

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES
COMPUESTOS A BASE DE FIBRA DE FIQUE Y FIBRAS SINTÉTICAS

LUIS ALBERTO PÉREZ GRACIA

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ASESOR: ING. RICARDO ANDRES MENDOZA QUIROGA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BARRANQUILLA

2014

CONTENIDO

NOTA DE ACEPTACIÓN	7
DEDICATORIA	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1 ANTECEDENTES	11
1.2 DESCRIPCION DEL PROBLEMA	13
1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	15
2. JUSTIFICACIÓN	16
3. OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GENERAL	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4. MARCO REFERENCIAL	19
4.1 ESTADO DEL ARTE.....	19
4.2 MARCO TEÓRICO	24
4.2.1 Materiales compuestos	24
4.2.2 Resinas	25
4.2.3 Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura.	28
4.2.4 Matriz	30
4.2.5 Fibra natural:.....	30
4.2.6 Probeta	31
4.2.7 Prueba mecánica	31
4.2.8 Propiedades mecánicas de los materiales.....	31
5. DISEÑO METODOLÓGICO	37
6. METODOLOGÍA	38
6.1 Investigación previa sobre las fibras naturales.	38
6.2 Caracterización de la fibra de fique en términos de sus propiedades físicas.....	38
6.2.1 Determinación de la densidad lineal de la fibra de fique.....	38
6.2.2 Determinación de Diámetros:.....	39

6.2.3	Ensayo de tensión a la fibra de fique:.....	39
6.2.4	Ensayos de tensión en telas de fique:	40
6.3	Caracterización de la resina.....	40
6.3.1	Proceso de obtención y fundición de resinas.....	41
6.4	Caracterización de los materiales compuestos a través de ensayos mecánicos.....	42
7.	RESULTADOS	44
7.1	Caracterización de la fibra de fique	44
7.1.1	Densidad lineal.....	44
7.1.2	Medición de diámetros:.....	45
7.1.3	Ensayo de Tensión a la fibra de fique.....	47
7.1.4	Ensayos de tensión en telas de fique.....	50
7.2	Caracterización de la resina.....	52
7.2.1	Ensayo de tensión en las resinas:	57
7.2.2	Ensayo de flexión en las resinas:.....	58
7.2.3	Ensayo de impacto en las resinas:	60
7.2.4	Screening:.....	62
7.3.2	Ensayos de tensión en el material compuesto:.....	66
7.3.3	Ensayos de flexión en el material compuesto:.....	68
7.3.4	Ensayo de impacto en el material compuesto:.....	70
7.3.5	Costos de mezclas:.....	71
7.3.6	Comparación de propiedades mecánicas del material compuesto de fibra de fique con matriz de resina poliéster y materiales compuestos de fibras sintéticas (vidrio y carbono):	72
8.	CRONOGRAMA DE LA INVESTIGACIÓN	74
9.	PRESUPUESTO.....	76
10.	CONCLUSIONES:.....	77
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	79
12.	REFERENCIAS	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resultados de resistencia a la tensión y modulo de Elasticidad	22
Figura 2: Resultado de porcentaje de deformación a la rotura con respecto a la proporción de fibra de nopal.....	24
Figura 3: Dispositivo para ensayos de tracción	33
Figura 4: Método de ensayo de Charpy	36
Figura 5: Representación geométrica del diseño experimental 2 ³	40
Figura 6: Medición de la masa de la fibra de fique	44
Figura 7 Medición del número de hilos en una hebra de fique	45
Figura 8: Histograma que muestra la frecuencia absoluta vs Intervalos de diámetro	46
Figura 9: Molde utilizado para la prueba de tensión en la hebra de fique	47
Figura 10: Corte del marco que sostiene la fibra.....	47
Figura 11: Fibra sometida al ensayo de tensión.....	48
Figura 12: Esfuerzo vs. Deformación del fique ensayado a 1 mm/min.....	49
Figura 13: Esfuerzo vs. Deformación del fique ensayado a 50mm/min.....	50
Figura 14: Telas de fique en mordazas	50
Figura 15: Telas ensayadas en tensión.....	51
Figura 16: Moldes y materiales utilizados en la fundición de resina.....	52
Figura 17: Método de elaboración de resina	52
Figura 18: Esquema de diseño de estadística del experimento para relacionar con sus factores controlables (catalizador y thinner) y el bloqueador (resina). Las rebabas se desprecian en el proceso.....	55
Figura 19: Esquema de diseño de estadística del experimento para relacionar con sus respuestas y propiedades a medir y evaluar mecánicamente. La cantidad de rebabas se desprecia en el proceso.....	55
Figura 20: Probeta puesta en rodillos de máquina de flexión.....	58
Figura 21: Probeta sometida a flexión a tres puntos	59
Figura 22: Flexión de probeta.....	60
Figura 23: Péndulo Charpy.....	61
Figura 24: Probeta sometida a ensayo de impacto	61
Figura 25: Probetas de fique para realizar curado	66
Figura 26: Molde para realizar el curado	66
Figura 27: Probetas sometidas a tensión	67
Figura 28: Fractura de probeta luego de ensayo.....	67
Figura 29: Probetas sometidas a ensayo de flexión.....	68
Figura 30: Ensayo de flexión al compuesto.....	68
Figura 31: Probeta de la mezcla 1 con 3 capas de fibra	69

Figura 32: Probeta mezcla 1 con 3 capas de fibra	69
Figura 33: Probetas para pruebas de impacto	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de resinas.....	26
Tabla 2: Característica de la Resina	27
Tabla 3: Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura	28
Tabla 4: Resultados de la densidad lineal de las muestras de fique.....	44
Tabla 5: Resultados de la medición de los diámetros del fique.....	45
Tabla 6: Intervalos de diámetros	46
Tabla 7: Resultados de ensayo de tensión a la fibra de fique a 1 mm/min.	48
Tabla 8: Resultados de ensayo de tensión a la fibra de fique a 50 mm/min.....	49
Tabla 9: Resultados de ensayos de tensión a la tela de fique a 1 mm/min.....	51
Tabla 10: Resultados de ensayos de tensión a la tela de fique a 50 mm/min.....	52
Tabla 11: Componentes para las mezclas en el primer ensayo	53
Tabla 12: Porcentaje de composición de mezclas	54
Tabla 14: Porcentajes de las mezclas finales.....	56
Tabla 13: Segundo ensayo de mezclas	56
Tabla 15: Resultados de tensión de la resina.....	57
Tabla 16: Resultados de flexión de resinas.....	59
Tabla 17: Resultados impacto de la resina.....	62
Tabla 18: Screening de las mezclas.....	63
Tabla 19: Contenido de los materiales compuestos de fibra de fique en matriz de resina poliéster, en gramos.	64
Tabla 20: Contenido de los materiales compuestos de fibra de fique en matriz de resina poliéster, en proporciones.	64
Tabla 21: Resultados tensión para material compuesto.....	67
Tabla 22: Resultados de flexión para material compuesto.....	69
Tabla 23: Resultados de ensayos de impacto a materiales compuestos.	71
Tabla 24: Resultados costos de materiales.....	71
Tabla 25: Resultados costos de mezclas a partir de su composición por gramos	72
Tabla 26: Tabla comparativa de materiales compuestos de fibra natural (fique) y fibras sintéticas.....	72

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Barranquilla, Junio de 2014

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de investigación a mi familia, a mi novia Jessica Arévalo, personas que me han apoyado e inspirado para alcanzar mis metas y esforzarme por lograr mis sueños.

Hoy quiero dedicar este trabajo también a mi madre, Marlene Gracia, que aunque ya no se encuentra a mi lado, continúa enviándome su luz, fuerza y bendiciones diariamente, aspectos que me han permitido ser la persona que soy, y alcanzar lo que me propongo en mi vida.

Finalmente, quiero dedicar éste proyecto a mis hermanas y a mi segunda madre Rubiela Barbosa, por apoyarme, estar ahí siempre y creer en mis capacidades para lograr mis metas y sueños.

Luis Alberto Pérez Gracia

AGRADECIMIENTOS

Agradezco fundamentalmente a Dios por brindarme diariamente la bendición de estar vivo para continuar teniendo la fuerza de seguir adelante. A toda mi familia y amigos por apoyarme incondicionalmente pues, sin su ayuda no hubiese sido posible llegar a este punto de mi vida. A mi novia, que ha sido mi compañera incondicional en este trabajo, porque con su apoyo y ayuda ha facilitado la realización de mis proyectos y sueños.

A todo el cuerpo de profesorado del departamento de Ingeniería Mecánica, porque siempre me han brindado sus conocimientos, de los cuales he aprendido y obtenido las experiencias gratas que me han hecho crecer como profesional.

Agradezco en especial a mi director de tesis Ingeniero Ricardo Mendoza que me ha brindado su orientación y ayuda para sacar adelante este proyecto, a mi compañero Santiago Carvajal, de quien siempre he tenido una mano amiga dispuesta a colaborarme con lo que he necesitado, con quien he podido compartir muchas experiencias profesionales gratificantes y en quien puedo encontrar apoyo y respaldo siempre que lo necesite, su apoyo fue indispensable para la realización y culminación de éste proyecto.

Luis Alberto Pérez Gracia

INTRODUCCION

Este proyecto de investigación nace de la búsqueda de materiales compuestos basados en la fibra natural de fique, que serán utilizados para la fabricación de implementos deportivos, teniendo en cuenta que si ésta resulta funcional y adecuada, podrá convertirse en materia prima para la fabricación de otros elementos. Lo que se desea desde este proyecto de grado es hacer uso de estas fibras de origen natural para reducir costos de fabricación, ayudar a minimizar el impacto ambiental y la utilización de materiales compuestos a base de fibras artificiales, como el carbono y el vidrio que por su explotación y gran demanda han generado un daño ambiental considerable.

Por tal motivo, esta investigación, se basa en la evaluación del comportamiento mecánico de materiales compuestos a base de fibras naturales tales como la fibra de fique, y artificiales como la resina de poliéster ortoftálica pre acelerada rígida. Las propiedades mecánicas de los materiales que se evalúan son flexión, tensión e impacto. Los anteriores ensayos mecánicos permiten analizar propiedades mecánicas tales como: esfuerzo máximo, esfuerzo de rotura, deformación, y módulo de elasticidad.

Por lo tanto, se pretende encontrar un material que reduzca los costos de producción y materia prima del mercado actual, el cual está siendo parte de la fabricación y elaboración de implementos deportivos. Es importante a su vez, conocer de qué manera los nuevos materiales que serán utilizados para este fin, pueden suplir las necesidades de los materiales actuales.

Actualmente, las fibras sintéticas son materiales que a nivel mundial son muy apetecidos y costosos en la producción y fabricación de casi cualquier elemento que conocemos. Es por ello, que en esta investigación se desea identificar y encontrar por medio de la evaluación de las propiedades mecánicas mencionadas anteriormente, un material compuesto a base de fibras naturales, que tenga la posibilidad de reemplazar las fibras sintéticas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

El fique ha sido conocido a lo largo de la historia colombiana como un material usado de manera cotidiana en el campo textil y artesanal. Tal como lo menciona [1] esta fibra pertenece a las culturas nativas como algo inherente a su diario existir. El fique es una planta originaria de la América tropical que crece en abundancia en la zona andina de Colombia, prácticamente en todos los climas. Con la industrialización del país se crearon verdaderas fábricas para satisfacer un mercado proveniente de las industrias que utilizan esta fibra, en enormes cantidades, para los empaques de sus productos comerciales. Los talleres artesanales se fueron desarrollando poco a poco y la demanda de productos, en especial la de costales, aumentó de manera considerable hacia finales del siglo XIX, con el inicio de las exportaciones de café. Durante el siglo XX, la producción industrial a gran escala logra su mayor auge durante los años 50 y hacia finales de los años 70. El fique es una planta cuyo sistema radicular es rico en nitrógeno y sus raíces proporcionan materia orgánica, la fibra clara, dura, larga y resistente posee atributos importantes para la producción de cordeles, empaques y textiles entre otros.

En cuanto a su procesamiento, el fique comienza por ser cortado, desfibrado y lavado, el corte debe hacerse de manera recta y cerca del tallo, de abajo hacia arriba. El desfibrado consiste en separar la corteza de las hojas de las fibras de cabuyas que están en su interior, ya desfibrado el fique, se lava con abundante agua para quitarle el color verdoso, y adquiere un color amarillo que una vez seco se vuelve blanco. El lavado se debe realizar en tanques con el fin de evitar la contaminación de las aguas.

Por otro lado, el escarmenado o peinado consiste en despegar y desenredar las fibras, pasando los manojos de fique secos a través de un cepillo de clavos con el fin de limpiarlo y peinarlo. El tinturado consiste en aplicar color a la fibra con un tinte especial para fique. Se deja en remojo la fibra, se lava con agua y jabón, luego en agua caliente se aplica la tintura, los mordientes o fijadores, el suavizante y se deja hervir para que la fibra absorba el color. El hilado es el último paso para la preparación de la fibra, el fique escarmenado y tinturado se amarra longitudinalmente a un madero de donde se sacan haces de fibra que se van estirando, y calibrando en el torno para formar así el hilo continuo. Por último, el proceso de tejido permite entrelazar las fibras del fique hilado con las fibras de algodón. Se alternan los hilos en sentido horizontal (urdimbre) y vertical (trama) para obtener densidad del tejido [2].

1.2 DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Debido a los altos costos de producción generados a partir de materiales compuestos, utilizados en la fabricación de implementos deportivos tales como: botas para patines de carrera, tablas de surf, zapatillas, marcos de bicicletas, sillines, cascos, raquetas de tenis, entre otros, se ha identificado la necesidad de reemplazar estos materiales compuestos a base de fibras artificiales, por otros que sean a base de fibras naturales que cumplan su misma función, brinden igual o mejor rendimiento, y reduzcan el impacto ambiental que estos generan pues son derivados del petróleo. Estos materiales a base de fibras naturales, a su vez podrían reducir los costos de producción y se consideran como una excelente opción para suplir las necesidades de los mercados actuales.

Por este motivo, se hace necesario hacer las pruebas y estudios precisos de estos materiales compuestos de fibras naturales para conocer el grado de durabilidad que prestan, a la hora de pensar en su utilización directa en los implementos deportivos. Es necesario tener en cuenta, que a la hora de hacer uso de éste tipo de materiales, es importante conocer su grado de resistencia, flexibilidad, ductilidad, tensión y torsión, con la finalidad de establecer el tipo de fuerza o trabajo al cual estará sometido. Todo ello, se realiza para establecer si el material es apto o no para el trabajo o función que cumplirá.

Por lo tanto, este proyecto de investigación tiene la finalidad de evaluar los materiales compuestos a través de un proceso de ensayos y pruebas. Con base en los resultados obtenidos, se evaluará la posibilidad de utilizar éstos materiales compuestos con los cuales se puedan diseñar y producir implementos deportivos apropiados y más económicos que los encontrados actualmente en el mercado, como un proyecto extensivo al proyecto de grado.

Esta investigación es importante puesto que se pretende por medio de la misma, identificar y establecer los materiales aptos para reducir costos de fabricación, utilización de materias primas y mejorar el impacto ambiental causado por la explotación de los recursos naturales, los cuales son la base de los materiales compuestos de fibras sintéticas, que tan comúnmente son usados para la elaboración de la mayoría de elementos que se encuentran en el mercado.

1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA

Por lo mencionado anteriormente, se establece el siguiente problema: ¿cuál es el comportamiento mecánico de la fibra de fique en términos de flexión, tensión e impacto, y cómo mejora las propiedades mecánicas del material compuesto en una matriz de resina de poliéster?

Se desea analizar el comportamiento mecánico de la fibra de fique puesto que desea compararse su viabilidad y rendimiento, en contraste con algunas fibras naturales tales como la fibra de yute y de coco, y de algunas fibras sintéticas como la fibra de vidrio y carbono.

