

**DISEÑO DE UN MATERIAL COMPUESTO CON FIBRA NATURAL PARA  
SUSTITUIR LA UTILIZACIÓN DE LA FIBRA DE VIDRIO**

**JOSÉ SANTIAGO GÓMEZ P.**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO  
PROYECTO DE GRADO  
MEDELLIN  
2009**

**DISEÑO DE UN MATERIAL COMPUESTO CON FIBRA NATURAL PARA  
SUSTITUIR LA UTILIZACIÓN DE LA FIBRA DE VIDRIO**

**JOSÉ SANTIAGO GÓMEZ P.**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero de Diseño de Producto**

**Asesor  
Doctora MÓNICA ÁLVAREZ LÁINEZ  
Ingeniera Química U.Nal. de Colombia  
Doctor en Física de la U. de Valladolid**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO  
PROYECTO DE GRADO  
MEDELLIN  
2009**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Medellín, Octubre de 2009

## **AGRADECIENTOS**

### **El autor expresa sus agradecimientos a:**

El Municipio de Medellín por su valioso apoyo económico para la realización de mi proyecto profesional.

El Grupo de Investigación en Materiales de la Universidad EAFIT, por su apoyo Económico a la Investigación.

El Laboratorio de Materiales de la Universidad EAFIT, por su apoyo en el desarrollo de las pruebas y continua asesoría.

Merquiand por facilitar las muestras de silanos necesarias para modificar la estructura de las fibras para su posible comparación y estudio.

Sustitutos Ecológicos por las muestras de fibras y la ayuda en la asesoría en los posibles costos de producción.

Verificar Ltda., por la ayuda y acompañamiento en la elaboración del prototipo final.

## CONTENIDO

INTRODUCCION	12
1. JUSTIFICACIÓN	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
3. MARCO TEÓRICO	18
4. FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO	24
4.1 MATERIALES	24
4.1.1 Fibras	24
4.1.2 Matriz	24
4.1.3 Agentes compatibilizantes	27
4.2 TRATAMIENTOS REALIZADOS A LAS FIBRAS	27
4.2.1 Tratamiento alcalino	27
4.2.2 Tratamientos con agentes compatibilizantes	30
4.2.2.1 Tratamiento con silanos disueltos en agua. Inicialmente se estudió la posibilidad de disolver el amino silano en agua destilada	30
4.2.2.2 Tratamiento con silano disueltos en etanol	30
4.2.2.3 Tratamiento con silanos utilizados directamente sobre la resina de poliéster	31
4.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN	31
4.3.1 proceso de fabricación sin matriz por Hand Lay Up	31
4.3.2 Proceso de fabricación del material compuesto con molde	34
4.3.3 Proceso fabricación del material compuesto asistido con vacío	36
4.3.4 Proceso de fabricación de material compuesto por una fibra para ensayos de desprendimiento	39
5. CARACTERIZACION MACROESTRUCTURAL	40
5.1 CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS	40

5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	41
5.3 ENSAYOS DE DESPRENDIMIENTO	42
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
6.1 ESTUDIO EN FIBRAS VEGETALES	43
6.2 ESTUDIO EN MATERIALES COMPUESTOS	47
6.3 ESTUDIO DE ADHESIÓN CON LA MATRIZ	53
7. MODELO DE COSTOS PARA LAS FIBRAS DE COCO TRATADAS	56
8. FABRICACIÓN DE UNA PIEZA UTILIZANDO COMO FASE DE REFUERZO LA FIBRA DE COCO MERCERIZADA	59
9. CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	67

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Medidas de los diámetros de las fibras	43
Tabla 2. Resultados de ensayos de pull out	53
Tabla 3. Tabla de productos necesarios para aproximar el modelo de costos	56
Tabla 4. Costos por cantidad requerida	57

