 21, para el caso de la fibra larga alineada se tiene un crecimiento exponencial hasta su máximo valor 51,7 MPa, mientras que para el caso de la fibra corta al azar se tiene una tendencia lineal ya que solo se hicieron ensayos con dos especímenes con diferentes proporciones de fibra, sin embargo es notorio que el esfuerzo máximo aumenta a medida que aumenta la cantidad de fibra.

De acuerdo al estudio realizado por Alejandro Brenes en su tesis “*comparación de las propiedades mecánicas entre una resina reforzada con una fibra de cabuya y una resina reforzada con fibra de vidrio*”, no se debe aplicar un porcentaje mayor al 25% de refuerzo al compuesto, ya que sus propiedades mecánicas tendrán una disminución a partir de este porcentaje; dicho fenómeno se puede evidenciar en la línea de tendencia de la ilustración 21.

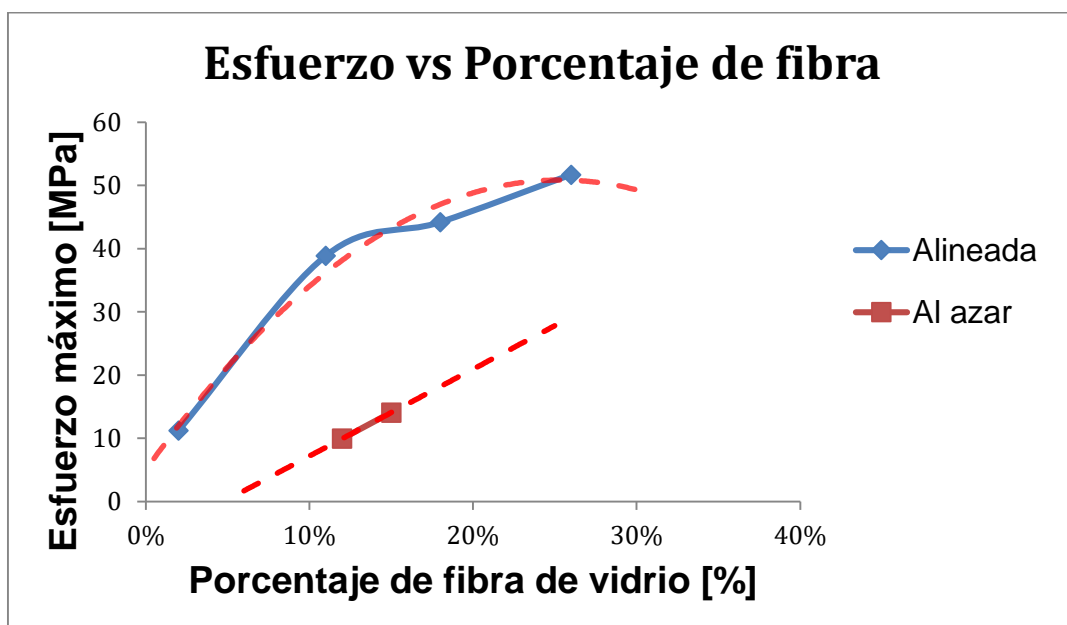


Ilustración 21– Esfuerzo máximo a tracción Vs porcentaje de fibra. Fuente: *Los autores*.

En la ilustración 22 se observa el comportamiento de la deformación en función del porcentaje de fibra de refuerzo. Para el caso de la disposición alineada unidireccional se

presenta un pico en la deformación cuando el porcentaje de fibra es mínimo, luego se da una caída abrupta de la curva, estableciéndose casi constante en los porcentajes mayores, dicho pico puede atribuirse a que el primer porcentaje es demasiado pequeño, por lo cual sus propiedades son muy similares a la de la matriz inicial. En el caso de la fibra corta orientada al azar se observa un caso contrario al estudiado en la fibra larga orientada unidireccionalmente, ya que a medida que aumenta el porcentaje de refuerzo se aumenta la deformación de manera lineal.