2. JUSTIFICACIÓN

En el mercado de hoy, la fibra de carbono se considera como un material altamente resistente y valioso en la fabricación de infinidad de implementos deportivos utilizados a nivel mundial. Sin embargo, éste material puede llegar a ser muy costoso por ser un derivado del petróleo.

Según el diario el Universal en su edición del día 7 de agosto del año 2007, *“La entrada de los fabricantes de aviones ha hecho más difícil conseguir el material”*, indicó Robert Marte, quien encabeza la división de raquetas deportivas de Head en Austria. *“A 35 dólares la libra, estamos pagando el triple que hace dos años. Dependiendo de su grado, la fibra de carbono cuesta de 10 a 25 veces más que el aluminio. Ha sido usada principalmente para pequeñas partes de cosas grandes, como carros de carreras, o para muchas cosas pequeñas, como las raquetas de tenis”* (Wiesmann, G, 2007). Esto permite percibir, que materiales de este tipo, han incrementado los costos en la fabricación de implementos deportivos, y por lo tanto, su comercialización se ha visto afectada por sus altos precios, y la exclusividad en el conocimiento de su fabricación mediante una tecnología celosamente guardada por países estadounidenses, japoneses y europeos.

El problema conlleva también a reconocer que la oferta y la demanda están gravemente desequilibradas, puesto que este material tanpreciado, es cada vez más apetecido y valorado por las empresas fabricantes de todo tipo de elementos, y a su vez es adquirido por otras empresas que antes no solían utilizarlo en sus productos.

Así pues, se hace necesario investigar más a fondo sobre materiales alternativos a base de fibras naturales, que igualen o reemplacen las propiedades mecánicas de la fibra de carbono y otros materiales a base de fibras sintéticas, que generen menor costo y menor contaminación ambiental al planeta.

Mediante este proyecto de investigación se desean implementar pruebas y ensayos, para conocer la factibilidad de los materiales alternativos como la fibra de fique, utilizada en el diseño y fabricación de implementos deportivos, los cuales han aumentado sus precios al utilizar exclusivamente fibra de carbono como materia prima y otros materiales sintéticos.

Todo ello con el fin principal de hacer uso de fibras de fique para la elaboración y comercialización, a futuro de implementos deportivos más económicos y que cumplan las mismas funciones de los fabricados con materiales compuestos a base de fibras artificiales como la fibra de carbono.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades mecánicas tales como flexión, tensión e impacto de un material compuesto a base de fibra de fique en una matriz de resina de poliéster a través de ensayos mecánicos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las propiedades y el comportamiento mecánicos de los materiales compuestos a base de fibras de fique y fibras sintéticas como la fibra de carbono y de vidrio.
- Analizar a través del desarrollo de ensayos las propiedades y comportamiento mecánicos de los materiales compuestos de fibras de fique y fibras sintéticas.
- Realizar comparaciones entre materiales compuestos a base de fibra de fique más resina de poliéster, fibra de vidrio más resina de poliéster, y fibra de carbono más resina Epóxica, con el fin de conocer su rendimiento, efectividad y beneficios.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ESTADO DEL ARTE

Esta investigación surge como el proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, a partir de ésta investigación se pretende tener la base para extender el trabajo de grado a un proyecto personal que permita la realización de implementos deportivos cuyos materiales básicos son compuestos a base de fibras sintéticas. Se propone la idea de identificar un material que pueda reemplazar y asimilar el comportamiento mecánico de las fibras artificiales, y otros materiales compuestos, con el objetivo de utilizarlo como materia prima de los implementos deportivos que sean mucho más económicos y más asequibles en el mercado actual.

Por lo tanto, se realizó una consulta documental sobre las diferentes investigaciones y antecedentes que están relacionadas con el proyecto que se está presentando. Estas investigaciones son producto de la búsqueda de avances investigativos que se han adelantado sobre el manejo de materiales a base de fibras naturales, con el fin de que reemplacen los materiales a base de fibras artificiales.

Este estado del arte se llevó a cabo siguiendo parámetros como lo son; el año de realización, seleccionando solo las Investigaciones efectuadas en los últimos diez años y también por el parámetro de contexto donde se desarrollaron, indagando a nivel nacional e internacional. Dichos avances son de gran importancia porque brindan un panorama sobre el objeto de estudio, y de esa manera orientan el proceso de investigación.

En el año 2005 se realizó una investigación llamada “Utilización de fibras del rastrojo de piña como material de refuerzo en resinas de poliéster”, la cual fue desarrollada por Alvarado, P, Quesada, K, Sibaja, R y Vega, J., en Costa Rica y España [3]. Esta investigación nació del interés por la utilización de fibras

naturales en el desarrollo de materiales compuestos, por ser éstas, más económicas y por minimizar el impacto ambiental. En este estudio se evaluó el grado de reforzamiento de las fibras de rastrojo de piña sin tratamiento, en una matriz de resina poliéster no saturado de uso comercial.

Se prepararon materiales compuestos con fibra de distinta longitud, y con diferente porcentaje de la misma. Se evaluaron sus propiedades a través de la densidad, resistencia a la ruptura por tensión, flexión y energía de impacto. Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron que en general, todas las propiedades mecánicas de la resina reforzada, excepto flexión, alcanzaron valores similares o ligeramente superiores al presentado por la matriz sin que las propiedades mecánicas de la resina se vieran afectadas desfavorablemente, lo que constituye por sí solo una ventaja ya que es posible introducir al menos un 10% y un 15% de una fibra a la que no se le estaba dando aprovechamiento. Por otro lado, se obtuvieron mejoras en la adhesión fibra/ matriz al aumentar la presión de moldeo sobre el material que permitió lograr una mejor humectación de la fibra en la matriz, lo cual se confirmó a través de la evaluación de la resistencia a la ruptura y se verificó por microscopía electrónica de barrido.

En 2009, Lucena P, Suárez, A y Zamudio, I. [4], desarrollaron un trabajo de investigación en el cual desarrollaron un material compuesto a base de fibras de bambú para aplicaciones aeronáuticas, teniendo en cuenta que los materiales tales como el metal o fibras de refuerzo como el carbono o la fibra de vidrio general daño al medio ambiente y son fuente constante de contaminación. Por ello, los autores iniciaron investigando las propiedades de la fibra del bambú, pues ésta es bien conocida por sus propiedades mecánicas. Como resultado, se obtuvo que las propiedades mecánicas de las primeras probetas superaron las del aluminio de aviación que cuenta con una densidad de 2.8 (g/c), un esfuerzo a tensión de 67 ksi y un modulo de elasticidad de 10(Msi).

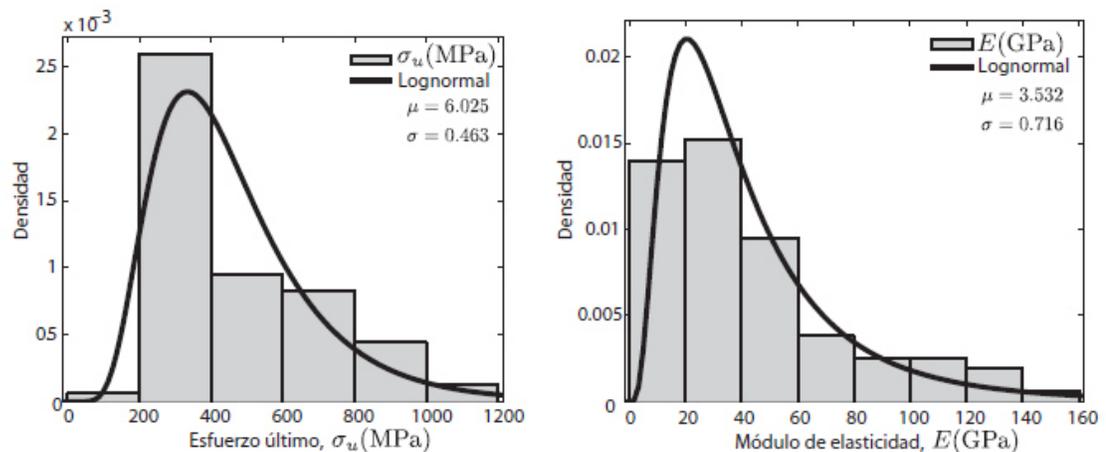
Igualmente en el año 2009, Gómez, J., realizó una investigación que tenía como objetivo el diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la fibra de vidrio [5], y que cumpliera con las propiedades mecánicas y productivas necesarias para competir con los compuestos de fibra de vidrio convencionales. En esta investigación se tenía como objetivo también, establecer y determinar el comportamiento mecánico de las fibras de fique, bagazo de caña y coco, mediante la realización de ensayos de tensión, y realización de comparaciones entre éstas fibras con la fibra de vidrio. Los resultados obtenidos reflejan que las fibras de fique y coco tenían una apariencia flexible y no se fracturaban con facilidad, por el contrario, las fibras de bagazo de caña, eran bastante frágiles y su fracturado era rápido, además su longitud era menor, lo cual hacía más complejo su montaje en el ensayo mecánico. Según los resultados obtenidos de esta investigación, el módulo de elasticidad y la deformación máxima de las fibras vegetales disminuyó al realizar el tratamiento alcalino, las fibras de caña, fique y coco presentaron reducciones del 45, 13 y 6% en su módulo de elasticidad respectivamente, y 25, 33 y 4% en su deformación máxima respectivamente. En términos generales, los resultados obtenidos permitieron establecer que el material compuesto reforzado con fibras mercerizadas de coco, presentó el mejor de los comportamientos mecánicos.

En 2010, Estrada, M., realizó una investigación titulada “Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos” [6] En este trabajo se estudiaron las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) con el ánimo de conocer su potencial como refuerzo en materiales compuestos poliméricos.

La extracción se hizo mediante una digestión química alcalina y un proceso Kraft con diferentes concentraciones de licor blanco (álcali efectivo AE, sulfidez S e hidromóduloHM), con el propósito de determinar el procedimiento de separación de fibras de guadua más eficiente en términos de grado de lignificación y de propiedades mecánicas de las fibras. Posteriormente los haces vasculares de

guadua, extraídos con el proceso alcalino y Kraft, se sometieron a ensayos de tensión para determinar su resistencia y rigidez. Los resultados obtenidos mostraron que las fibras de Guadua tienen un gran potencial para ser utilizadas como refuerzo de materiales compuestos poliméricos. La rigidez de los compuestos de Guadua resulta comparable a la de los polímeros reforzados con fibras de vidrio.

Figura 1: Resultados de resistencia a la tensión y modulo de Elasticidad



Fuente: http://www.docentes.unal.edu.co/mestradam/docs/tesisMEM_maestria.pdf

En 2011 Salinas, J., desarrolló una investigación con el fin de realizar la caracterización de materiales compuestos a base de polímeros y fibra de bagazo de nopal por inyección [7]. En este trabajo, se preparó un material compuesto basado en un refuerzo de fibras naturales de nopal embebidas en una matriz polimérica que se combinó con PP (polipropileno), PH (polietileno) y PS (polietileno).

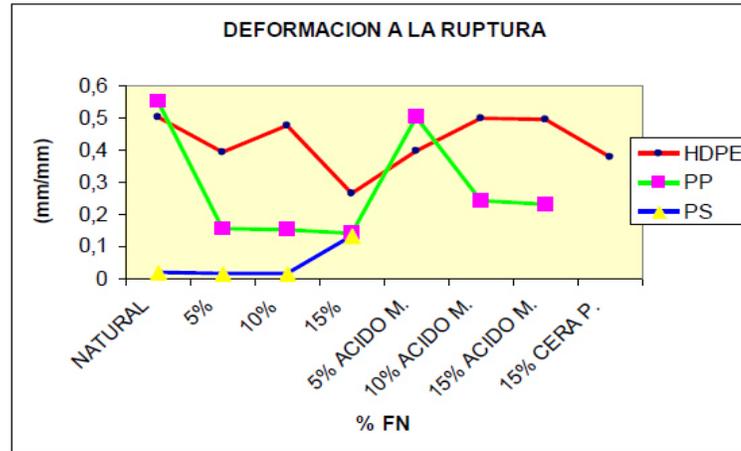
En esta investigación se realizó una caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales poliméricos reforzados y se desarrollaron las condiciones del proceso de fabricación evaluando principalmente las propiedades mecánicas del material.

Para poder caracterizar al compuesto, se utilizó el proceso de inyección de plásticos y se desarrollaron pruebas de acuerdo a las normas ASTM (American Society Testing of Materials), además se hizo una inspección del producto terminado para observar el flujo del material, dirección de la fibra y su distribución. Por medio de microscopía electrónica, se observó la relación entre la matriz y la fibra. La matriz fue comparada entre plásticos de uso común y de fácil procesamiento como el polietileno, el polipropileno y el polietileno.

La inclusión de fibras naturales de bagazo de nopal en materiales termoplásticos moldeados se pudo llevar a cabo por medio del proceso de inyección, tanto para el polietileno, como para el polipropileno e incluso para el polietileno; los resultados obtenidos, mostraron que en el polietileno, por este ser un material frágil, el refuerzo no tuvo buena respuesta al mejoramiento de sus propiedades. En éste trabajo, se tuvo un mejoramiento en cuanto a los procesos de secado, de mezclado e inyección, comparados con los trabajos precedentes a este, obteniendo así una mejor dispersión de las fibras como refuerzo en la matriz.

Por otro lado, los resultados arrojaron que a pesar de que la resistencia mecánica disminuyó, se observó que por la presencia de las fibras existía un ligero aumento en la rigidez del compuesto y que la dureza de éste ligeramente también aumentaba. Después de haber aplicado el tratamiento de cera polimérica se logró una mayor adherencia entre el refuerzo y la matriz, viéndose reflejado esto en el aumento de resistencia mecánica, debido al trabajo en conjunto de las partes.

Figura 2: Resultado de porcentaje de deformación a la rotura con respecto a la proporción de fibra de nopal



Fuente:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1907/Tesis.pdf?seque>

4.2 MARCO TEÓRICO

Con el objetivo de proporcionar bases sólidas de información que sustenten esta investigación y la consoliden como tal, a continuación se dará a conocer el fundamento teórico conceptual que la conforma.

4.2.1 Materiales compuestos

Los materiales compuestos son aquellos conformados por dos o más materiales diferentes, y que no se afectan mutuamente en sus composiciones químicas y/o mecánicas. Según [8] *se entiende por material compuesto aquel formado por dos o más componentes, de forma que las propiedades del material final, sean superiores que las de los componentes por separado.* El autor citado hace algunas consideraciones respecto de la definición sobre materiales compuestos señalando que: *para "ajustar" el término material compuesto a nuestro objeto de estudio: 1. El material compuesto debe ser, expresamente fabricado por la mano del hombre. De este modo queda fuera de nuestra definición una larga lista de materiales compuestos naturales, tales como los que componen nuestros huesos, las masas arbóreas, etc.*

Tal como lo indica [9] los materiales compuestos son diseñados y fabricados con el objetivo de incrementar el desempeño, utilización y efectividad de los materiales por sí solos. Se busca por tanto, obtener propiedades no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.

Los materiales son compuestos cuando cumplen con las siguientes condiciones:

1. Están tomados de 2 ó más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
2. Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interface.
3. Sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes (sinergia).
4. No pertenecen a los materiales compuestos, aquellos materiales polifásicos; como las aleaciones metálicas, en las que mediante un tratamiento térmico se cambian la composición de fases presentes.

4.2.1.1 Componentes de los materiales compuestos

Los diferentes tipos de materiales compuestos están constituidos por dos elementos principales: la matriz y el refuerzo. La matriz es el componente utilizado para actuar como ligante en una fase continua.

El refuerzo por el contrario, trabaja en fase discontinua actuando como elemento resistente según lo afirma [10]

4.2.2 Resinas

En la siguiente tabla se describen las diferentes resinas que pueden encontrarse en el mercado, las cuales son utilizadas como uno de los materiales base para realizar diferentes compuestos.

Tabla 1: Clasificación de resinas.