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Evolución del Módulo de elasticidad en función de la dirección de las fibras.	20
Figura 2. Fibras de coco durante la mercerización	29
Figura 3. Fibras de coco después de ser mercerizadas	29
Figura 4. Compuesto reforzado con coco elaborado sin asistencia de moldes	33
Figura 5. Compuesto reforzado con bagazo de caña sin asistencia de moldes	33
Figura 6. Compuesto reforzado con fibras de fique sin asistencia de moldes	34
Figura 7. Dimensiones de las probetas elaboradas con molde	35
Figura 8. Fabricación de probetas con molde	36
Figura 9. Uso de sistema de vacío para fabricación del material	37
Figura 10. Capa superior del compuesto fabricado con asistencia de vacío	38
Figura 11. Montaje para fabricar probetas de desprendimiento	39
Figura 12. Montaje de las fibras en la máquina a tensión	41
Figura 13. Módulos de elasticidad de las fibras vegetales	44
Figura 14. Módulo de la fibra de vidrio, en comparación a las fibras vegetales	45
Figura 15. Alargamiento o deformación máximo de las fibras.	46
Figura 16. Módulo específico de fibras	46
Figura 17. Esfuerzo vs. Deformación unitaria de las fibras	47
Figura 18. Módulo de elasticidad de los compuestos ensayados a tensión	48

Figura 19. Alargamiento de los compuestos en el ensayo a tensión	49
Figura 20. Carga de máximo o esfuerzo máximo soportado por el compuesto	50
Figura 21. Módulo de elasticidad en MPa, para materiales compuestos y poliéster	52
Figura 22. Superficie del compuesto de fibras de coco no tratadas	54
Figura 23. Superficie del compuesto de fibras de coco mercerizadas	54
Figura 24. Compuesto de fibras de coco tratado con silanos en etanol al 2%	55
Figura 25. Fibras de coco con tratamiento alcalino	55
Figura 26. Molde preparado con cinco capas de cera desmoldante	59
Figura 27. Aplicación de gel coat utilizando brocha	60
Figura 28. Aplicación de la fibra sobre la cavidad	61
Figura 29. Pieza desmoldada con exceso de resina	62
Figura 30. Alerón terminado	63

## RESUMEN

El creciente desarrollo de materiales compuestos en aplicaciones donde se requieran características combinadas de resistencia y bajo peso, ha propiciado la utilización de varias resinas reforzadas con fibra de vidrio, debido a que éstas son de fácil procesabilidad, tienen bajos costos y brindan una buena resistencia mecánica. Sin embargo, dadas las características de las fibras naturales como son: fácil obtención, costos competitivos, aspectos ambientales y de salud, se fabricaron materiales compuestos sustituyendo la fibra de vidrio por fibras naturales como son: las fibras de fique, coco y bagazo de caña. Se hizo un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de las resinas reforzadas con fibras naturales respecto a la resina reforzada con fibra de vidrio, las fibras naturales fueron tratadas superficialmente con una solución básica para mejorar la compatibilidad con la resina y además, se hicieron ensayos con agentes compatibilizantes entre la matriz y la fibra. Se ha encontrado que los módulos de elasticidad del material se incrementan, al tratar las fibras con agentes compatibilizantes tipo silano y con el tratamiento alcalino. Además, se realizaron estudios de la interface entre las fibras y la matriz haciendo pruebas de desprendimiento y mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) para establecer la sinergia entre ellas.

***Palabras Claves: tratamiento alcalino, fibras naturales, compatibilizantes, laminado manual, microscopia electrónica de barrido, compuestos, caracterización mecánica.***

## ABSTRACT

The growing development of composite materials in applications where both low weight and resistant characteristics are required, has bring the use of several resins reinforced with fiberglass , due to their ease of processability, low cost and good mechanical behavior. However, the characteristics of the natural fibers like: ease achievement, competitive cost, and environmental and health topics, give us the possibility to produce composites replacing the fiberglass with natural fibers, using: yute, coconut and cane bagasse fibers. A comparative analysis of mechanical properties between resins reinforced with the natural fibers and glass fibers was studied. The natural fibers also received a superficial basic treatment, to raise the compatibility with the resin. There were some tests using coupling agents between the matrix and the reinforce fibers. There was found that the modulus of elasticity increase when alkali and silane treatments were applied. Moreover, interface study was made between fibers and matrix using pull out test and SEM to see the synergy between them.