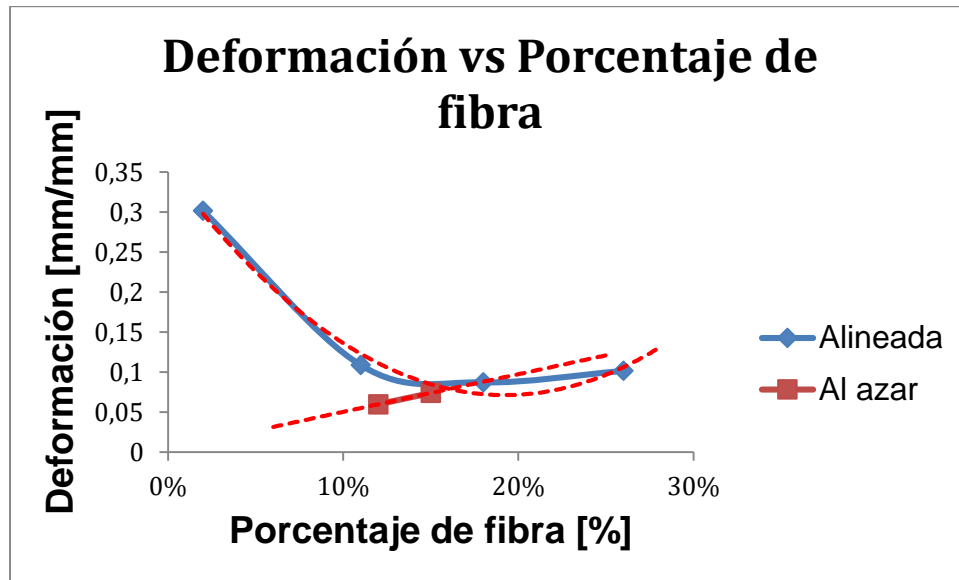


Ilustración 22 – Deformación vs porcentaje de fibra. Fuente: *Los autores*.

La ilustración 23 muestra el comportamiento del módulo de elasticidad en ambas disposiciones de fibra, para el caso de la fibra alineada se observa una aproximación exponencial creciente, aunque presenta su pico en 591,8 MPa valor que corresponde a un porcentaje en peso de 18%, demostrando que el material es más rígido cuando se presenta este porcentaje de refuerzo. En el caso de la fibra corta al azar, se tiene un comportamiento lineal creciente, mostrando menos rigidez que el caso anterior, incluyendo el menor porcentaje de refuerzo.

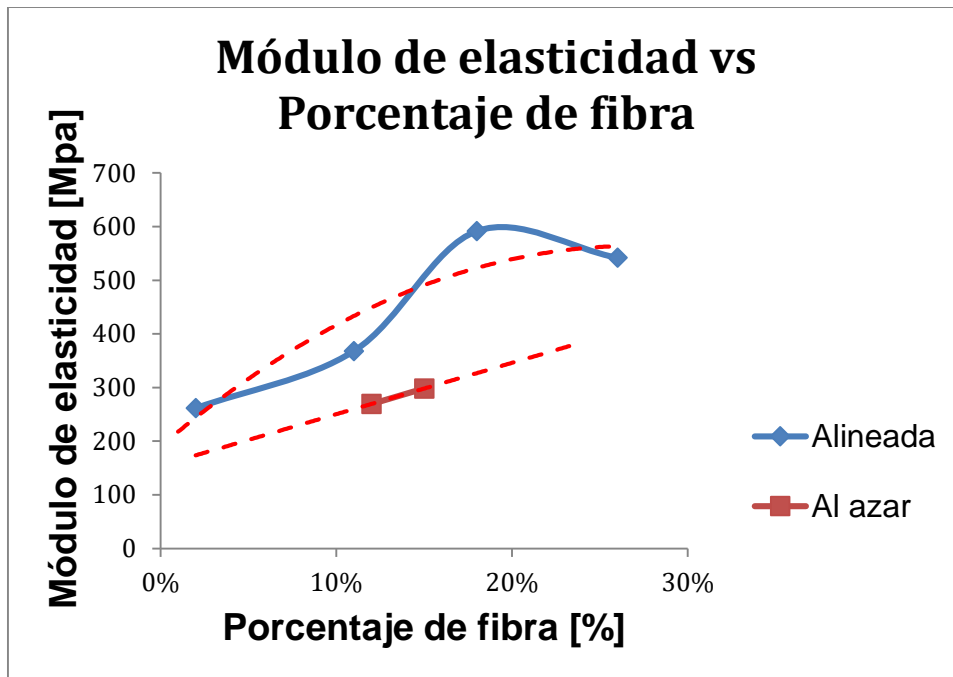


Ilustración 23 – Módulo de elasticidad a tracción vs porcentaje de fibra. Fuente: *Los autores*.