ORGANICAS	INORGANICAS	Cemento, Geopolímeros, Yeso, Matrices Cerámicas, Matrices Metálicas
	TERMOESTABLES	Epoxi, Viniléster
		Poliéster, Fenólica
		Esteres Cianato
		Bismaleimidas, Poliimidas
		Polieteramida
	TERMOPLÁSTICAS	Policloruro de Vinilo (PVC)
		Copolímeros de Estireno (ABS,SAN)
		Polietileno (PE)
		Polipropileno (PP)
		Policarbonato (PC)
		Polimetacrilato de Metilo (PMMA)
		Acetato
Poliestireno (PS)		
Polioximetileno (POM)		
Polieterimida, PET, Nylon		
Poliamida, PEKK, PEEK, PAI,PAS		

Recuperado en:

MIRAVETE, Antonio. Materiales Compuestos I. Editorial Reverté: Barcelona, España, 2003, el día 2 de septiembre de 2013

4.2.2.1 Resina Cristalán 856

Cristalán 856 [11] es una resina poliéster ortoftálica preacelerada, muy versátil, para la aplicación de propósito general que no requieren exigencias en propiedades mecánicas y químicas. Cristalán 856 [11] no es apto para la fabricación de botes y tanques. Es apropiada para trabajar por laminación manual, o moldeo a máquina, y para sistemas cargados. Los laminados obtenidos tienen buena resistencia mecánica. La resina se suministra al 70 % en sólidos y puede ser modificada por el usuario con la adición de estireno monómero hasta un 30% máximo, según su aplicación particular.

Tabla 2: Característica de la Resina

Características	Valor
Apariencia	Rosada transparente
Valor ácido	42 máximo
Viscosidad Brookfield (cps) 25°C	
Aguja 3, 10 r.p.m., 1 min.	1500-2500
%Sólidos	68-72
Tiempo de Gel (minutos), 25°C	7-10
Temperatura de exotermia, °C	130-145
Tiempo de exotermia (minutos)	14-25

Tiempo de Gel:
100 Gramos de CRISTALAN 856
1 ml de MEK- peróxido

4.2.2.2 Resinas termoplásticas

Su principal característica es que para fundirse o plastificarse se necesita un suministro de calor, es decir, se debe incrementar la temperatura para alcanzar el cambio de fase, pero no ocurre un cambio químico y el proceso de fundición-solidificación se puede repetir indefinidamente [12].

4.2.2.3 Resinas Termoestables

También llamadas termoendurecibles. En esta categoría se encuentran todas las resinas que al incrementar su temperatura no cambian de fase, es decir, de sólido a líquido. Una vez solidificada no pueden volverse a fundir sin sufrir una degradación, y en su mayoría las resinas termoestables son insolubles. Por lo general, pueden polimerizar (proceso de curado) a temperatura ambiente pero el material deberá ser expuesto a una temperatura relativamente alta en un curado final para garantizar la vida en servicio. Las tensiones de contracción durante el

curado, que produce una reacción exotérmica, pueden ser suficientes para producir microfisuras en el material [12].

4.2.3 Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura.

En la tabla 3 se muestra la clasificación de las resinas termoestables en función de su temperatura de servicio según [8].

Tabla 3: Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura

BAJAS TEMPERATURAS	POLIÉSTER	ISOFTÁLICA
		ORTOFTÁLICA
		ÁCIDO CALIENTE
MEDIAS TEMPERATURAS	VINILESTER	
	EPOXI	
MEDIAS - ALTAS TEMPERATURAS	FENÓLICA	
ALTAS TEMPERATURAS	BISMALEIMIDA	
	POLIIMIDA	
	ESTERES CIANATO	
	POLIETERAMIDA	

4.2.3.1 Resinas epoxi

Las resinas epoxi son más caras respecto a las resinas de poliéster, pero tienen grandes ventajas, especialmente en sus propiedades de tensión de rotura y más baja contracción después del curado. Las resinas epoxi se utilizan usualmente como materiales matriz para materiales compuestos de fibras de vidrio, Aramida, carbono y en este caso la fibra de coco. El sistema epoxi se presenta como:

Resina (componente A) + Endurecedor (componente B)

En este caso el endurecedor forma parte del producto final después del fraguado. Se utilizan dos familias resina más *amina* o bien resina más *anhídrido*. El sistema con aminas es muy usado, cura a temperatura ambiente y tiene buena viscosidad, pero es muy alergénico. El sistema con anhídridos es más líquido se utiliza frecuentemente en el proceso de pultrusión, bobinado, etc. y la temperatura de curado es de 100-120 °C [12].

4.2.3.2 Resina Viniléster

Están catalogadas como termoendurecibles, son relativamente recientes. Estas son el resultado de una poliadición de resina epoxi sobre el ácido insaturado acrílico o metacrílico. Dichas resinas poseen: buenas cualidades mecánicas, excelente resistencia a la fatiga, buena adhesión sobre las fibras de refuerzo, resistente a la corrosión, incluso en agua caliente [12].

4.2.3.3 Resina de esteres cianato

Este tipo de resinas es adaptable a diferentes usos debido a que tienen una elevada resistencia, dureza y propiedades eléctricas y una baja absorción de humedad. Se pueden utilizar a altas temperaturas y su curado es sencillo, comparado con las demás resinas [12].

4.2.3.4 Resinas Polieteramida

Están diseñadas para competir con la resina epoxi en costos y prestación de servicio, como resultado de su utilización a altas temperaturas y la estabilidad ante la oxidación ofrecida a dichas temperaturas [12].

4.2.3.5 Resinas de Poliéster no saturado

Constituyen una de las familias más utilizadas de las resinas termoestables para laminados de materiales compuestos [12].

Los principales tipos de resina de poliéster son: la ortoftálica que tiene una utilización general; la isoftálica que tiene propiedades de resistencia al desgaste y a los agentes químicos; y por último el ácido caliente que se utiliza como retardador de llama.

4.2.4 Matriz

Es un compuesto o material que contendrá y protegerá las características físicas y químicas de las fibras naturales, en este caso resina poliéster [13].

4.2.5 Fibra natural:

Sustancia extraída de las plantas o animales mediante procesos físicos o mecánicos [13].

4.2.5.1 Descripción de las fibras naturales

Las fibras que predominan a nivel mundial en producción, son yute, sisal, abacá y fique, las cuales están definidas a continuación [13].

4.2.5.1.1 Yute:

El yute es largo, suave y brillante, con una longitud de 1 a 4 metros y un diámetro de entre 17 a 20 micras. Es una de las fibras naturales vegetales más fuertes y sólo está en segundo lugar con el algodón en términos de cantidad de producción. El yute tiene propiedades altamente aislantes y antiestáticas, moderadas de reabsorción de humedad y baja conductividad térmica [13].

4.2.5.1.2 Sisal:

Es una fibra brillante y de un blanco cremoso, la fibra de sisal mide cerca de 1 metro de longitud, con un diámetro de 200 a 400 micras. Es una fibra basta, dura e inadecuada para textiles o telas. Pero es fuerte, durable, alargable, no absorbe humedad fácilmente, resiste el deterioro del agua salada, y tiene una textura superficial fina que acepta una amplia gama de teñidos [13].

4.2.5.1.3 Abacá:

El abacá es una fibra de hoja, compuesta por células largas y delgadas que forman parte de la estructura de soporte de la hoja. El contenido de lignina está

por encima del 15%. El abacá es valorado por su gran resistencia mecánica, flotabilidad, resistencia al daño por agua salada, y por el largo de su fibra –más de 3 metros. Las mejores clasificaciones del abacá son finas, brillantes, de un color habano claro y muy fuertes [14].

4.2.5.1.4 Fique:

Estas fibras poseen propiedades especiales para la producción de pulpa de papel, materiales para la construcción, biomantos, aislantes térmicos, entre otros. Por sus características fibrosas se convierte en una excelente alternativa para este sector y contribuye con la conservación ambiental [13].

4.2.6 Probeta

Muestra graduada de cualquier sustancia o material para probar su elasticidad, resistencia, etc. [13].

4.2.7 Prueba mecánica

Las pruebas mecánicas son ensayos realizados a una probeta con el fin de medir e identificar sus propiedades mecánicas, tales como flexión, tensión e impacto. [15]

4.2.8 Propiedades mecánicas de los materiales

Las propiedades mecánicas de un material describen el modo en que este responde a la aplicación de una fuerza o carga. Solamente se pueden ejercer tres tipos de fuerzas mecánicas que afecten a los materiales: compresión, tensión y cizalladura. En la figura 3 se muestra la acción de estas tres fuerzas. [15]

Figura 3: Los tres tipos de tensión

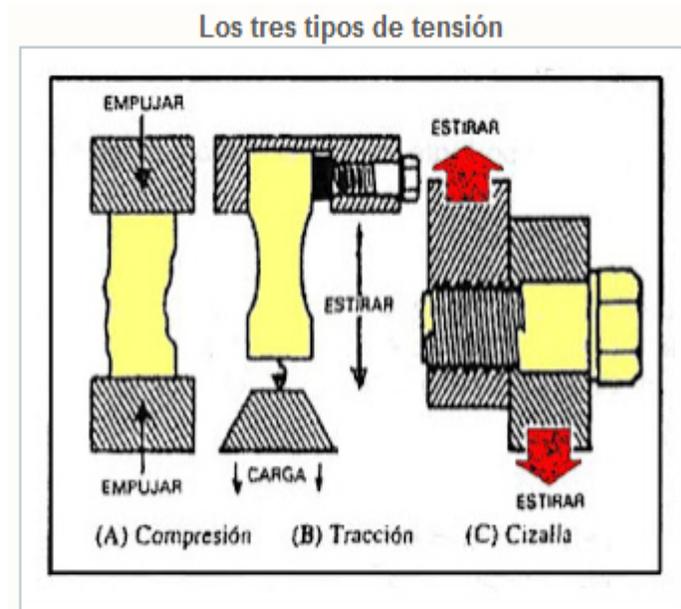


Imagen tomada de: Desarrollo material polimérico reforzado con fibras naturales. Tesis realizada por Diego Andrés Parra y Miguel Ángel Sánchez Zarate. Universidad EAN, Bogotá: 2012

4.2.8.1 Tensión:

Consideremos una varilla cilíndrica de longitud l_0 y una sección transversal de área A_0 sometida a una fuerza de tensión uniaxial F . (unalmed.edu.co) [13]

- a. Barra antes de aplicarle la fuerza
- b. Barra sometida a una fuerza uniaxial F que alarga la barra de longitud l_0 a l .

Por definición, la tensión s en la barra es igual al cociente entre la fuerza de tensión uniaxial media F y la sección transversal original A_0 de la barra.

Resistencia a la tracción y elongación a la rotura: la resistencia a la tracción o tenacidad es el máximo esfuerzo que un material puede resistir antes de su rotura por estiramiento desde ambos extremos con temperatura, humedad y velocidad especificadas. El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

Figura 3: Dispositivo para ensayos de tracción

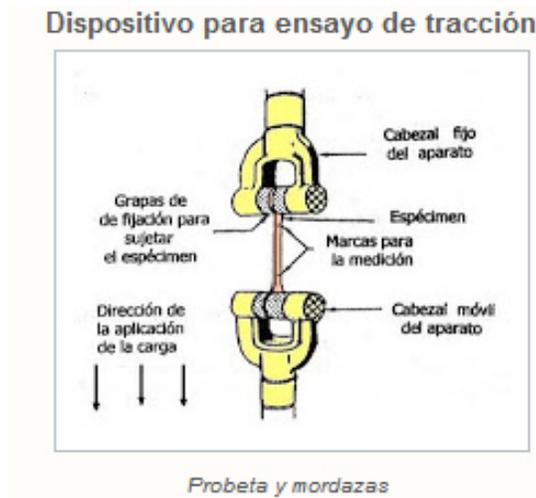


Imagen tomada de: Desarrollo material polimérico reforzado con fibras naturales. Tesis realizada por Diego Andrés Parra y Miguel Ángel Sánchez Zarate. Universidad EAN, Bogotá: 2012.

La elongación o extensión es el máximo esfuerzo de tracción a que un material puede estar sujeto antes de su rotura. Para la resistencia a la tracción, el esfuerzo es la relación de la carga sobre el área de la sección transversal inicial y se expresa comúnmente en Pa (pascuales). La extensión o aumento en longitud se expresa en porcentaje del largo inicial. La resistencia a la tracción y la deformación a la rotura, respectivamente indican el máximo esfuerzo que el material puede soportar. [15]

Curva tensión-deformación: en el ensayo a la tracción se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta). En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas. [16]

Módulo de elasticidad: el módulo de elasticidad es la razón de esfuerzo a deformación o esfuerzo por unidad de deformación medido dentro de los límites de la deformación reversible. El módulo de elasticidad para una tensión o compresión se denomina Módulo de Young (Y) [17]

$$Y = \frac{\text{tensión}}{\text{deformación}} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad \text{Ecuación 1}$$

Imagen tomada de: *Física para la ciencia y la tecnología*. Texto escrito por Gene Mosca y Paul Allen Tipler. Volumen I, Ed. Reverté; 2006, España.

Donde el esfuerzo es representado por la fuerza F por unidad de área, sobre la sección inicial dividido entre la sección final.

4.2.8.2 Flexión:

En ingeniería se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término “alargado” se aplica cuando una dimensión es dominante frente a las otras. Un caso típico son las vigas, las que están diseñadas para trabajar, principalmente por flexión. Igualmente, el concepto de flexión se extiende a elementos estructurales superficiales como placas o láminas. El esfuerzo por flexión puro o simple se obtiene cuando se aplican sobre un cuerpo pares de fuerza perpendiculares a su eje longitudinal, de modo que provoquen el giro de las secciones transversales con respecto a los inmediatos.

Deformación por flexión: el comportamiento de cualquier barra deformable sometida a un momento flexionante es al que el material en la posición inferior de la barra se alarga y el material en la posición superior se comprime. En consecuencia, entre esas dos regiones existe una superficie neutra, en la que las fibras longitudinales del material no experimentan un cambio de longitud. Además, todas las secciones transversales permanecen planas y perpendiculares al eje longitudinal durante la deformación.

Esfuerzo de Flexión: Esfuerzo normal causado por la “flexión” del elemento. [18]

4.2.8.3 Impacto:

El impacto se refiere a la aplicación repetida de una carga a un material. Cualquier aplicación brusca produce unos esfuerzos que momentáneamente son mayores que los producidos por una carga estática de igual magnitud. El que se produzca o no el fallo de un material a consecuencia de la aplicación de una carga brusca, depende en gran parte de la capacidad que posea el material para absorber la energía cinética del cuerpo que produce el impacto. La capacidad para absorber la energía cinética, depende de la deformación que pueda resistir un material sin que se rompa. [19]

Los ensayos de impacto determinan pues, la capacidad de un material de absorber cargas instantáneas por el trabajo necesario para introducir la fractura de la probeta de un solo choque, el que se refiere a la unidad de área, para obtener lo que se denomina resiliencia.

El objeto del ensayo de impacto es el de comprobar si una máquina o estructura fallará bajo las condiciones que le impone su empleo, muy especialmente cuando las piezas experimentan concentración de tensiones, por cambios bruscos de sección, maquinados incorrectos, fileteados, etcétera., o bien verificar el correcto tratamiento térmico del material ensayado. [18]

Método de Charpy: El péndulo de Charpy es un dispositivo utilizado en ensayo para determinar la cantidad de energía que es capaz de absorber un material cuando recibe un golpe al momento de ser impactado por otro objeto o material. [20] Son ensayos de impacto de una probeta entallada y ensayada a flexión en 3 puntos. El péndulo cae sobre el dorso de la probeta y la parte. La diferencia entre la altura inicial del péndulo (h) y la final tras el impacto (h') permite medir la energía absorbida en el proceso de fracturar la probeta. En estricto rigor se mide la energía absorbida en el área debajo de la curva de carga, desplazamiento que se conoce como resiliencia. La velocidad que adquiere la masa al golpear la probeta queda determinada por la altura del péndulo. Tras la rotura, la masa

continúa su camino hasta llegar a una cierta altura, a partir de la cual se determina la energía absorbida. Así se medirá la energía absorbida por ese golpe.