***Key Words: alkali treatment, natural fibres, coupling agents, hand layup, electronic scanner microscopy, composites, mechanical characterization.***

## INTRODUCCION

Los materiales compuestos han permitido importantes desarrollos en diferentes áreas del conocimiento, logrando ventajas sensibles en materia de peso, resistencia mecánica y permitiendo ofrecer soluciones eficientes en costo según la aplicación. Ejemplos claros de la presencia y uso de materiales compuestos son las estructuras de los edificios, las cuales, son construidas a partir de la unión de dos materiales principales, el acero y el concreto. Las características de cada uno cumplen diferentes funciones, dando como resultado un material que puede soportar diferentes tipos de carga.

Un material compuesto, por lo general tiene unas propiedades mecánicas superiores a las de sus componentes por separado [1]. Cuando un material compuesto tiene propiedades superiores a las de sus componentes se dice entonces que estos tienen sinergia, que es una propiedad importante para determinar qué materiales son susceptibles de ser utilizados para crear compuestos. Por lo general, el uso de materiales de refuerzo naturales ha presentado un fácil desprendimiento o pobre unión con la matriz, lo que indica una débil sinergia entre las resinas y las fibras naturales, una de las principales razones por las que éstas no son frecuentemente utilizadas.

Algunas investigaciones [2], han logrado demostrar que es posible mejorar las propiedades de las fibras de origen vegetal, cuando éstas son tratadas con una solución alcalina a base de NaOH. Estos tratamientos pueden ser usados para mejorar la compatibilidad de las fibras con la resina y lograr un mejor compuesto. El uso de las fibras vegetales a nivel nacional está principalmente enfocado a los productos artesanales, la fabricación de empaques y geotextiles.

La presente investigación, tiene como principal fin determinar si es o no posible lograr crear materiales compuestos con fibras vegetales, empleando matrices poliméricas. Este estudio, se realiza a diferentes grupos de fibras vegetales, las cuales serán tratadas buscando una mayor integración entre la matriz y la fibra, siendo el principal objetivo de este estudio incrementar la sinergia en el compuesto y evaluar cuál de los grupos de fibras presenta el mejor comportamiento, en comparación con el material compuesto reforzado con fibras de vidrio.

## 1. JUSTIFICACIÓN

El uso de fibras de vidrio para realizar materiales compuestos se ha generalizado en el medio profundamente; sin embargo, muchos ignoran que la mayoría de estos productos son importados y además tienen un impacto ecológico considerable, debido al alto consumo energético para producirlos.

Adicionalmente, existen ciertas fibras naturales que en la actualidad son residuos de otros procesos y que contribuyen a incrementar los niveles de contaminación. Algunas de estas fibras, como el fique, pueden ser utilizadas como fase de refuerzo para fabricar materiales compuestos, con lo cual, no sólo se evita el uso de la fibra de vidrio, sino que se logra reducir el impacto generado por la fibra natural como desecho.

Se debe realizar una investigación encaminada a conocer las propiedades mecánicas de los compuestos elaborados con fibras naturales, con el fin de lograr determinar cuál debe ser su composición óptima para un buen funcionamiento desde el punto de vista mecánico, con el fin de reemplazar efectivamente las fibras sintéticas.

La fabricación de materiales compuestos se ha caracterizado industrialmente por la incomodidad que genera el uso de la fibra de vidrio debido a su naturaleza y poca compatibilidad con la piel, su uso puede generar fuertes dermatitis y delicadas alergias que son difíciles de controlar. Lograr introducir como fase de refuerzo los materiales de origen vegetal puede mejorar considerablemente la calidad de vida de las personas que trabajan con estos y de igual forma, disminuye su exposición a partículas fibrosas que pueden ocasionar daños a nivel pulmonar.

El desarrollo de un material compuesto a partir de las fibras naturales disminuye el impacto ambiental debido que éstas pueden ser incineradas, se utilizan fibras que requieren de pocos niveles de energía para su procesamiento, fibras que son fácilmente producidas y que su reciclaje es mucho más simple.