En la ilustración 24 muestra el comportamiento de las curvas esfuerzo deformación para cada uno de los porcentajes de fibra larga unidireccional, dicho comportamiento se asemeja a la tendencia de los plásticos convencionales. En cada uno de los porcentajes de fibra se puede observar una fractura gradual, debido al desprendimiento del refuerzo, en el menor porcentaje de refuerzo se tiene una curva más alargada sin llegar a la rotura.

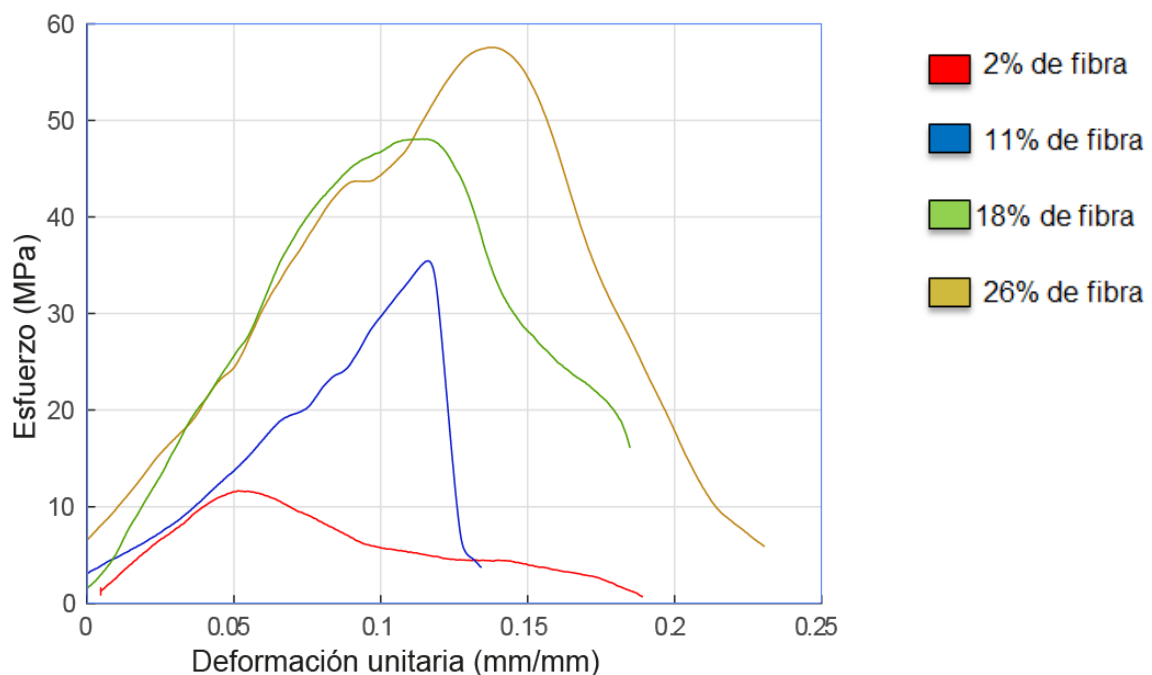


Ilustración 24 -Curvas esfuerzo Vs deformación, fibra larga alineada. Fuente: *Los autores*

En la ilustración 25 se evidencia el comportamiento de las curvas esfuerzo deformación para la fibra corta alineada al azar, en el menor porcentaje se observa una rotura instantánea de la probeta debido a una mala adhesión entre el refuerzo y la fibra, mientras que el espécimen con 15% de fibra es más evidente un comportamiento plástico, ya que su rotura no es instantánea, si no gradual.