Figura 4: Método de ensayo de Charpy

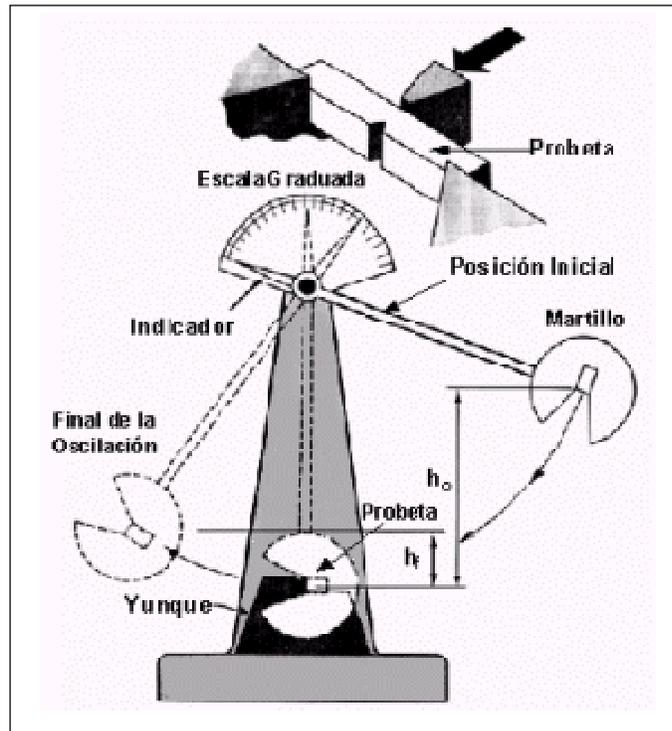


Imagen tomada de: Metalografía. Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda: 2012.

La energía absorbida por la probeta (en [J]), se puede medir calculando la diferencia de energía del péndulo antes y después del impacto, mediante la altura a la que llega el péndulo después de romper la probeta.

El problema de éste método es que resulta muy inexacto medir la altura a la cual llega la masa, entonces como se sabe el ángulo inicial del péndulo (a) y la máquina registra el ángulo final (b), mediante relaciones trigonométricas se llega a relacionar la energía absorbida en función de los ángulos y el largo del brazo.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Este proyecto de investigación será desarrollado en tres fases que se realizarán de manera sistemática con el fin de cumplir los objetivos establecidos y mencionados anteriormente.

Durante la primera fase se llevará a cabo una investigación previa sobre los materiales que se utilizarán a lo largo del proyecto, se estudiarán teniendo en cuenta sus características y comportamiento mecánico.

La segunda fase consistirá en fabricar los materiales compuestos a base de fibra de fique y una matriz de resina de poliéster con los cuales se llevarán a cabo los respectivos ensayos mecánicos necesarios que arrojarán datos, que servirán para analizar las propiedades mecánicas de los materiales, con el fin de compararlos y establecer su comportamiento.

Para finalizar, se llevará a cabo el análisis, tabulación y verificación de los resultados obtenidos a través de los ensayos hechos con los materiales, con el fin de compararlos entre si y establecer su rendimiento y comportamiento.

Este proyecto de grado se desarrollará dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma del Caribe, se llevará a cabo bajo la modalidad de proyecto de grado, como requisito para obtener el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Autónoma del Caribe.

6. METODOLOGÍA

6.1 Investigación previa sobre las fibras naturales.

Se recopilará información de estudios previos a fibras naturales, tales como la de yute, la de fique, la de sisal, y la de coco. Dicha recolección de información se llevará a cabo en la Biblioteca Benjamín Sarta de la Universidad Autónoma del Caribe, y a través de búsqueda bibliográfica y electrónica de libros, artículos y revistas científicas.

6.2 Caracterización de la fibra de fique en términos de sus propiedades físicas.

Se determinarán las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de fique a partir de las siguientes pruebas:

6.2.1 Determinación de la densidad lineal de la fibra de fique.

De acuerdo a la norma ASTM D1577-12, es necesario calcular la densidad lineal a partir de ciertos valores tales como la masa (W) de la fibra de fique (en miligramos) y el número de hilos (N) en una hebra de fique de una pulgada de longitud (L). Los valores de la densidad lineal de fibras textiles son en denier (D) y dtex (Td). Las ecuaciones son las siguientes:

$$Td = 10000 W / (L \times N) \quad (1)$$

$$D = 9000 W / (L \times N) \quad (2)$$

Teniendo en cuenta las anteriores ecuaciones, se deduce la relación entre ambas unidades (dtex y denier), de la siguiente manera:

$$1 \text{ dtex} = 0,9 \text{ denier}$$

Ahora bien, el proceso de medición de los anteriores parámetros se realiza en el Laboratorio de Química de la Universidad Autónoma del Caribe, donde se utiliza una balanza de precisión OHAUS PIONEER para medir la masa de las hebras –

luego de cortarlas a una pulgada y contar sus hilos – para, entonces, calcular la densidad lineal. Cabe aclarar que este proceso se realizó siete veces, pues así lo indica la norma.

6.2.2 Determinación de Diámetros:

La tela de fique se caracteriza por tener en sus hebras, hilos de diámetros muy distintos entre sí, por lo que para la medición de dichos diámetros, se trabajó con una muestra de 100 hilos de fique.

Estas mediciones se hicieron en el Laboratorio de Metalografía de la Universidad Autónoma del Caribe, mediante el uso del durómetro Zwick/Roell, este consta de un plato giratorio que se puede subir y bajar, en este caso, la hebra a medir (diámetro) y un variador de distancias, que es paralelo con una línea fija, a la cual era necesario adaptar la posición de la hebra para la posterior medición de su diámetro, cuyo valor saldría de la distancia que las dos líneas ya mencionadas contorneaban la fibra. Éste instrumento se utilizó en contraste con el microscopio pues aporta mucha más precisión y resultados más exactos ya que el software que utiliza el microscopio no funcionaba.

6.2.3 Ensayo de tensión a la fibra de fique:

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma del Caribe, en primera instancia, una hebra del tejido de fique en 10 ensayos con dos velocidades diferentes: 1 mm/min y 50 mm/min, cuyos valores son el mínimo y el máximo, respectivamente, a los cuales la máquina universal de ensayos puede trabajar. Se realizaron las pruebas con la máquina de sistema hidráulico universal serie UH Shimadzu. La hebra se adaptó de acuerdo a la norma ASTM D3822-07, para su posterior ensayo.

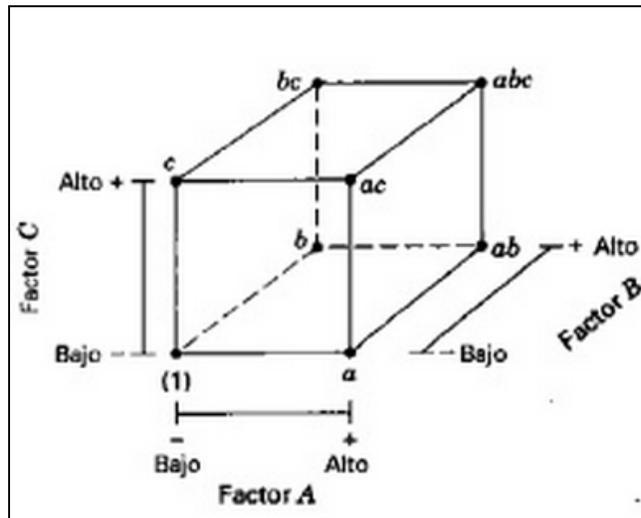
6.2.4 Ensayos de tensión en telas de fique:

Realizando un método similar al anterior de esta metodología, se hicieron 14 probetas de tejidos de fique de iguales dimensiones (250mm x 50mm) las cuales fueron ensayadas a tensión a dos diferentes velocidades (1mm/min para 7 probetas y 50 mm/min para las 7 restantes) en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma del Caribe; procedimiento basado en la norma ASTM D5035-11, cuyo fin es obtener los valores de los esfuerzos máximos a tensión de cada tejido y comparar sus resultados.

6.3 Caracterización de la resina.

Se utilizará el diseño experimental 2^3 en el cual los tres factores A , B y C , cada uno con dos niveles, son de interés. Al diseño se le llama **diseño experimental 2^3** para el cual se realiza la representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos, a través de un cubo.

Figura 5: Representación geométrica del diseño experimental 2^3



Consideremos a continuación la estimación de los efectos principales: primero, se establece la estimación del efecto principal de A . el efecto de A cuando B y C

están en el nivel bajo es $[a - (1)] / n$. De manera similar, el efecto de A cuando B está en el nivel alto y C está en el nivel bajo es $[ab - b]/n$. El efecto de A cuando C está en el nivel alto y B está en el nivel bajo es $[ac - c]/n$. Por último el efecto de A cuando tanto B como C están en el nivel alto es $[abc - bc]/n$. Por lo tanto el efecto promedio de A es sólo el promedio de estos cuatro efectos. [21]

El diseño experimental 2^3 se utilizará para establecer las diferentes proporciones de cada componente: resina, catalizador y Thinner que harán parte del material compuesto. A partir de allí, se establecerá el número de probetas que serán sometidas a ensayos de Tensión, Flexión e Impacto con el objetivo de identificar sus propiedades mecánicas. Estas probetas serán sometidas a *Screening*, proceso que permitirá descartar valores que no tengan relación con las demás mezclas.

El sistema de *Screening* es una herramienta muy útil, son sistemas de automatización de respuesta rápida que permiten la reducción de errores debidos a la participación humana, caracterizados por presentar un mayor énfasis cualitativo que cuantitativo con un tratamiento simple de la muestra. [22]

6.3.1 Proceso de obtención y fundición de resinas.

En esta investigación se utilizó un molde especial para fundir las mezclas construido de madera. Las probetas fueron diseñadas con una composición o variable a base de: resina poliéster (CRISTALÁN 856), catalizador (MEK-peróxido) y diluyente (thinner).

6.3.2 Pruebas de tensión.

La prueba de tensión regida bajo la norma ASTM D3039, se realizará en la máquina de sistema hidráulico universal serie UH Shimadzu. Se ensayarán 5 probetas por cada mezcla establecida, con dimensiones de 250mm de largo por 12mm de ancho y 8mm de espesor. Se mantendrá una distancia entre mordazas de 150mm y una velocidad de 5mm/min para todas las probetas. Las probetas

fueron sometidas a un proceso denominado *Screening*, el cual permite a través de una ventana que contiene las mezclas ideales o más cercanas entre sí, en términos de las variables controlables (thinner y el catalizador), descartar valores que no tengan cercanía o relación con las demás mezclas.

6.3.3 Pruebas de flexión.

Las pruebas se realizarán en la máquina de sistema hidráulico universal serie UH Shimadzu. El método a utilizar es el descrito en la norma ASTM D790 como ensayo de flexión en tres puntos. La geometría de las probetas será de sección transversal rectangular manteniendo dimensiones de 187mm de largo y 12mm de ancho. La distancia entre los apoyos se ajustará a 100mm + 3 veces el espesor de la probeta y la prueba será aplicada a una velocidad de 5mm/min.

6.3.4 Pruebas de impacto.

Estas pruebas serán realizadas en un Péndulo Charpy TERCO MT 3016 Impact Tester bajo el método E descrito en la norma ASTM D256. Las probetas constarán de 63mm de largo, 12mm de ancho y 8mm de espesor con sección transversal rectangular. Al igual que en los ensayos descritos con anterioridad, se fabricarán 5 probetas por cada mezcla y serán ensayadas para determinar cuál mezcla es la que absorbe más energía.

6.4 Caracterización de los materiales compuestos a través de ensayos mecánicos.

Luego de determinar la mezcla que presente los mejores resultados en términos de sus propiedades mecánicas, se procederá a fabricar materiales compuestos con base en el diseño experimental 2³, que constaba de dos factores (tipos de mezcla y número de capas de fibra de fique) y tres niveles controlables (tres diferentes tipos de mezclas y 3, 4 y 5 capas de fibra de fique) y así someterlas a los ensayos de tensión, flexión e impacto, por medio de diversos equipos, tales como la máquina universal de ensayos y el método de ensayo de Charpy para ensayo de impacto.

6.4.1 Pruebas de tensión

Las dimensiones nominales de las probetas para realizar este ensayo fueron de 300x30x10 mm. Para el montaje en la máquina de sistema hidráulico serie UH Shimadzu del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma del Caribe, la distancia entre mordazas fue de 150 mm, es decir, que cada mordaza sujetaba 75 mm de cada extremo de la probeta, de acuerdo con la norma ASTM D3039.

6.4.2 Pruebas de flexión

Se ensayaron 3 probetas para cada compuesto de acuerdo a la norma ASTM D790-10. Para este ensayo y el de impacto, se utilizaron 3 probetas divididas en dos partes, una de 287 mm y otra de 63 mm, respectivamente. El ancho (30mm) y el espesor (10 mm) de las probetas no se modificaron.

6.4.3 Pruebas de impacto

Se ensayaron 3 probetas para cada material compuesto de dimensiones 63x15x10 mm en el péndulo Charpy TERCO MT 3016 Impact Tester del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma del Caribe. El proceso consistía en colocar la probeta en el yunque del péndulo y a través de una palanca se liberaba el martillo que la rompería al hacer contacto con ella. Se trabajó de acuerdo con la norma ASTM D256.

7. RESULTADOS

7.1 Caracterización de la fibra de fique

De las pruebas realizadas para caracterizar la fibra de fique, se obtuvieron los siguientes resultados:

7.1.1 Densidad lineal

La tabla 4 muestra los diferentes valores encontrados con respecto a la densidad lineal de las 7 muestras de fique (de 1 pulgada o 25.4 mm de longitud) seleccionadas al iniciar la investigación.

Tabla 4: Resultados de la densidad lineal de las muestras de fique.

DENSIDAD LINEAL PARA 7 MUESTRAS DE FIBRAS DE FIQUE			
Masa (mg)	# Fibras	Densidad Lineal (Td) [dtex]	Densidad Lineal (D) [denier]
13	30	170,60	153,54
24	68	138,95	125,06
24	64	147,64	132,87
22	43	201,43	181,29
19	38	196,85	177,17
25	63	156,23	140,61
25	74	133,01	119,71
Promedio		163,53	147,18
Desviación Estándar		27,20	24,48

Figura 6: Medición de la masa de la fibra de fique



Figura 7 Medición del número de hilos en una hebra de fique



7.1.2 Medición de diámetros:

Para obtener el intervalo de diámetros de la fibra de fique para trabajar, se realizó un diagrama de distribución de frecuencias o histograma, mediante fórmulas estadísticas tales como la regla de Sturges ($m = 1 + 3.3 \log n$). Se tuvo en cuenta para ello, el ancho de la muestra (n), el rango (R) y el ancho de clase (c).