De igual forma los materiales compuestos con fibras naturales pueden ser utilizados en construcciones con el fin de aislar el sonido [3], y gracias a su costo, se puede incrementar el nivel de vida laboral en zonas altamente expuestas al ruido.

Desde el punto de vista económico, se requiere desarrollar un compuesto que utilice fibras de producción nacional, lo cual puede generar plazas de trabajo, y a su vez, disminuir el impacto ambiental que hoy en día generan estas fibras, al ser tratadas como desechos industriales.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Desarrollar un material compuesto reforzado con fibras naturales que cumpla con las propiedades mecánicas y productivas necesarias para competir con los compuestos de fibra de vidrio convencionales en determinadas aplicaciones.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer las propiedades mecánicas de las fibras de fique, bagazo de caña y coco, realizando ensayos de tensión, compararlas entre ellas y comparar cada una con la fibra de vidrio.
- Fabricar los materiales compuestos estándar de fibra de vidrio con poliéster insaturado y los compuestos reforzados con fibras naturales, utilizando la misma matriz y probetas que faciliten su comparación.
- Determinar el comportamiento mecánico de los compuestos elaborados a partir de fibras naturales y fibras de vidrio, realizando ensayos de tensión, sobre probetas de iguales condiciones con el fin de comparar sus resultados.
- Definir la cohesión entre las fibras naturales y de vidrio con la matriz de poliéster insaturado (UP), realizando pruebas de desprendimiento, para conocer su compatibilidad.

- Definir las condiciones de fabricación del compuesto seleccionado por mejor rendimiento, para asegurar que éstas sean viables para un proceso de estandarización, realizando ensayos de fabricación en porcentajes entre el 10 y el 40% en peso de fibras en el material compuesto total.
- Evaluar financieramente los compuestos seleccionados, teniendo en cuenta que éstos deben ser comparados con las fibras de vidrio, para determinar si son competitivos desde el punto de vista económico.
- Realizar una comparación física en un producto definido, con el fin de evaluar la apariencia y validarlo para su uso.

### 3. MARCO TEÓRICO

Al fabricar un compuesto, se tiene por lo general un material matriz y un material de refuerzo. El primero tiene como principal función, tomar la forma que se desea adopte el producto y transferir las cargas hacia el segundo. El segundo, por lo general es de tres tipos distintos, pueden ser fibras, partículas y hojuelas, donde cada uno de estos ofrece diferentes propiedades mecánicas. Para reforzar estructuras, la fase de refuerzo mas empleada es comúnmente fibrosa, pues ofrece un mejor comportamiento mecánico y será pues el objeto de estudio de este proyecto [1].

Las fibras que más se utilizan a nivel comercial son las fibras de vidrio. En términos generales, se emplean este tipo de fibras por su bajo costo en comparación con las fibras de carbono o las fibras de aramida [4] que presentan un mejor desempeño en la mayoría de condiciones; sin embargo, estas fibras tienen un costo mucho mayor y por lo general se requieren resinas especiales para lograr sus máximas capacidades, razón por la cual su uso es limitado a aplicaciones muy especiales tales como los vehículos de fórmula uno, vehículos de lujo, algunas joyas, entre otros.

Existen varios tipos de fibras de vidrio, en el comercio es usual encontrar la fibra E, la cual tiene unas buenas propiedades aunque existen variaciones con mejores comportamientos mecánicos que de igual forma pueden implicar un incremento significativo en los costos [4]. Las fibras de vidrio no gozan de compatibilidad con las resinas de poliéster de forma natural, para lograr que estas fibras trabajen de forma conjunta con la matriz de poliéster insaturado es usual que se realice un proceso químico de compatibilización, que permita mejorar la sinergia entre la matriz y el refuerzo. Este tratamiento químico, se realiza a las fibras de vidrio, y

es uno de los elementos que más valor les agrega. Los agentes utilizados para mejorar la compatibilidad son frecuentemente silanos y son elementos que permiten incrementar ampliamente la resistencia mecánica del material compuesto y la humidificación de las fibras con el poliéster [5].