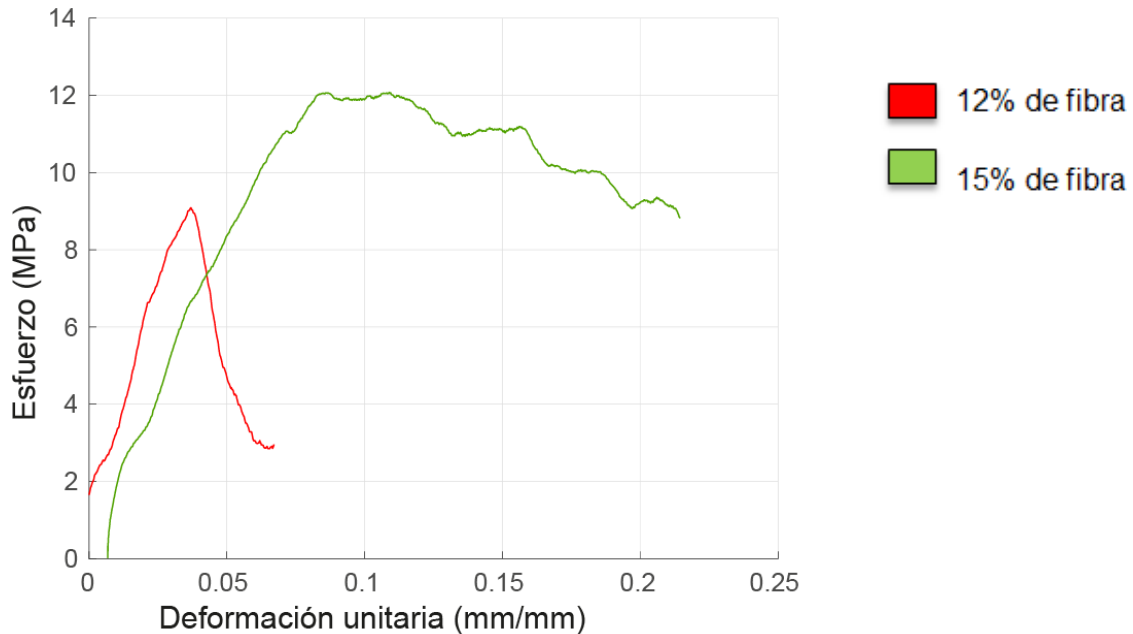


Ilustración 25 - Curvas esfuerzo Vs deformación fibra corta alineada al azar. Fuente: *Los autores.*

5.3 Aplicaciones

La novedad del presente compuesto es su tipo de matriz termofusible, ya que no se encontró registro de este tipo específico de matriz en la literatura, sin embargo las combinaciones de matrices poliméricas con refuerzos de fibra de vidrio son ocasionalmente utilizadas en la industria automotriz, como material para construir carrocerías, ya sea por su bajo costo, o sus características químicas de aislamiento térmico, eléctrico o acústico, también son empleados estos conjuntos en la fabricación de objetos ergonómicos, fabricación de tanques, silos de almacenamiento, entre muchas otras; sin embargo a pesar de tener excelentes propiedades como las descritas a lo largo del presente escrito, su uso se está viendo desplazado por la fibra de carbono, ya que está dotada de propiedades mejores a las de la fibra de vidrio, acompañada de una proporción en peso mucho menor y una manejabilidad más alta, rescatando que no es tóxica para la salud como la fibra de vidrio.

Desde un punto de vista local, resulta complejo obtener datos en tiempo real para realizar comparaciones de las propiedades mecánicas obtenidas del compuesto, ya que las empresas

regionales consideran esta información como confidencial, sin embargo se decide realizar una comparación con compuestos elaborados bajo circunstancias similares, el primero de ellos es un trabajo realizado como tesis de pregrado en la Universidad Autónoma del Caribe, donde sus autores Osvaldo Navarro y Andrés Ramírez deciden realizar un compuesto de matriz epóxica reforzado con fibra de fique y fibra de vidrio, En la ilustración 24 se observa el comportamiento a tensión del material, con proporciones de 100% en fique, disminuyendo hasta alcanzar un 100% en fibra de vidrio, la disposición de la fibra de vidrio es tejida a 0 y 90 grados, con 6 capas de la misma, por lo cual se obtiene un esfuerzo máximo mucho mayor al del compuesto estudiado en este trabajo, siendo la de la matriz termofusible de 51,7 MPa para un porcentaje de fibra de 26% ,mientras que la matriz epóxica con 100% fibra de vidrio se obtiene un valor de 119,91 MPa.