A continuación, en la tabla 5 se muestran los valores ya calculados, la distribución de frecuencias y el histograma correspondiente:

Tabla 5: Resultados de la medición de los diámetros del fique

Muestra (n)	100		
$R = \text{Max} - \text{Min}$	0,2006		
$m = 1 + 3.3 \log n$	7,6	8	Valor redondeado
Ancho intervalo (C)	0,0251		

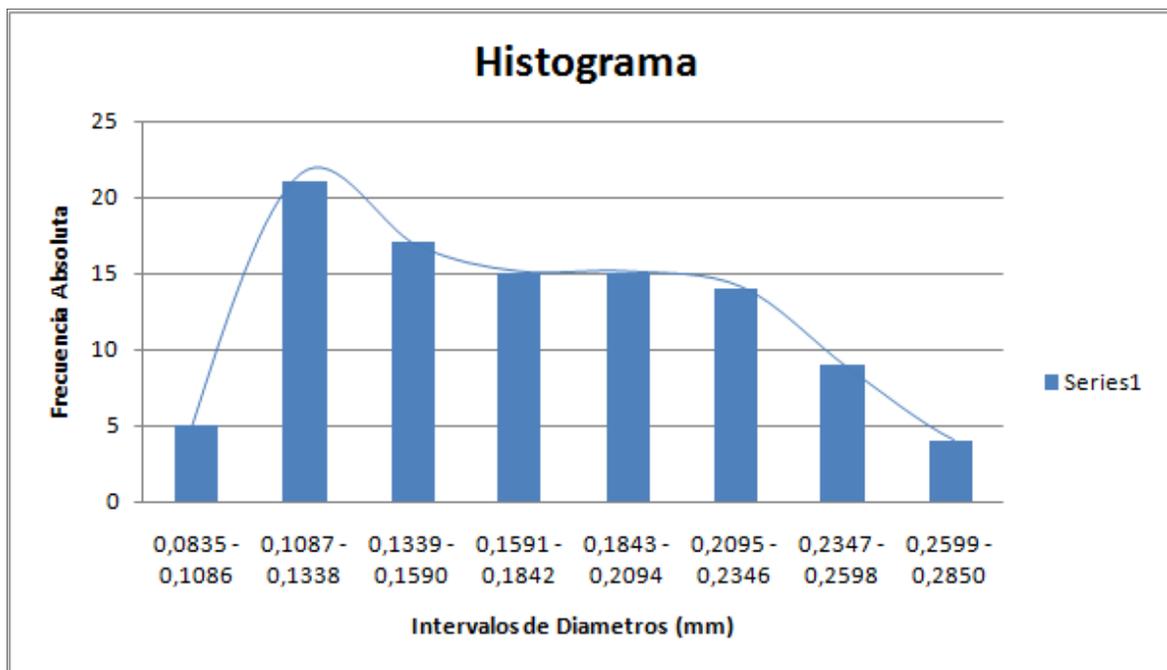
Ya que el valor de m es 7.6, se debe aproximar al entero más cercano, que en este caso es 8, lo que significa que habrá ocho intervalos distintos para los diámetros.

Tabla 6: Intervalos de diámetros

Clase	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
0.0835 - 0.1086	5	0,05
0.1087 - 0.1338	21	0,21
0.1339 - 0.1590	17	0,17
0.1591 - 0.1842	15	0,15
0.1843 - 0.2094	15	0,15
0.2095 - 0.2346	14	0,14
0.2347 - 0.2598	9	0,09
0.2599 - 0.2850	4	0,04
Σ	100	1

Por medio de esta distribución de frecuencias, puede verse que la mayoría de diámetros medidos se encuentra en el segundo intervalo de la tabla 6, el cual se verá con mejor claridad en la figura 9:

Figura 8: Histograma que muestra la frecuencia absoluta vs Intervalos de diámetro

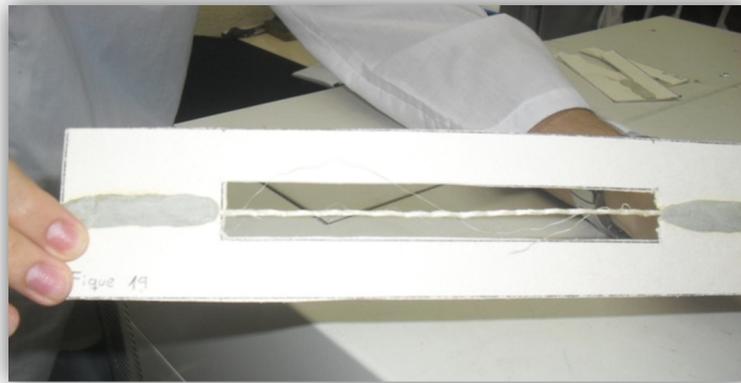


Por consiguiente, el intervalo de diámetros de la fibra de fique a trabajar es [0,1087 – 0,1338] milímetros.

7.1.3 Ensayo de Tensión a la fibra de fique

La adaptación de la hebra consiste de un marco de cartón paja de 250x60 mm, con una abertura de 150x20 mm, donde la fibra estará pegada, extremo a extremo del marco y centrada en la abertura, de tal manera que al momento de ensayar, la hebra siempre esté totalmente vertical y no sufra deslizamientos por las mordazas de la máquina (distancia entre mordazas de 150 mm).

Figura 9: Molde utilizado para la prueba de tensión en la hebra de fique



Cabe aclarar que el marco debe ser cortado por los costados luego de haber hecho el montaje de la probeta en la máquina, para que solamente sea la fibra la que sea sometida al ensayo de tensión.

Figura 10: Corte del marco que sostiene la fibra



Figura 11: Fibra sometida al ensayo de tensión



El propósito de este ensayo es calcular, a diferentes velocidades, los valores de la tenacidad (cN/tex y gf/tex), el módulo de elasticidad (cN/tex y gf/tex) y el porcentaje de elongación en la rotura.

De los cálculos realizados y requeridos por la norma ASTM D3822-07 y teniendo en cuenta la densidad lineal del fique (16,353 Tex) se obtuvieron los siguientes valores reflejados en la tabla 7:

Tabla 7: Resultados de ensayo de tensión a la fibra de fique a 1 mm/min.

ENSAYO DE TENSIÓN A LA FIBRA DE FIQUE A					1mm/min
FIBRA	BREAKING TENACITY		INITIAL MODULUS		ELONGATION
	cN/tex	gf/tex	cN/tex	gf/tex	AT BREAK
1	722,29	736,53	642,412	655,078	0,11%
2	861,30	878,28	840,184	856,750	0,10%
3	958,53	977,42	832,926	849,348	0,12%
4	572,61	583,90	554,991	565,934	0,10%
5	589,84	601,47	527,716	538,120	0,11%
PROMEDIO	740,91	755,52	679,646	693,046	0,11%
DESVEST	168,33	171,65	149,395	152,340	0,01%

Tabla 8: Resultados de ensayo de tensión a la fibra de fique a 50 mm/min.

ENSAYO DE TENSIÓN A LA FIBRA DE FIQUE A 50mm/min					
FIBRA	BREAKING TENACITY		INITIAL MODULUS		ELONGATION AT BREAK
	cN/tex	gf/tex	cN/tex	gf/tex	
6	899,11	916,84	16,993	17,328	5,29%
7	844,06	860,71	20,098	20,494	4,20%
8	710,19	724,19	13,257	13,518	5,36%
9	526,82	537,21	14,751	15,042	3,57%
10	926,93	945,20	30,140	30,734	3,08%
PROMEDIO	781,42	796,83	19,048	19,423	4,30%
DESVEST	164,96	168,21	6,715	6,847	1,02%

Para representar gráficamente los resultados arrojados que se muestran en las tablas 7 y 8, se hicieron las siguientes gráficas mostradas en las figuras 13 y 14, las cuales reflejan el comportamiento del fique en cuanto a esfuerzos vs deformación. Las graficas muestran cómo las curvas cambian con respecto al grosor de las fibras de fique, dependiendo de la velocidad a la cual son sometidas.

Figura 12: Esfuerzo vs. Deformación del fique ensayado a 1 mm/min.

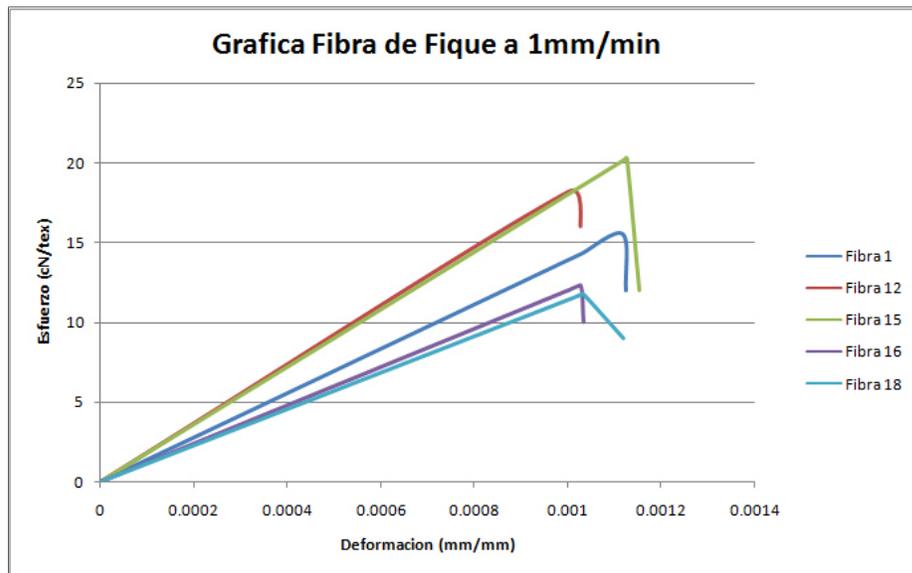
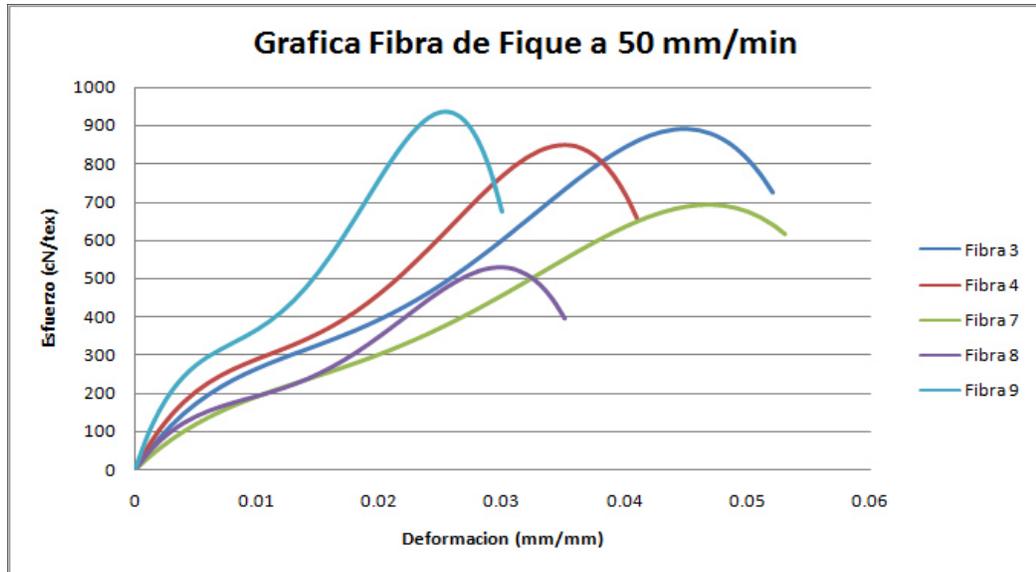


Figura 13: Esfuerzo vs. Deformación del fique ensayado a 50mm/min



7.1.4 Ensayos de tensión en telas de fique

Siguiendo la metodología explicada, el montaje de la tela de fique en la máquina universal de ensayos del Laboratorio de Resistencia de la Universidad Autónoma del Caribe, se muestra en las figuras 15 y 16 respectivamente:

Figura 14: Telas de fique en mordazas



Figura 15: Telas ensayadas en tensión



A partir de los datos obtenidos en el software TRAPEZIUM®, tales como carga en mN y alargamiento en mm, se buscaron los tramos lineales de las curvas mostradas por dicho programa, de los cuales se determinaron los valores de la carga máxima (P, en miliNewtons) en 8 probetas de tela de fique divididas en 2 velocidades (1mm/min y 50mm/min, respectivamente). Los resultados son mostrados en las tablas 9 y 10:

Tabla 9: Resultados de ensayos de tensión a la tela de fique a 1 mm/min

ENSAYO DE TENSIÓN A TELA DE FIQUE A 1 mm/min	
PROBETA #	CARGA MÁXIMA (N)
	PROMEDIO
1	98,15
2	77,75
3	45,64
4	12,6
PROMEDIO	58,53
DESVIACION	37,48

Tabla 10: Resultados de ensayos de tensión a la tela de fique a 50 mm/min

ENSAYO DE TENSION A TELA DE FIQUE A 50 mm/min	
PROBETA #	CARGA MÁXIMA (N)
	PROMEDIO
5	121,98
6	111,32
7	69,72
8	85,03
PROMEDIO	97,01
DESVIACION	23,92

7.2 Caracterización de la resina

Se realizó el proceso de fusión de la resina junto con el catalizador y el diluyente en el molde listo para ser utilizado, al cual en primer lugar, se le aplicó el desmoldante necesario para facilitar la extracción de las probetas, tal como se muestra en las figuras 17 y 18 respectivamente.

Figura 16: Moldes y materiales utilizados en la fundición de resina



Figura 17: Método de elaboración de resina



Durante este proceso, se hacen modificaciones en las cantidades de los dos factores controlables (catalizador y thinner) y se restringe para bloquear a la cantidad de resina (200 gramos para el segundo proceso).

En total, se fundieron 91 probetas con 13 mezclas diferentes (7 probetas para cada mezcla), las cuales fueron analizadas de forma visual y sometidas a diferentes pruebas mecánicas, tales como ensayo de flexión, tensión e impacto para su posterior selección en esta investigación. Los componentes para cada mezcla se encuentran relacionados en la tabla 11:

Tabla 11: Componentes para las mezclas en el primer ensayo

PRIMER ENSAYO DE MEZCLAS			
MEZCLA #	Resina (g)	Catalizador (g)	Thinner (g)
1	100	1,61	0
2	100	3,22	0
3	100	4,83	0
4	100	3,22	10
5	100	3,22	25
6	100	2,415	5
7	100	2,415	10
8	100	2,415	15
9	100	3,22	5
10	100	3,22	15
11	100	4,025	5
12	100	4,025	10
13	100	4,025	15

La masa del catalizador fue calculada a partir de su densidad a temperatura ambiente (805 kg/m^3) y del volumen medido para experimentación (en cm^3).

La proporción (en porcentaje) de los componentes en las primeras mezclas fundidas se muestra en la tabla 12:

Tabla 12: Porcentaje de composición de mezclas

PORCENTAJE (%) COMPOSICIÓN MEZCLAS			
MEZCLA #	% Resina	% Catalizador	% Thinner
1	98,4	1,6	0
2	96,9	3,1	0
3	95,4	4,6	0
4	88,3	2,8	8,8
5	78	2,5	19,5
6	93,1	2,3	4,7
7	89	2,2	8,9
8	85,2	2,1	12,8
9	92,4	3	4,6
10	84,6	2,7	12,7
11	91,7	3,7	4,6
12	87,7	3,5	8,8
13	84	3,4	12,6

De las anteriores mezclas, la número 9 experimentó un secado instantáneo; pero la mezcla número 5 fracturó durante el proceso de curado. Se le llama curado al proceso de preparación y fundición de mezclas, agregando los componentes ya establecidos para cada mezcla, y esperando su reacción con variables climáticas como la temperatura y la humedad del ambiente que influirían en su secado. Estas mezclas se caracterizaron, en términos generales, por reaccionar exotérmicamente, es decir, generaron calor durante el curado.

Por lo tanto, se decidió descartar la mezcla número 5, debido a su excesiva cantidad de diluyente, el cual originó su fractura durante el curado.

Así pues, se continuó con el proceso de fundición de mezclas, esta vez duplicando los valores de cada componente y eliminando la mezcla ya mencionada.

Figura 18: Esquema de diseño de estadística del experimento para relacionar con sus factores controlables (catalizador y thinner) y el bloqueador (resina). Las rebabas se desprecian en el proceso.