Los materiales en partículas y escamas son empleados ampliamente en la industria y se utilizan para disminuir los costos de los materiales compuestos finales y en algunas ocasiones para mejorar el desempeño mecánico del material, cuando se utilizan para mejorar el material se denominan rellenos de refuerzo y permiten mejorar la estabilidad dimensional, resistencia a la abrasión y al escurrimiento [1], entre otros, y ofrecen la posibilidad de crear interesantes acabados a las piezas finales, razón por la cual son usados para lavamanos, mesones de cocina, elementos decorativos; entre otros, gracias a la excelente gama de posibilidades y a la importante disminución en costos que puede llegar a obtenerse. Un sistema cargado puede tener el 80% de su peso en materiales particulados de bajo costo como el carbonato de calcio, logrando así, incrementar considerablemente el volumen sin incrementar el precio del producto, a este tipo de componentes también se les conoce como extensores [1].

En términos generales, el desarrollo de materiales compuestos reforzados, tiene un amplio interés pues puede ofrecer excelentes oportunidades para el futuro en muchas áreas del conocimiento; sin embargo, la fabricación de los materiales compuestos tiene una serie de dificultades que si bien son explotadas adecuadamente pueden convertirse en ventajas. Una de las dificultades conocidas, pasa por la dirección de las fibras. Por esta razón, los materiales compuestos pueden presentar propiedades isotrópicas o anisotrópicas. Si la orientación no es tenida en cuenta durante el diseño de un producto, los resultados pueden ser negativos, pues la resistencia mecánica puede resultar muy baja frente a algunas direcciones de la carga y se ha demostrado que el módulo de elasticidad de los materiales compuestos y su resistencia a la tensión, tienen

una curva exponencial decreciente a medida que el ángulo de las fibras aumenta en comparación a la dirección de la aplicación de la carga (Ver Figura 1), siendo el punto más crítico cuando el ángulo alcanza los 90° [1].

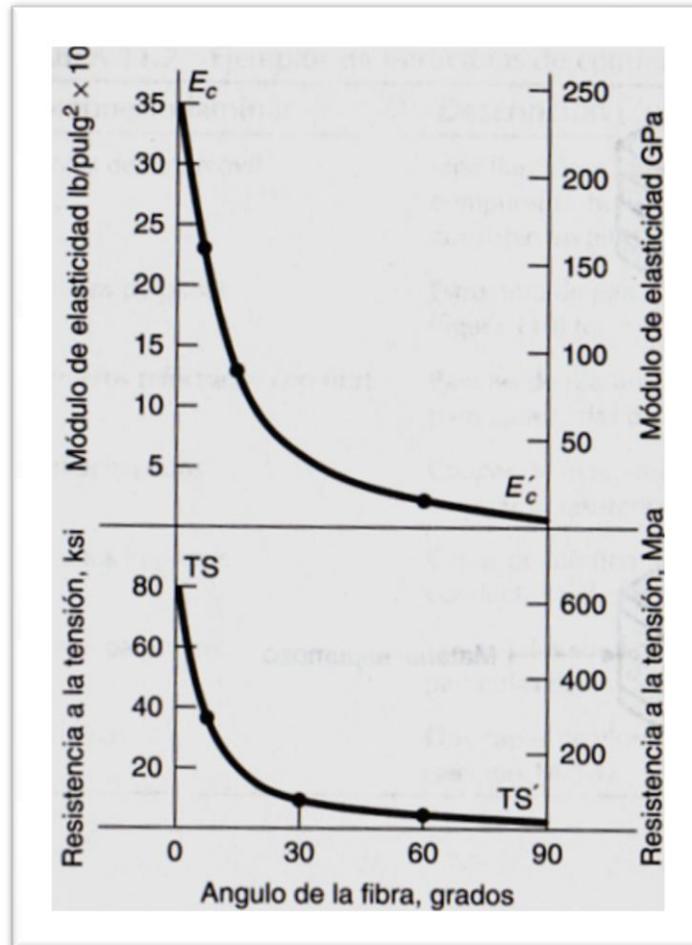


Figura 1. Evolución del Módulo de elasticidad en función de la dirección de las fibras. [1]

Otro de los problemas identificados en los materiales compuestos cuando estos son reforzados con fibras es la baja compatibilidad y/o humectación que se logra dar al refuerzo. Este problema puede afectar las propiedades mecánicas del material y provocar fallas a cargas por debajo de lo esperado.