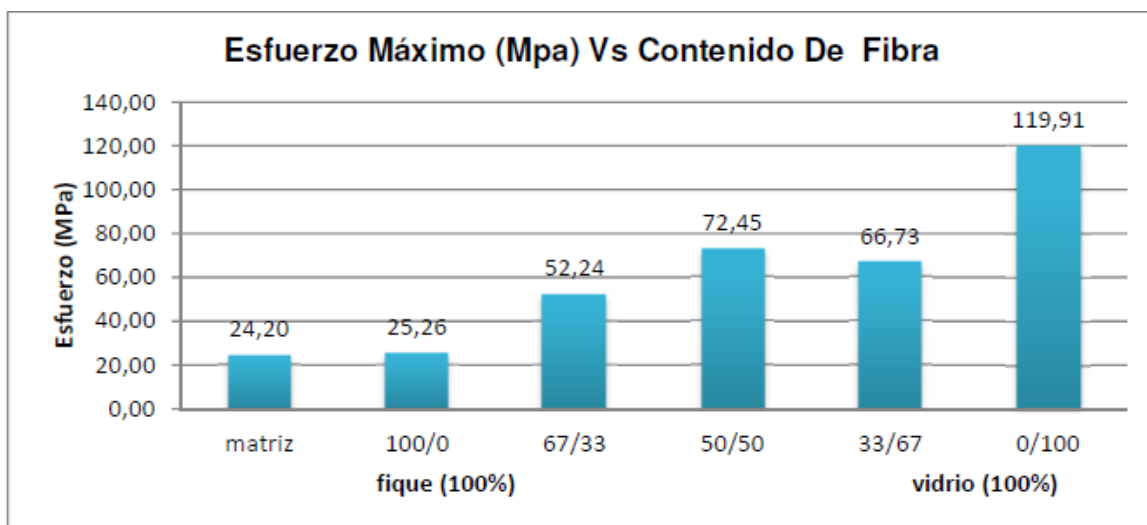


Ilustración 26- Esfuerzo máximo vs contenido de fibra de fique y vidrio. Fuente: Navarro-García O. A. & Ramírez-Zambrano A. D., (2014), *Evaluación de las propiedades mecánicas de un material compuesto con fibra de fique y fibra de vidrio en una matriz de resina epóxica* (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla.

El valor del esfuerzo máximo a tensión de la matriz epóxica con la disposición del refuerzo anteriormente mencionada es ligeramente mayor al doble del esfuerzo obtenido con la matriz termofusible estudiada en este escrito, cabe resaltar que se compara con este tipo de matriz por pertenecer a la familia de matrices poliméricas y utilizar el mismo refuerzo. Caso similar a lo ocurrido con el esfuerzo máximo a tracción ocurre con el esfuerzo a flexión, el cual para la matriz epóxica tiene un valor de 215,66 MPa, mientras que para la matriz termofusible estudiada en este documento 42,35 MPa para un porcentaje de fibra de 18%. Los autores de este trabajo aluden que el comportamiento del material con la fibra de fique al 100% y

pequeñas cantidades de fibra de vidrio le otorgaba al material un grado de ductilidad mayor, situación que también se ve observada en el presente escrito, donde a un menor porcentaje de fibra de vidrio el material se comporta de manera más dúctil.

Las diferencias tan significativas entre los resultados de ambos ensayos intuyen que utilizar fibra alineada y fibra al azar en diferentes porcentajes de peso no resulta exitoso en cuanto a valores de esfuerzo máximo, por lo cual se recomienda para futuras investigaciones realizar este tipo de compuestos con fibra de vidrio tejida, para que haya una mejor adherencia entre el refuerzo y la matriz, además de hacer uso de varias capas para estudiar un porcentaje adecuado de refuerzo para cumplir con algunas propiedades específicas; como anotación importante cabe resaltar que este tipo de matriz no debe ser rechazada al momento de estudio, ya que en todos los ensayos de flexión ninguna de las probetas al llegar al esfuerzo máximo se rompió, todas llegaban a este valor y en un periodo de tiempo volvían a su estado inicial.