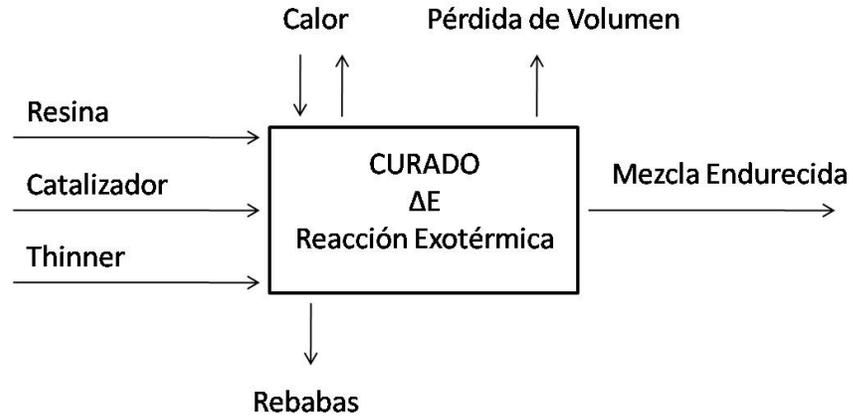
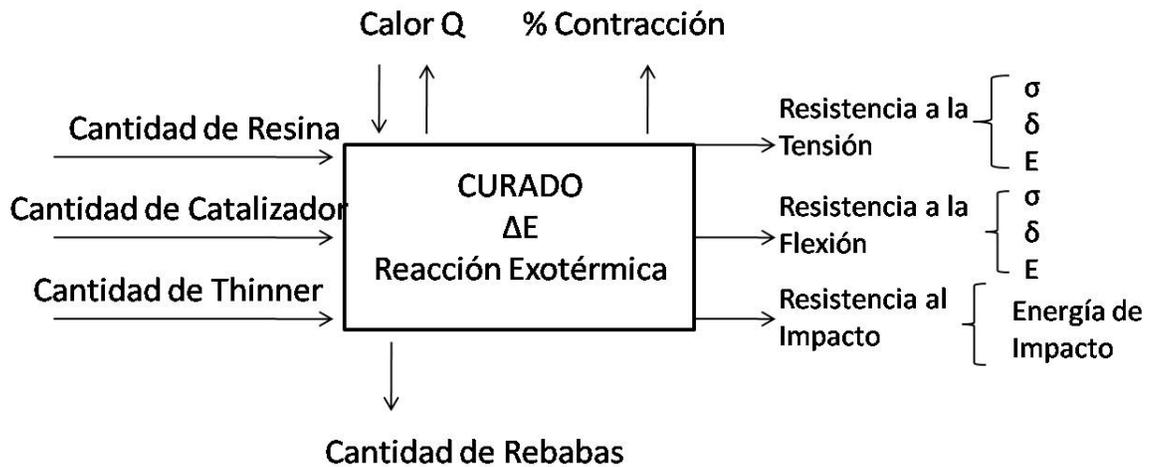


Figura 19: Esquema de diseño de estadística del experimento para relacionar con sus respuestas y propiedades a medir y evaluar mecánicamente. La cantidad de rebabas se desprecia en el proceso.



Las nuevas mezclas a estudiar y analizar, junto con sus componentes para un segundo ensayo se encuentran relacionadas en la tabla 13:

Tabla 13: Segundo ensayo de mezclas

SEGUNDO ENSAYO DE MEZCLAS			
MEZCLA No.	Resina (g)	Catalizador (g)	Thinner (g)
1	200	4	0
2	200	8	0
3	200	12	0
4	200	6	20
5	0	0	0
6	200	6	10
7	200	6	20
8	200	6	30
9	200	8	10
10	200	8	30
11	200	10	10
12	200	10	20
13	200	10	30

Y sus respectivos porcentajes de proporción los cuales se pueden visualizar en la tabla 14:

Tabla 14: Porcentajes de las mezclas finales

SEGUNDO ENSAYO DE MEZCLAS			
MEZCLA No.	Resina (g)	Catalizador (g)	Thinner (g)
1	98,4	1,6	0
2	96,9	3,1	0
3	95,40	4,6	0
4	88,30	2,8	8,8
5	0,00	0,0	0
6	93,10	2,3	4,7
7	89,00	2,2	8,9
8	85,20	2,1	12,8
9	92,40	3,0	4,6
10	84,60	2,7	12,7
11	91,70	3,7	4,6
12	87,70	3,5	8,8
13	84	3,4	12,6

7.2.1 Ensayo de tensión en las resinas:

Finalizado el proceso de curado de las mezclas, se realizó el ensayo de tracción de las resinas para su caracterización. Las dimensiones nominales de las probetas para realizar este ensayo fueron de 250x12x8 mm. Para el montaje en la máquina de sistema hidráulico universal serie UH Shimadzu, la distancia entre mordazas fue de 150 mm, es decir, que cada mordaza sujetaba 50 mm de cada extremo de la probeta, de acuerdo con la norma ASTM D3039.

Mediante el software TRAPEZIUM®, se logró obtener las curvas de carga (mN) vs alargamiento (mm) de cada ensayo. Las probetas fueron sometidas a velocidades constantes de 5mm/min. A partir de este ensayo realizado se determinaron las magnitudes del esfuerzo máximo a la tensión, promediando los resultados de las 5 probetas ensayadas por cada mezcla. Así mismo, el módulo de elasticidad de la resina y su respectiva deformación. Los resultados obtenidos de los ensayos se encuentran en la tabla 15:

Tabla 15: Resultados de tensión de la resina

MEZCLA	ESFUERZO MÁXIMO (MPa)		DEFORMACIÓN (mm/mm)		MÓDULO ELÁSTICO (MPa)	
	Promedio	Desviacion Estandar	Promedio	Desviacion Estandar	Promedio	Desviacion Estandar
1	41,739	8,814	0,028	0,007	892.539,857	88.666,296
2	43,000	2,993	0,041	0,008	719.783,167	39.845,561
3	27,539	4,135	0,063	0,015	431.313,571	133.842,273
4	6,034	0,893	0,020	0,004	69.984,143	6.418,718
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	9,019	4,365	0,024	0,010	408.875,716	195.990,999
7	5,688	0,716	0,122	0,014	59.918,857	8.453,683
8	4,144	0,503	0,039	0,003	126.931,167	12.560,398
9	10,631	1,201	0,100	0,030	221.513,000	96.088,119
10	2,949	0,362	0,083	0,010	34.284,000	2.250,882
11	7,754	4,762	0,091	0,014	196.830,000	50.526,253
12	5,662	0,935	0,107	0,015	57.289,500	9.323,590
13	2,973	0,599	0,082	0,005	31.245,400	6.894,462

De los anteriores resultados, se destacan los valores obtenidos para la mezcla 8, cuyo esfuerzo máximo a la tensión es de $10,631 \pm 1,201$ MPa, una deformación de $0,1 \pm 0,03$ mm/mm y un módulo elástico de $221,5 \pm 96,09$ MPa.

7.2.2 Ensayo de flexión en las resinas:

Se ensayaron 5 probetas para cada mezcla de acuerdo a la norma ASTM D790-10. Para este ensayo y el de impacto, se utilizaron 5 probetas divididas en dos partes, una de 187 mm y otra de 63 mm, respectivamente. El ancho (12 mm) y el espesor (6 mm) de las probetas no se modificaron.

Para los cálculos del esfuerzo máximo a flexión, esfuerzo de rotura, módulo de elasticidad y deformación de las probetas, se tuvo en cuenta el diámetro del punzón (50 mm) más el diámetro de los rodillos (50 mm) los cuales están ubicados en el banco de flexión, es decir, 100 mm de separación, más tres veces el espesor de la probeta (18 mm), de acuerdo a la norma. Es decir, que la distancia entre apoyos fue de 118 mm, valor que se mantuvo igual para el cálculo de los parámetros ya mencionados.

Figura 20: Probeta puesta en rodillos de máquina de flexión



Figura 21: Probeta sometida a flexión a tres puntos



De los cálculos realizados, los valores de los esfuerzos de rotura, la deformación y el módulo elástico de la resina en flexión, se muestran en la tabla 16 para las diferentes resinas ensayadas:

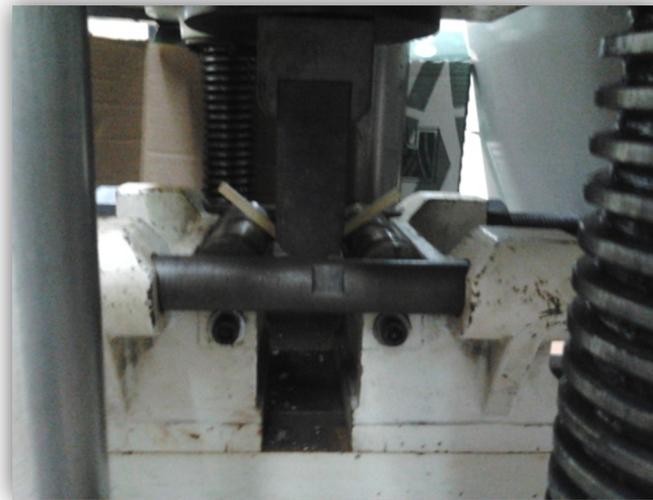
Tabla 16: Resultados de flexión de resinas

MEZCLA	ESFUERZO FLEXION DE ROTURA (MPa)		DEFORMACIÓN EN FLEXIÓN (mm/mm)		MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	
	Promedio	Desviacion Estandar	Promedio	Desviacion Estandar	Promedio	Desviación Estandar
1	110,67	31,51	0,02	0,00	652.528,15	207.961,34
2	80,03	23,97	0,02	0,01	330.623,54	66.511,25
3	56,94	22,46	0,03	0,02	143.001,43	77.337,85
4	22,74	7,82	0,06	0,01	31.511,19	10.856,03
5	-	-	-	-	-	-
6	39,24	10,39	0,07	0,02	50.846,49	14.991,79
7	21,98	18,55	0,09	0,02	14.866,06	8.167,20
8	12,14	8,71	0,09	0,03	11.015,89	9.720,08
9	-	-	-	-	-	-
10	23,82	5,65	0,05	0,02	50.149,38	21.036,44
11	18,41	8,65	0,07	0,01	26.580,89	12.573,40
12	26,69	5,81	0,09	0,03	25.577,02	1.427,35
13	15,78	6,66	0,07	0,02	16.360,69	5.267,00

De los anteriores resultados, se destacan las mezclas 5 y 8, pues tienen valores muy satisfactorios en cuanto a los esfuerzos a flexión que pueden llegar a soportar hasta su rotura ($39,24 \pm 10,39$ MPa y $23,82 \pm 5,65$ MPa,

respectivamente), además de la poca deformación ($0,07 \pm 0,02$ mm/mm y $0,05 \pm 0,02$ mm/mm, respectivamente) y un alto módulo de elasticidad a la flexión ($50,86 \pm 15$ MPa y $50,15 \pm 21,04$ MPa, respectivamente). No obstante, si se compara dicho par de mezclas, debe catalogarse como la mejor aquella cuyo esfuerzo de rotura por flexión sea mayor y cuya deformación sea menor. Tal es el caso de la mezcla número 5.

Figura 22: Flexión de probeta



7.2.3 Ensayo de impacto en las resinas:

Se ensayaron 5 probetas para cada mezcla de dimensiones 63x12x6 mm en el péndulo Charpy. El proceso consistía en colocar la probeta en el yunque del péndulo y a través de una palanca se liberaba el martillo el cual rompería la probeta al hacer contacto con ella. Se trabajó de acuerdo con la norma ASTM D256.

Figura 23: Péndulo Charpy



Figura 24: Probeta sometida a ensayo de impacto



La energía absorbida por las probetas fue calculada y, posteriormente, tabulada a partir de los valores que el ensayo de impacto entregaba (ángulo obtenido, energía residual, altura total, peso del martillo, entre otros).

Los valores promediados de las 5 probetas para cada una de las 12 mezclas de resina se encuentran en la tabla 17:

Tabla 17: Resultados impacto de la resina

MEZCLA	ENERGIA DE IMPACTO (J)	
	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR
1	0,65	0,52
2	1,02	0,4
3	0,96	0,52
4	0,6	0,12
5	0	0
6	1,25	0,55
7	0,72	0,17
8	0,60	0,12
9	0,60	0,12
10	0,73	0,28
11	1,62	0,76
12	1,05	0,42
13	0,93	0,32

Los anteriores resultados muestran una cierta cercanía entre sí, indicando así que el margen de error es bajo, sin embargo se destaca el mayor valor de energía absorbida, la cual le corresponde a la mezcla 10 (1.62 ± 0.76 J).

7.2.4 Screening:

Es un método de selección - a partir de una muestra determinada de elementos estudiados - de los mejores resultados ligados a varios de los elementos pertenecientes a dicha muestra. Del proceso de *Screening* se seleccionaron las mejores mezclas, las cuales quedaban por dentro del recuadro (ver los 9 valores dentro de la ventana), cuyas propiedades mecánicas (tensión, flexión e impacto) fueron ensayadas posteriormente y comparadas entre sí. El motivo por el cual fueron descartadas las mezclas 1, 2 y 3, fue por la generación de burbujas,

fragilidad y grietas en el proceso de curado, pues no contenían ninguna cantidad de thinner en su composición.

Tabla 18: Screening de las mezclas

		Cantidad de Catalizador (cc)				
		4	6	8	10	12
Cantidad de Thinner (g)	0	1	2			3
	10		5	8	10	
	20		6	4	11	
	30		7	9	12	
	50					

Después de haber realizado todos los anteriores ensayos y someter los resultados al proceso de *Screening*, se procedió a evaluar, mediante el software Statgraphics, la influencia de los factores controlables (catalizador y thinner) en las 9 diferentes mezclas. Para ello, se variaron los dos factores mencionados en diferentes niveles – como puede verse en la tabla 20 del *Screening* – de bajo a alto contenido en intervalos de -1 a 1. Es decir, que para el catalizador, los números correspondientes a su contenido de 10g, 20g y 30g, fueron -1, 0 y 1, respectivamente. De igual forma, para el contenido de catalizador, cuyas cantidades (en centímetros cúbicos) de 6 cc, 8 cc y 10 cc, correspondían los valores de -1, 0 y 1, respectivamente.

7.3 Caracterización del material compuesto.

De los resultados obtenidos de los tres tipos de ensayos (flexión, tensión e impacto) en las mezclas, se seleccionaron dos mezclas cuyas propiedades analizadas fueron las mejores en cada ensayo. Tal es el caso de la número 8, cuyos valores calculados para esfuerzos máximos, deformación y módulo elástico (todos en tensión) fueron superiores. Por su parte, la mezcla número 5 tuvo resultados satisfactorios en el ensayo de flexión (además de la número 8), donde también se calcularon las magnitudes del esfuerzo máximo de flexión en rotura,

deformación en flexión y su módulo de elasticidad. Por consiguiente, se eligieron estas dos mezclas para realizar los materiales compuestos junto con tejidos de fibra de fique con el fin de ser sometidas a un tercer ensayo. Así mismo, se decidió estudiar un valor intermedio entre estas dos mezclas, cuyos contenidos de catalizador fueron de 6 cc y 8 cc, respectivamente, y de 10 g de thinner para ambas mezclas; es decir, que se decidió estudiar la mezcla 13 cuyos contenidos son: 200 g de resina, 10 g de thinner y 7 cc de catalizador.

El contenido de los compuestos a ensayar y analizar es mostrado en las tablas 19 y 20:

Tabla 19: Contenido de los materiales compuestos de fibra de fique en matriz de resina poliéster, en gramos.

TERCER ENSAYO: COMPONENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS			
Mezcla #	Resina (g)	Catalizador (g)	Thinner (g)
5	200	4,83	10
13	200	5,635	10
8	200	6,44	10

Y las proporciones de cada componente se muestran en la tabla 20:

Tabla 20: Contenido de los materiales compuestos de fibra de fique en matriz de resina poliéster, en proporciones.

TERCER ENSAYO: COMPONENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS			
Mezcla #	Resina (g)	Catalizador (g)	Thinner (g)
5	93,1	2,2	4,7
13	92,7	2,6	4,6
8	92,4	3,0	4,6

En esta ocasión, otro factor controlable, además del diluyente y el catalizador, es el número de capas de tejido de fique para el proceso de curado, el cual varía en tres niveles (entre 3 y 5 capas del mismo). De este proceso se obtuvieron 54 probetas, distribuidas de la siguiente forma:

- Mezcla 5 y 3 capas.
- Mezcla 8 y 3 capas.
- Mezcla 13 y 3 capas.
- Mezcla 5 y 4 capas.
- Mezcla 8 y 4 capas.
- Mezcla 13 y 4 capas.
- Mezcla 5 y 5 capas.
- Mezcla 8 y 5 capas.
- Mezcla 13 y 5 capas.