La principal evidencia de que las fibras naturales o en general de que una fase de refuerzo no tiene sinergia con la matriz se aprecia cuando se realizan ensayos con el material compuesto y se obtienen propiedades mecánicas inferiores a las que se obtienen al ensayar la matriz sin ningún tipo de refuerzo. La principal razón para que esto suceda es que la fase de refuerzo no se adhiere a la matriz con suficiente fuerza y actúa en vez de elemento de refuerzo como un concentrador de esfuerzos que termina por disminuir considerablemente la resistencia mecánica del material.

El concentrador de esfuerzos se genera principalmente porque la fase de refuerzo no se une a la matriz y cuando la reacción exotérmica finaliza, hay una separación entre la fibra y la matriz lo cual impide que la energía que se le aplica a la pieza llegue a la fibra y se quede en la matriz, provocando una fractura temprana y a una carga inferior a la esperada. Generalmente se aprecia este fenómeno en ensayos a tracción, en los cuales, se observa que la matriz se fractura sin dañar las fibras o el material de refuerzo, lo que demuestra, que los refuerzos se desprendieron sin sufrir daño alguno y por tanto sin recibir parte de la energía aplicada al material.

Los materiales compuestos están ampliamente difundidos en el mercado y sus aplicaciones en la actualidad son muy diversas y van desde simples elementos decorativos hasta complejas carrocerías, en los cuales, el diseño del material juega un papel relevante. Para aquellas aplicaciones que no demandan de una gran resistencia mecánica, sería posible introducir fibras naturales como fase de refuerzo. La posibilidad de recolectar grandes cantidades de estas fibras es amplia debido a que éstas surgen en su mayoría como desechos de una actividad agrícola principal. Datos obtenidos de investigaciones realizadas en Costa Rica por Moya en 2001 [6], demuestran que el 86% de los desechos industriales son generados por el agro, por productos comunes como el banano y el café, y de no tradicionales como la piña y la naranja [6].

El uso de fibras naturales en materiales compuestos tiene importantes ventajas desde el punto de vista ambiental, puesto que son amigables en su proceso y producción; de igual forma tienen mayor elasticidad, menor abrasión durante la producción, presentan buena absorción de las vibraciones y por ende del sonido, puede resultar hasta tres veces más económico que trabajar con fibras de vidrio, su densidad puede ser favorable y al momento de ser incineradas producen menores cantidades de CO<sub>2</sub> y otros gases tóxicos. No obstante, éstas también tienen algunas desventajas conocidas como la poca sinergia con los polímeros, la calidad de la fibra es dependiente de la forma como ha sido cultivada o extraída, la capacidad hidrofílica de las fibras naturales puede ser un problema en algunas aplicaciones al igual que su densidad durante el proceso [3].

Se han hecho esfuerzos por lograr que las fibras de origen vegetal sean candidatos para reforzar materiales compuestos en aplicaciones comunes, para lo cual es necesario que haya una buena compatibilidad y fijación entre la fibra y la resina. En cuanto a la sinergia entre la matriz y el refuerzo el Dr. Ray Dipa [2] ha realizado estudios con el fin de mejorar la adhesión entre las fibras naturales y los polímeros, estudios que también han demostrado que se pueden mejorar las propiedades físicas de las fibras realizando un tratamiento en una solución alcalina, en donde se ha observado cómo la tenacidad de la fibra aumenta a medida que la fibra se expone durante más tiempo a una solución de hidróxido de sodio, sin embargo, pasadas cuatro horas, las fibras se comienzan a volver cristalinas y por tanto mucho más frágiles [2]. Estos estudios demuestran, que las fibras tuvieron un incremento en su tenacidad en un 49% y que presentaron un sustancial incremento en su módulo de elasticidad del 79%, de igual forma, se logró eliminar la lignina y la hemicelulosa de las fibras, logrando de esta manera disminuir en cerca del 10% el peso de las fibras [2]. Al tratar las fibras de fique con el hidróxido de sodio, se encontró que las fibras se dividieron en finos filamentos, lo cual permite incrementar el área a ser humectada por la resina, con lo cual puede mejorarse la adhesión de las fibras.