Por otra parte se realiza una segunda comparación del compuesto obtenido pero esta vez con una matriz de poliéster, también perteneciente al grupo de matrices poliméricas, este trabajo es realizado por Alejandro Brenes Acosta como tesis de pregrado en la Universidad de Costa Rica. En este ensayo, se construye un laminado con iguales condiciones a las del presente trabajo, se ensayan probetas de matriz poliéster, con cuatro capas de fibra de vidrio en presentación tejida a 0° y 90°, el porcentaje en peso de la fibra corresponde al 30%. Como se observa en la tabla 7, se obtienen resultados un poco más aproximados a los presentados en este escrito, el esfuerzo máximo a tensión tiene un valor de 87,3 MPa, mientras que utilizando una matriz termofusible y un refuerzo alineado de 26% se tiene un esfuerzo máximo de 51,7 MPa. Caso similar ocurre con el ensayo de flexión, donde con una matriz de poliéster se obtiene un esfuerzo máximo de 155 MPa, mientras que para la matriz termofusible un valor de 42,35 MPa para un porcentaje de fibra de 18%.

Numeración muestras	Ensayo	Norma utilizada	Resultado	Desviación estándar
101 a 110	Resistencia a la tensión(MPa)	ASTM D 638 y 882	87,3	4,9
101 a 110	Módulo de elasticidad (MPa)	ASTM D 638 y 882	5526	174
141 a 150	Resistencia a la flexión (MPa)	ASTM D790	155	20
121 a 130	Resistencia al impacto (J/m)	ASTM D256	207,46	15,37

Tabla 7 – Propiedades matriz poliéster con fibra de vidrio al 30%. Fuente: Brenes-Acosta A., (2013), *Comparación de las propiedades mecánicas entre una resina reforzada con fibra de cabuya y una resina reforzada con fibra de vidrio* (Tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica, San José - Costa Rica.

6. CONCLUSIONES

- Se elaboraron y caracterizaron mediante ensayo de tensión y flexión a tres puntos probetas de material compuesto por un refuerzo de fibra de vidrio, en disposiciones alineada (fibra larga) y al azar (fibra corta) en una matriz de poliuretano termofusible reactivo. Con proporciones en peso de 2%, 11%, 18% y 26% para el caso de la fibra larga alineada unidireccionalmente y 12% y 15% respectivamente para la fibra corta orientada al azar. Tanto en los ensayos de tensión y flexión se obtuvo un mejor comportamiento en las fibras largas alineadas unidireccionalmente, presentando esfuerzos máximos de 52 MPa y 42,35 MPa respectivamente para el ensayo de tensión y flexión. El valor máximo de esfuerzo a tensión se presentó para el mayor porcentaje de fibra larga, mientras que el máximo valor del esfuerzo a flexión se presenta para un valor de refuerzo del 18%.
- La baja rigidez experimental presentada tanto en los ensayos a tensión y flexión, en ambas disposiciones estudiadas pueden ser debido a la presencia de poros la resina y la fibra o la adhesión matriz-refuerzo no llegó al punto óptimo; de igual manera en el presente ensayo se asume una distribución homogénea del refuerzo a lo largo de la matriz, lo cual en la práctica resulta complejo por el proceso de manufactura utilizado.
- Se evidencia una relación proporcional creciente entre el esfuerzo máximo a tensión y el porcentaje de fibra, tanto en la disposición alineada como en la disposición al azar, lo que refleja un aumento del esfuerzo a medida que aumenta la cantidad de refuerzo; el comportamiento del módulo de elasticidad a tensión presenta una tendencia proporcional decreciente en el caso de la fibra larga, esto se traduce en que el material posee mayor ductilidad cuando tiene un porcentaje de refuerzo menor. La fibra orientada al azar por lo regular maneja propiedades ligeramente inferiores a la de la fibra alineada, esto no puede infundir un fallo de cual es mejor o peor, ya que el objetivo de construir materiales compuestos se da según las aplicaciones necesarias y los factores que intervengan en el mismo.
- De acuerdo a los estudios realizados por Brenes-Acosta A. (2013) y realizar comparaciones con diferentes tipos de matrices poliméricas se puede concluir que los refuerzos tejidos presentan propiedades superiores a los refuerzos unidireccionales o al azar, este caso se evidencia con mayor claridad en la ilustración 24 y la tabla 7, donde los esfuerzos a tensión son mayores en una matriz epóxica, seguida de una matriz de poliéster y por último una matriz termofusible.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Callister, W; Rethwisch, D. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*, Barcelona España, Editorial Reverté.
- [2] Flinn, R. A; Trojan P. K. (1994). *Engineering materials and their applications*, Editorial Wiley.
- [3] Besednjak A., (2005). *Materiales compuestos, procesos de fabricación de embarcaciones*, Catalunya España, Edicions UPC.
- [4] Marcovich, N.E, (1996). *Materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzos de origen vegetal* (Tesis doctoral). Universidad nacional de Mar del Plata, Mar de Plata - Argentina.
- [5] Pérez-Alonso C., (2016). *Naval composites: Los materiales compuestos y la industria naval* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona – España.
- [6] Piqueras-Pérez, M.A., Martínez-Casanova, A., Abejónar-Buendia, J. and Marulanda-Arévalo, J.L., *Characterization a polyurethane-based reactive hot melt adhesive for applications in materials*. DYNA, 86(210), pp. 247-253, July - September, 2019.
- [7] Adhesivos reactivos hot melt « Adhesivos « Jowat Adhesives. (2020). Retrieved 31 March 2020, from <https://www.jowat.com/es-CL/adhesivos/reactive-hot-melt-adhesives/>
- [8] Thermo Fisher Scientific Inc. (Junio 2012). *Thermo Scientific Heratherm Hornos General Protocol OGS 60/100/180/400/750*. Waltham EEUU, from <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LED/manuals/D21466~.pdf>
- [9] Hull, D., (2003), *An introduction to Composites Materials*, Barcelona, España: Editorial Reverté S.A
- [10] Taborda-Rios, J.A., Cañas-Mendoza, L.A. and Trisancho-Reyes, J.L., *Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú, como material sustituto de la fibra de vidrio*. DYNA, 84(202), pp. 35-41, September, 2017.
- [11] Segovia, F., Vicente, A., Salvador, D., & Amigó, V. (2002). *Características mecánicas de compuestos epoxy reforzados 0-90° sometidos a impactos de baja energía [ebook]*. Valencia. Retrieved from https://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/050_SEGOVIA.PDF
- [12] Brenes-Acosta A., (2013), *Comparación de las propiedades mecánicas entre una resina reforzada con fibra de cabuya y una resina reforzada con fibra de vidrio* (Tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica, San José - Costa Rica.