Para la clasificación presentada, se hicieron 3 probetas para ensayo de tensión y 3 probetas para los ensayos de flexión e impacto, cortadas a la medida indicada por las normativas correspondientes; para un total de 54 probetas del material compuesto.

7.3.1 Proceso de fundición.

El procedimiento de fundición para el curado fue el siguiente:

1. Se preparó el molde empleando cera desmoldante la cual evitaba que la mezcla se adhiriera a las paredes de los moldes.
2. Se cortaron las capas de la tela de fique a la medida del molde (300 mm x 30 mm). Dependiendo del número de la mezcla, se tenía en cuenta el valor de las capas.
3. Se realizó aparte la mezcla respectiva y se vertió en el molde, utilizando una pequeña brocha, con lo que se lograba la capa inferior de resina.
4. Inmediatamente, se colocó la primera capa de tela de fique ajustándola manualmente al molde para, así, verter otra capa de la misma mezcla.
5. El paso 4 se repitió hasta haber colocado las capas de fique correspondientes, y por último, se vertió la última capa de mezcla, finalizando la creación de una probeta de material compuesto.

Figura 25: Probetas de fique para realizar curado



Figura 26: Molde para realizar el curado



7.3.2 Ensayos de tensión en el material compuesto:

Finalizado el proceso de curado, se realizó el ensayo de tracción de los compuestos para su caracterización. Las dimensiones nominales de las probetas para realizar este ensayo fueron de 300x30x10 mm. Para el montaje en la máquina universal de ensayos, la distancia entre mordazas fue de 150 mm, es decir, que cada mordaza sujetaba 75 mm de cada extremo de la probeta, de acuerdo con la norma ASTM D3039.

Mediante el software TRAPEZIUM®, se logró obtener las curvas de carga (mN) vs alargamiento (mm) de cada ensayo, cuyas velocidades siempre fueron de 5mm/min. A partir de este ensayo, se determinaron las magnitudes -

promediando los resultados de las 3 probetas ensayadas por cada mezcla - del esfuerzo máximo a la tensión, el módulo de elasticidad de la resina y su respectiva deformación.

Figura 28: Fractura de probeta luego de ensayo



Figura 27: Probetas sometidas a tensión



La tabla 21 contiene los resultados de los ensayos de tensión para el material compuesto:

Tabla 21: Resultados tensión para material compuesto

RESULTADOS TENSION PARA COMPUESTOS (FIQUE EN MATRIZ DE RESINA POLIESTER)						
MEZCLA	Esfuerzo Maximo (Mpa)		Deformacion (mm/mm)		Modulo Elastico (Mpa)	
	Promedio	Desviacion Estandar	Promedio	Desviacion Estandar	Promedio	Desviacion Estandar
5 y 3 Capas	13,528	2,734	0,042	0,015	351,210	85,858
5 y 4 Capas	19,625	1,802	0,055	0,010	218,932	79,700
5 y 5 Capas	14,646	3,164	0,075	0,007	116,925	15,964
8 y 3 Capas	18,778	0,385	0,055	0,000	330,071	9,547
8 y 4 Capas	22,979	1,136	0,066	0,006	207,184	36,404
8 y 5 Capas	15,979	1,898	0,066	0,005	166,710	43,831
13 y 3 Capas	14,063	3,117	0,047	0,003	281,370	73,327
13 y 4 Capas	24,896	2,797	0,067	0,010	278,277	65,131
13 y 5 Capas	15,208	1,688	0,067	0,013	147,267	32,237

De estos resultados, se destacan los valores de la mezcla 13 y 4 capas (92,7% de resina poliéster, 2,6% de catalizador y 4,6% de thinner), los cuales fueron: resistencia a la tensión de 24,9 MPa, deformación a la tensión de 0,067 mm/mm y un módulo elástico a la tensión de 278,3 MPa.

7.3.3 Ensayos de flexión en el material compuesto:

Se ensayaron 3 probetas para cada compuesto de acuerdo a la norma ASTM D790-10. Para este ensayo y el de impacto, se utilizaron 3 probetas divididas en dos partes, una de 287 mm y otra de 63 mm, respectivamente. El ancho (30mm) y el espesor (10 mm) de las probetas no se modificaron.

Para los cálculos del esfuerzo máximo a flexión, esfuerzo de rotura, módulo de elasticidad y deformación de las probetas, se tuvo en cuenta el diámetro del punzón (50 mm) más el diámetro de los rodillos (50 mm) los cuales están ubicados en el banco de flexión, es decir, 100 mm de separación, más tres veces el espesor de la probeta (30 mm), de acuerdo a la norma. Es decir, que la distancia entre apoyos fue de 130 mm, valor que se mantuvo igual para el cálculo de los parámetros ya mencionados.

Figura 30: Ensayo de flexión al compuesto



Figura 29: Probetas sometidas a ensayo de flexión



En la tabla 22 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de flexión realizados a los compuestos de fibra de fique en matriz de resina de poliéster:

Tabla 22: Resultados de flexión para material compuesto

RESULTADOS FLEXION PARA COMPUESTOS (FIQUE EN MATRIZ DE RESINA POLIESTER)						
MEZCLA	Esfuerzo Maximo (Mpa)		Deformacion (mm/mm)		Modulo Elastico (Mpa)	
	Promedio	Desviacion Estandar	Promedio	Desviacion Estandar	Promedio	Desviación Estandar
5 y 3 Capas	47,07	14,03	0,06	0,01	1.480,25	167,85
5 y 4 Capas	75,70	3,17	0,15	0,04	1.472,43	712,05
5 y 5 Capas	43,30	-	0,06	-	1.315,19	-
8 y 3 Capas	28,42	4,90	0,07	0,01	851,76	155,50
8 y 4 Capas	71,41	2,70	0,16	0,06	1.909,40	300,28
8 y 5 Capas	53,17	10,35	0,14	0,04	1.561,35	254,04
13 y 3 Capas	54,68	33,68	0,11	0,04	1.286,88	314,34
13 y 4 Capas	66,75	3,58	0,13	0,01	1.898,61	106,51
13 y 5 Capas	48,70	1,55	0,12	0,02	1.741,05	241,30

De los resultados obtenidos, se destaca el material compuesto de la mezcla 5 y 3 capas de fique, ya que si bien no presentó el esfuerzo máximo más alto ($47,07 \pm 14,03$ MPa), obtuvo la menor deformación por flexión ($0,06 \pm 0,01$ mm/mm) y el módulo de elasticidad a la flexión más alto ($1480,25 \pm 167,85$ MPa) en comparación con los demás promedios.

De las probetas analizadas, la tercera correspondiente a la mezcla 1 de 3 capas, presentó un defecto al momento del secado de la mezcla con la fibra de fique, lo cual indica que las capas de la tela de fique se distribuyeron de forma inadecuada en la matriz de resina, como puede verse en las figuras 32 y 33:

Figura 32: Probeta mezcla 1 con 3 capas de fibra

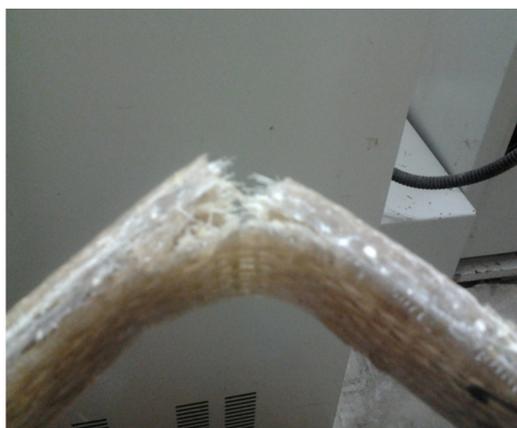


Figura 31: Probeta de la mezcla 1 con 3 capas de fibra



7.3.4 Ensayo de impacto en el material compuesto:

Se ensayaron 3 probetas para cada material compuesto de dimensiones 63x15x10 mm en el péndulo Charpy del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma del Caribe, luego de un proceso de pulido a las probetas ya que ocupaban mucho espacio en el yunque del péndulo, lo que generaba un error experimental al momento de hacer las pruebas. El proceso consistía en colocar la probeta en el yunque del péndulo y a través de una palanca se liberaba el martillo el cual rompería la probeta al hacer contacto con ella. Se trabajó de acuerdo con la norma ASTM D256.

Figura 33: Probetas para pruebas de impacto



En la tabla 23 se evidencian los valores de la energía de impacto absorbida por las probetas, cuyos valores fueron calculados y, posteriormente, tabulados a partir de los parámetros que el ensayo de impacto entregaba (ángulo obtenido, energía residual, altura total, peso del martillo, entre otros). Los valores promediados de las nueve probetas de material compuesto (con 3, 4 y 5 capas de fique) para cada una de las 3 mezclas de resina seleccionadas, a partir de los buenos resultados obtenidos en las pruebas mecánicas, pueden visualizarse en la tabla 25:

Tabla 23: Resultados de ensayos de impacto a materiales compuestos.

MEZCLA	ENERGIA DE IMPACTO (J)	
	PROMEDIO	DESVIACION ESTANDAR
5 y 3 Capas	3,17	2,65
5 y 4 Capas	8,90	1,23
5 y 5 Capas	8,38	3,35
8 y 3 Capas	4,24	1,35
8 y 4 Capas	8,82	2,60
8 y 5 Capas	8,10	0,60
13 y 3 Capas	3,25	0,09
13 y 4 Capas	8,37	1,28
13 y 5 Capas	6,84	1,55

Donde se destaca nuevamente el material compuesto de 4 capas de fique y la mezcla número 5, cuya energía absorbida fue mayor que las demás ($8,9 \pm 1,23$ J).

7.3.5 Costos de mezclas:

Para cada componente de las mezclas (resina poliéster, catalizador y thinner), se calcularon sus respectivos costos por gramo (\$/gr), los cuales son presentados en la tabla 24:

Tabla 24: Resultados costos de materiales

COSTOS MATERIALES UTILIZADOS PARA 4 PROBETAS			
Precio (\$)	Resina (g)	Catalizador (g)	Thinner (g)
\$8.000	1000		
\$2.000		66	
\$2.000			500
Precio por gramo \$/g	\$ 8,00	\$ 30,30	\$ 4,00

La tabla 24 representa los costos por gramo de cada componente para realizar 4 probetas de un tipo de mezcla determinado. Ahora bien, teniendo en cuenta estos costos y los componentes de las nueve mezclas que hicieron parte del proceso de

Screening, se calcularon los precios de cada mezcla, los resultados se muestran en la tabla 25:

Tabla 25: Resultados costos de mezclas a partir de su composición por gramos

COSTOS DE MEZCLAS A PARTIR DE SU COMPOSICION POR GRAMOS				
Mezcla #	Resina (g)	Catalizador (g)	Thinner (g)	Costo Mezcla
4	200	6,44	20	\$ 1.875,13
5	200	4,83	10	\$ 1.786,35
6	200	4,83	20	\$ 1.826,35
7	200	4,83	30	\$ 1.866,35
8	200	6,44	10	\$ 1.835,13
9	200	6,44	30	\$ 1.915,13
10	200	8,05	10	\$ 1.883,92
11	200	8,05	20	\$ 1.923,92
12	200	8,05	30	\$ 1.963,92

El costo de la resina se mantiene igual debido al bloqueo que se le aplicó para esta investigación. Además, se observa que la mezcla 5 es la más económica por su baja composición de thinner y catalizador. Teniendo en cuenta su costo y sus buenas propiedades mecánicas, esta mezcla presentaría una alta rentabilidad al ser utilizada en un material compuesto.

7.3.6 Comparación de propiedades mecánicas del material compuesto de fibra de fique con matriz de resina poliéster y materiales compuestos de fibras sintéticas (vidrio y carbono):

Tabla 26: Tabla comparativa de materiales compuestos de fibra natural (fique) y fibras sintéticas.

Material Compuesto	Resistencia a Tensión (MPa)	Módulo Elástico a Tensión (MPa)	Deformación a Tensión (mm/mm)	Resistencia a Flexión (MPa)	Módulo Elástico a Flexión (MPa)	Energía de Impacto (J)
Fique + Poliéster	24,9	278,3	0,067	47,07	1480,25	8,9
Vidrio + Poliéster	367	10130	0,036	278,4*	11350*	47
Carbono + Epoxi	620	42990	0,015	-	-	96,1

Los datos de materiales compuestos de fibras sintéticas anteriormente comparados corresponden, primeramente, a (compuestos de vidrio + poliéster AROPOL FS6902 y compuestos de carbono + epoxi 8552 sometidos a pruebas de tensión e impacto) [23]; mientras que [24] evaluaron compuestos de fibra de vidrio y matriz de poliéster a flexión. Realizando una comparación entre los resultados obtenidos del material compuesto de fibra de fique con una matriz de resina poliéster con los resultados de la tabla 26, se tiene que las propiedades de las fibras sintéticas son mínimo 15 veces mayor (en el caso del vidrio a tensión), sin embargo, no se deben descartar las propiedades del fique como refuerzo del material compuesto con matriz de resina poliéster, ya que obtuvo aceptables resultados, que sirven para mitigar el uso de las fibras sintéticas y desarrollar investigaciones posteriores.

8. CRONOGRAMA DE LA INVESTIGACIÓN

La siguiente es la programación establecida en la cual se realizaron las diferentes etapas de la investigación, desde la planeación del proyecto de investigación, hasta el establecimiento de conclusiones y resultados del mismo.