Las investigaciones en materiales compuestos, apuntan a que los materiales del futuro se concentrarán en su mayoría en refuerzos de fibras naturales, dadas las condiciones de abrasión, costo energético y dificultad de reciclaje de las fibras sintéticas. Estos materiales son de interés general y compañías como Daimler-Chrysler financia proyectos de investigación en Brasil para incrementar este tipo de desarrollo y colocarlos en sus vehículos de línea [3].

## 4. FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

### 4.1 MATERIALES

**4.1.1 Fibras.** Las fibras de origen vegetal, tales como el fique, el coco y el bagazo de caña tienen importantes diferencias en su origen. En términos generales, las fibras de fique son ampliamente usadas en el comercio por ser de unas buenas prestaciones mecánicas y por su excelente longitud. A diferencia de las fibras de bagazo de caña y de coco, el fique es plantado para lograr extraer las fibras que se emplean ampliamente en empaques, geomembranas y en aplicaciones artesanales. Las fibras de coco y bagazo de caña, por el contrario, se obtienen como subproductos; es decir, el principal objetivo de las plantaciones de coco a nivel nacional e internacional, está relacionado en mayor medida con la nuez del coco y su agua. De cada coco, es posible extraer en promedio unos 125g de fibras; sin embargo, la mayor dificultad que presentan estas fibras es su longitud, lo cual hace muy compleja su confección, razón por la cual su uso no es tan frecuente aunque si es usual que se empleen para la fabricación de colchones, y en combinación con el fique, suele utilizarse como geotextil.

La fabricación de mantos de coco, es poco frecuente puesto que para lograr un proceso industrial eficiente, se requiere de una fibra bastante limpia y debido a la forma como debe extraerse la fibra, ésta se encuentra llena de algunas partículas que pueden dañar la máquina, razón por la cual su elaboración es aún muy limitada. Por otra parte, las fibras que se pueden obtener del bagazo de caña, son por lo general subproductos de la industria azucarera o panelera. A diferencia de la fibra de coco y de fique, la fibra de bagazo de caña es de una apariencia mucho más frágil y tiene una masa que la acompaña, que son los conductos donde se almacena la sacarosa elemento que puede dificultar su extracción.

En este tipo de fibras los componentes principales son: la celulosa, la lignina y la hemicelulosa, más otros compuestos secundarios (taninos y gomas).

**4.1.2 Matriz.** Al momento de fabricar materiales compuestos de matriz polimérica, la selección de la matriz cumple un papel de vital importancia. Como se mencionó anteriormente, esta fase del compuesto, tiene la función de tomar la forma final y además es la que transmite la energía a la fase de refuerzo. La selección de ésta tiene una serie de variables a tener en cuenta que pueden ser decisivas para que el material compuesto tenga el comportamiento esperado. Los materiales compuestos, a diferencia de otros materiales de aplicación común, como los aceros o los polímeros, no tienen unas propiedades definitivas hasta que se fabrican. Por esta razón, es que se dice que los materiales compuestos se diseñan al mismo tiempo que se fabrican y como se expresaba anteriormente, la orientación de la fibra, el espesor, el porcentaje de saturación, entre otros, pueden marcar una amplia diferencia. Las matrices de mayor uso comercial son las resinas de poliéster insaturado, debido principalmente a su menor costo comparativo [5]. Entre éstas, existen una serie de familias las cuales ofrecen una gran cantidad de diferencias en su comportamiento mecánico y químico, con lo cual se puede hacer muy compleja la selección de la resina apropiada.