- [13] Navarro-García O. A. & Ramírez-Zambrano A. D., (2014), *Evaluación de las propiedades mecánicas de un material compuesto con fibra de fique y fibra de vidrio en una matriz de resina epóxica* (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla.
- [14] Morales Antigüedad, G. (2008). *Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nanofibras de carbono para aplicaciones tecnológicas*. Universidad Complutense de Madrid.
- [15] BALAM-COCOM, R. J.; DUARTE-ARANDA, S.; CANCHÉ-ESCAMILLA, G. Obtención y caracterización de materiales compuestos de fibras de la "piña" de henequén y polipropileno. *Revista Mexicana de ingeniería química*, 2006, vol. 5, no Su1, p. 39-44.
- [16] TAMAYO DUQUE, Napoleón Andrés. *Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibra de cabuya mediante estratificación*. 2012. Tesis de Licenciatura. QUITO, 2012.
- [17] CONTRERAS, A.; BEDOLLA, E. Fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz metálica Al-Cu y Al-Mg reforzados con partículas de TiC. *Revista mexicana de física*, 2004, vol. 50, no 5, p. 495-500.
- [18] ANTIGÜEDAD, Germán Morales. *Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nanofibras de carbono para aplicaciones tecnológicas*. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2008.
- [19] GARCÍA, Rosa María Bellas, et al. Formulación y caracterización de materiales compuestos integrados por una matriz de caucho estireno-butadieno (SBR) reforzada con nanoarcilla. *Universidad de Coruña*, 2012.
- [20] PROAÑO, Andrés; BONILLA, Omar; ALDÁS, Miguel. Desarrollo de un material compuesto de matriz de Poliuretano rígido reforzado con fibra de Raquis de palma Africana. *Revista Politécnica*, 2015, vol. 36, no 2, p. 89-89.