NOMBRE DE LA ETAPA	OBJETIVO	ROL DEL INVESTIGADOR	INSTRUMENTOS	ESPACIO
FASE UNO: DEFINICION DE LA SITUACION / PROBLEMA. "Etapa Inicial"				
A. PLANEACIÓN Fecha: Mayo de 2013	Planear el tiempo los espacios y las fases de la investigación	1. Planear	Apuntes realizados, archivos de documentos del aula virtual.	Aulas de la Universidad
B. FORMULACION DEL PROYECTO DE INVESTIGACION Fecha: Junio de 2013	Determinar el proceso de la investigación Revisión teórica, tesis, investigaciones previas (Antecedentes)	Explorar las diferentes investigaciones desarrolladas y que estuviesen relacionadas con la investigación actual	Bibliotecas e Internet.	Biblioteca
FASE DOS: TRABAJO DE CAMPO "Etapa Intermedia"				
C. RECOLECCIÓN DE INFORMACION Fecha: Julio de 2013	Recoger información por medio de las estrategias y las técnicas establecidas	Realizar las pruebas y ensayos a los materiales compuestos a base de fibras naturales para identificar sus propiedades mecánicas	Máquinas tales como: la máquina universal de ensayo, microscopios de metalografía, y máquina de impacto. Materiales utilizados: fibra de yute, fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de fique, resina	Biblioteca, laboratorios de Resistencia de materiales, laboratorio de química y laboratorio de tratamientos térmicos

			epóxica, thinner. Apuntes hechos durante la investigación	
D. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACION Fecha: Septiembre-Octubre de 2013	Procesar, chequear, organizar y la información recogida	Liderar el proceso de organizar la información	Ensayos realizados, computador, tablas de cálculos.	Laboratorio de resistencia de materiales, sala de cómputo
FASE TRES ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y CONCEPTUALIZACIÓN DE LA INFORMACION "Etapa final"				
A. ANÁLISIS DE LA INFORMACION Fecha: Enero de 2014	Analizar la información que se recogió a través de las Normas ANSI	Procesar, Interpretar, analizar y conceptualización de los datos.	Formato establecido de registro manejado a través de las Normas ANSI. Talleres de carpintería	Sala de cómputo
B. INTERPRETACION Y DISCUSIÓN Fecha: Febrero de 2014	Interpretar y conceptualizar la información que se recogió a partir de las pruebas realizadas	Discutir, cotejar analizar, interpretar.	Hojas de cálculo, estadísticas.	Sala de cómputo.
C. CONCEPTUALIZACIÓN Fecha: Marzo de 2014	Conceptualizar y comparar la información recogida	Conceptualización y descripción de los materiales analizados.	Formulas de análisis de los datos. Ensayos de tensión, flexión, impacto, fuerza, resistencia.	Laboratorio de resistencia de materiales.
PRESENTACION DEL DOCUMENTO FINAL				
D. CONCLUSIÓN Fecha: Abril-Mayo de 2014	Reconocer el proceso y sus resultados	Análisis final del proceso	Documento final de la investigación	Sala de cómputo.
E. PRESENTACIÓN DEL DOCUMENTO Fecha: Junio de 2014	Presentar la Investigación	Dar a conocer la investigación	Documento final y presentación final.	Auditorio

9. PRESUPUESTO

La investigación implica una inversión económica puesto que exige recursos que se necesitarán para llevarla a cabo desde el comienzo de la misma. Esto se materializa a través de acciones basadas en un plan económico realista, el cual debe ceñirse a los costos reales del presupuesto. A continuación se hace la relación de los costos generados por la investigación:

Materiales gastables:

Denominación del producto	Unidad	Presentación	Precio	Cantidad	Total
Resina de poliéster	Uno	Kilogramo	\$10.000	5	\$50.000
Thinner	Uno	Litro	\$5.000	5	\$25.000
Fibra de fique	Uno	Metro cuadrado	\$10.000	3	\$30.000
Desmoldante	Uno	Libra	\$10.000	3	\$30.000
Moldes para resina	Uno	Unidad	\$25.000	8	\$200.000
Lija no. 240 y 600	Uno	Unidad	\$3000	10	\$30.000
Gramera	Uno	Unidad	\$30.000	1	\$30.000

Total de gastos para materiales:

\$395.000

Otros gastos:

Denominación del producto	Unidad	Presentación	Precio	Cantidad	Total
Transporte	Uno	Diarios	\$10.000	30	\$300.000
Fotocopias	Uno	1 hoja	\$200	300	\$60.000
Meriendas y almuerzos	Uno		\$10.000	30	\$300.000

Total:

\$660.000

10. CONCLUSIONES:

En los ensayos de tracción en las mezclas, se dedujo que la adición de diluyente genera una menor resistencia a los esfuerzos de este tipo, por lo que el esfuerzo máximo se reduce, así como también el módulo de elasticidad. Por otro lado, la adición de catalizador genera una mayor deformación a la rotura y también reduce la magnitud del módulo elástico.

Por el lado de las hebras y tejidos de fique, el aumento de la velocidad de ensayo no altera el valor de la tenacidad. Y al aumentar dicha velocidad de 1mm/min a 50mm/min, la elongación se incrementaba, es decir, que a mayor velocidad, mayor es el porcentaje de elongación.

A su vez, el compuesto que mejor comportamiento tuvo a flexión fue el de 3 capas con la mezcla 5 (ver apartado 7.3.3) con 4 capas de fique, cuyo posible uso sería el de conformar columnas, bien sea como refuerzo o como aislamiento, ya que su deformación a flexión es muy pequeña ($0,06 \pm 0,01$ mm/mm) y resiste grandes esfuerzos ($47,07 \pm 14,03$ MPa).

De los ensayos realizados a las mezclas de resina, thinner y catalizador, se apreciaron detalles tales como el secado instantáneo en la mezcla 9; mientras que con la excesiva adición de thinner, las mezclas 1, 3 y 5, por ejemplo, sufrieron agrietamientos y burbujas durante el curado. También, la ausencia de thinner hacía ver las probetas muy opacas, mientras que aquellas que contenían cierta cantidad no excesiva de diluyente (10 gramos, como mínimo), tenían mejor presentación y se veían traslúcidas.

A partir de los resultados del ensayo de impacto de materiales compuestos, se pudo apreciar que los compuestos con 4 capas de fique y los 3 diferentes tipos de mezcla utilizados, fueron los mejores, ya que presentaron mayores valores de energía absorbida al impacto ($8,90 \pm 1,23$ J, $8,82 \pm 2,60$ J y $8,37 \pm 1,28$ J para las mezclas 5, 8 y 13, respectivamente). Por esta razón, haciendo una comparación

entre los 3 valores más altos de energía absorbida al impacto, el compuesto que mejor desempeño tiene es el correspondiente a la mezcla 5 (ver tabla 17) con 4 capas de fibra de fique. No obstante, los materiales compuestos de fibra de fique en matriz de resina poliéster no presentan buenos resultados a tensión, a diferencia de su comportamiento a impacto y flexión, por lo que no sería adecuado aplicar dichos materiales en implementos que sean sometidos a cargas a tensión o compresión.

Realizando una comparación entre los resultados obtenidos del material compuesto de fibra de fique con una matriz de resina poliéster con los de la tabla 26, se tiene que las propiedades de las fibras sintéticas son mínimo 15 veces mayor (en el caso del vidrio a tensión), sin embargo, no se deben descartar las propiedades del fique como refuerzo del material compuesto con matriz de resina poliéster, ya que obtuvo aceptables resultados, que sirven para mitigar el uso de las fibras sintéticas y desarrollar investigaciones posteriores.

Por último, se ha decidido que el material compuesto que mejores propiedades mecánicas posee (flexión e impacto, principalmente) corresponde al que contiene, en su mezcla, 93,1% de resina poliéster, 2,2% de catalizador y 4,7% de thinner o diluyente; además de cuatro capas de fibra de fique. Este material compuesto podría ser utilizado en el ámbito deportivo en la creación de botas para patines, ya que aportaría mucha más ligereza al producto y soportaría esfuerzos a los que normalmente están expuestos los patines durante su uso, tales como flexión e impacto; además de poder ser utilizado como materia prima para fabricar tablas de surf, las cuales se encuentran sometidas tanto a flexión como al impacto; sin olvidar su gran aporte al sostenimiento ambiental, ya que es a base de fibras naturales y alta rentabilidad para quienes practican el patinaje como pasatiempo o a nivel profesional.

11. BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- DEBOLD B. Van Dalen y MEYER, William J. "Manual de técnica de la investigación educacional". Editorial Paidós, 1983.
- MENDOZA, Ricardo. "Análisis comparativo de las propiedades termo-mecánicas entre plásticos sintéticos y biodegradables" *Evento: III CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES, ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE Ponencia: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES TERMO-MECÁNICAS ENTRE PLÁSTICOS SINTÉTICOS Y BIODEGRADABLES Libro: Memorias Del Tercer Congreso Internacional De Materiales, Energía Y Medio Ambiente, Universidad Autónoma del Caribe, p. - , v. <, fasc. Colombia, 2011.*
- MIRAVETE, Antonio. *Materiales Compuestos I*. Editorial Reverté: Barcelona, España, 2003.
- MONTGOMERY, Douglas. *Diseño y análisis de experimentos 2da. Edición*. Editorial Limusa Wiley: México, 2006.
- RAMIREZ RODRIGUEZ, Fernando y ESTRADA MEJIA, Martin "Bambú y materiales compuestos". Editorial Académica Española (eae) *ISBN: 978-3-8473-6991-2*. España, 2012

Referencias electrónicas

- ALVARADO, Patricia, QUESADA, Karol, SIBAJA, Rosario y VEGA, José. Utilización de las fibras del rastrojo de piña como material de refuerzo en resinas de poliéster. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica/Universidad de Alicante, España. Costa Rica/España. 2005. Disponible en: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/JUN05/quesada.pdf>

- BARRERA, Mauricio, HIDALGO, Miguel y MINA, José. Compuestos laminados de matriz polimérica reforzados con fibras naturales: Comportamiento mecánico. Scientia et Technica Año XVII, No 51. Universidad Autónoma de Occidente y Universidad del Valle, Colombia. Cali, Colombia. 2012. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84923910008>
- ESTRADA MEJÍA, Martín. Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos. Universidad de Los Andes: Bogotá, 2010. Recuperado el día 23 de noviembre de 2012 en: http://www.docentes.unal.edu.co/mestradam/docs/tesisMEM_maestria.pdf
- GARCÍA CASTILLO, Shirley Kalamis. Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto. Universidad Carlos III de Madrid. España. 2007. Disponible en: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2368/6/Tesis_Garcia_Castillo.pdf
- GÓMEZ, José Santiago. Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio. Proyecto de Grado de la Universidad de EAFIT, 2009. Medellín, Colombia. Recuperado el día 3 de mayo de 2014, disponible en: <http://repository.eafit.edu.co/handle/10784/297>
- LUCENA, María, SUÁREZ, Alejandro y ZAMUDIO, Ivonne. Desarrollo de un material compuesto a base de fibras de bambú para aplicaciones aeronáuticas. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; S1 (3): 1107-1114. Universidad de San Buenaventura, Colombia. Bogotá, Colombia. 2009. Disponible en: <http://www.rlmm.org/archives.php?f=/archivos/S01/N3/RLMMArt-09S01N3-p1107.pdf>
- PARRA, Diego y SÁNCHEZ, Miguel. Desarrollo material polimérico reforzado con fibras naturales. Universidad EAN. Bogotá, Colombia. 2012.

Disponible en:

<http://repository.ean.edu.co/bitstream/10882/2903/6/ParraDiego2012.pdf>

- POVEDA MARTÍNEZ, Santiago. "Materiales Compuestos" Recuperado el día 28 de Abril de 2012 en: http://ocw.upm.es/expression-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/MATERIALES/materiale_scompuestos.pdf
- QUINTERO GARCÍA, Sandra Liliana y GONZÁLEZ SALCEDO, Luis Octavio. *Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto*. Universidad del Norte: Barranquilla, 2006. Recuperado el día 23 de noviembre de 2012 en:<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=85202010>
- ROCHA, José, MENDOZA, Diana y AMÉZQUITA, Fernando. Comportamiento mecánico del poliuretano reforzado con fibras de yute y fibras de cascarilla de arroz. Universidad de Guanajuato, México. Disponible en: <http://quimica.ugto.mx/revista/11/POLIURETANO.htm>
- RODRÍGUEZ, Exequiel y VÁZQUEZ, Analía. *Propiedades mecánicas de materiales compuestos con fibras naturales obtenidos mediante la técnica de "VacumInfusion"*. Universidad de Mar del Plata: Argentina, 2003. Recuperado el día 20 de noviembre de 2012: <http://www.materialessam.org.ar/sitio/biblioteca/bariloche/Trabajos/A11/1111.PDF>
- SALINAS, José. Caracterización de materiales compuestos a base de polímeros-fibra de bagazo de nopal por inyección. Universidad Nacional Autónoma de México. 2011. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1907/Tesis.pdf?sequence=1>
- WIESMANN, Gerrit. *Suben precios de la fibra de carbono, material del futuro*. Diario El Universal, México, 2007. Recuperado el día 28 de abril de 2012 en: <http://www.eluniversal.com.mx/finanzas/index.html>

12. REFERENCIAS

- [1] VILLEGAS, B. y VILLEGAS L. Artifacts: Colombian crafts from the Andes to the Amazon. Bogotá D.C: Villegas Editores, 2006. p. 114.
- [2] Fique y su proceso de transformación (Disponible en: <http://eurofique.com/> consultado el 8 de septiembre de 2013)
- [3] ALVARADO, Patricia, QUESADA, Karol, SIBAJA, Rosario y VEGA, José. Utilización de las fibras del rastrojo de piña como material de refuerzo en resinas de poliéster. Revista Iberoamericana de Polímeros. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica/Universidad de Alicante, España. Costa Rica/España. 2005. Disponible en: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/JUN05/quesada.pdf>
- [4] LUCENA, María, SUÁREZ, Alejandro y ZAMUDIO, Ivonne. Desarrollo de un material compuesto a base de fibras de bambú para aplicaciones aeronáuticas. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; S1 (3): 1107-1114. Universidad de San Buenaventura, Colombia. Bogotá, Colombia. 2009. Disponible en: <http://www.rlmm.org/archives.php?f=/archivos/S01/N3/RLMMArt-09S01N3-p1107.pdf>
- [5] GÓMEZ, José Santiago. Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio. Proyecto de Grado de la Universidad de EAFIT, 2009. Medellín, Colombia. Recuperado el día 3 de mayo de 2014, disponible en: <http://repository.eafit.edu.co/handle/10784/297>
- [6] ESTRADA MEJÍA, Martin. Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos. Universidad de Los Andes: Bogotá, 2010. Recuperado

el día 23 de noviembre de 2012 en:
http://www.docentes.unal.edu.co/mestradam/docs/tesisMEM_maestria.pdf

[7] SALINAS, José. Caracterización de materiales compuestos a base de polímeros-fibra de bagazo de nopal por inyección. Universidad Nacional Autónoma de México. 2011. Disponible en:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1907/Tesis.pdf?sequence=1>

[8] MIRAVETE, A. Materiales Compuestos I. Editorial Reverté: Barcelona, España, 2003.

[9] MENDOZA, R. "Análisis comparativo de las propiedades termo-mecánicas entre plásticos sintéticos y biodegradables" *Evento: III CONGRESO INTERNACIONAL DE MATERIALES, ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE Ponencia: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES TERMO-MECÁNICAS ENTRE PLÁSTICOS SINTETICOS Y BIODEGRADABLES Libro: Memorias Del Tercer Congreso Internacional De Materiales, Energía Y Medio Ambiente, Universidad Autónoma del Caribe, p. - , v. <, fasc. Colombia, 2011.*

[10] POVEDA MARTÍNEZ, S. "Materiales Compuestos" Recuperado el día 28 de Abril de 2012 en: http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/MATERIALES/materialescompuestos.pdf

[11] UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO. Ficha técnica de materiales para prácticas en los talleres de diseño industrial. Facultad de Diseño Industrial. Marzo 3 de 2011. Bogotá, Colombia.

[12] BILLMEYER, F. "Ciencia de los polímeros" Editorial Reverté: Barcelona, España, 2004

- [13] PARRA, D. y SÁNCHEZ, M. Desarrollo material polimérico reforzado con fibras naturales. Universidad EAN. Bogotá, Colombia. 2012. Disponible en: <http://repository.ean.edu.co/bitstream/10882/2903/6/ParraDiego2012.pdf>
- [14] 2009 AÑO INTERNACIONAL DE LAS FIBRAS NATURALES: Disponible en: <http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/abaca.html>
- [15] HIBBELER, R.C. Mecánica de Materiales. Editorial Pearson Prentice Hall, sexta edición: 2006, México.
- [16] ASHBY, J. Materiales para ingeniería 1: Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Volumen 1. Editorial Reverté: 2008, España.
- [17] BUFFA, J., WILSON, J. Física Quinta Edición. Editorial Pearson Prentice Hall: 2003, México.
- [18] MEDINA BEJARANO, E. Guía de Laboratorio de Mecánica de Materiales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [19] ADDLESON, L. Materiales para la construcción Volumen I. Editorial Reverté: 2001, Sevilla, España.
- [20] PANCORBO, F. Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación. Ediciones técnicas Marcombo: 2011, Barcelona, España.
- [21] MONTGOMERY, D. Diseño y análisis de experimentos Segunda Edición. Editorial Limusa S.A.: 2004, México D.F, México.
- [22] VALCÁRCEL, M. Automatización y miniaturización en química analítica. Springer Verlag Iberica S.A.: 2000, Barcelona. España.
- [23] GARCÍA CASTILLO, S. Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto. Universidad Carlos III de Madrid.

España. 2007. Disponible en: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/2368/6/Tesis_Garcia_Castillo.pdf

[24] RODRÍGUEZ, E. y VÁZQUEZ, A. *Propiedades mecánicas de materiales compuestos con fibras naturales obtenidos mediante la técnica de "VacumInfusion"*. Universidad de Mar del Plata: Argentina, 2003. Recuperado el día 20 de noviembre de 2012: <http://www.materialessam.org.ar/sitio/biblioteca/bariloche/Trabajos/A11/1111.PDF>