Las familias más comunes de las resinas de poliéster insaturado son las tereftálicas, ortoftálicas e isoftálicas [7]. De estas tres, las primeras dos familias son las más comerciales y de uso general. Las resinas isoftálicas suelen ser utilizadas para mesones y aplicaciones donde la resistencia química es una variable importante. Existen adicionalmente otras familias de resinas tales como las vinilester, epóxicas, epoxivinilester y las CPD. Estas resinas, tienen aplicaciones que por lo general son más específicas y son más costosas que las resinas de poliéster. Las resinas epóxicas por ejemplo, son ampliamente utilizadas con las fibras de carbono, puesto que la compatibilidad entre las fibras de carbono y las resinas de poliéster es muy baja y la calidad del material

compuesto final es pobre, utilizando de forma inadecuada unas fibras de alto costo y excelentes propiedades mecánicas. Adicional al tipo de resina, los iniciadores o catalizadores que se utilizan con la matriz para que esta polimerice pueden hacer una importante diferencia en la facilidad de procesamiento y en caso de ser empleados de manera inadecuada pueden ocasionar una presencia exagerada de burbujas las cuales actuarán como concentradores de esfuerzos, fracturas en la matriz o un tiempo de trabajo demasiado corto para saturar el material con la fase de refuerzo o por el contrario que los catalizadores sean tan escasos en la matriz que esta no polimerice adecuadamente.

La velocidad con la que se polimeriza la matriz, puede ocasionar de igual forma una delicada variación en el comportamiento mecánico de la misma, afectando de esta forma las propiedades del material compuesto final. Vale la pena aclarar, que la cantidad adecuada de catalizadores, variará en función de la temperatura y la humedad presente en el ambiente al momento de fabricar el material debido a que otro de los métodos para lograr polimerizar las resinas de poliéster es mediante la aplicación de temperatura.

Para este estudio, se ha seleccionado como matriz una resina ortoftálica de poliéster insaturado de referencia 805 suministrada por Andercol, a la cual se le ha agregado un 20% de estireno. Se ha seleccionado una resina de aplicación general y se ha utilizado para todos los estudios mecánicos sin cambio alguno. La razón principal para esto, es que se desea estudiar el impacto de los tratamientos efectuados a las fibras y cómo éstas pueden mejorar su resistencia mecánica ante la misma matriz. La resina, ha sido catalizada utilizando octoato de cobalto y metil etil cetona peróxido al 0,5 % y 2% P/P respectivamente, obteniendo un tiempo de trabajo aproximado de ocho minutos a una temperatura ambiente de 25°C y una humedad relativa del 50%.

**4.1.3 Agentes compatibilizantes.** Industrialmente se utilizan con frecuencia agentes compatibilizantes o de acoplamiento que permiten mejorar las condiciones de sinergia entre las fibras y la matriz. Este tipo de agentes, son altamente reactivos y funcionan como un puente que se fija con facilidad a los dos componentes y de esta forma logra un mayor comportamiento mecánico del material final. En esta investigación, ha sido objeto de estudio un aminosilano. La razón principal de su selección radica en que éste es el silano de más alta reactividad y es el de mayor uso comercial. Por lo general, las fibras de vidrio, son tratadas con estos agentes de acoplamiento [5] con el fin de mejorar su sinergia con las resinas, sin el uso de silanos, las fibras de vidrio se desprenderían de la matriz y tendrían una resistencia mecánica inferior. Los silanos, son agentes considerablemente costosos y su precio está por lo general en 20 USD/kg, por lo que un uso exagerado de esta sustancia puede incrementar considerablemente el costo de las fibras tratadas con este compatibilizante. Se ha empleado el silano Z6020 (aminosilano) de Dow Corning suministrado por Merquiand.

## **4.2 TRATAMIENTOS REALIZADOS A LAS FIBRAS**

**4.2.1 Tratamiento alcalino.** Las fibras vegetales tienen dentro de su estructura componentes que son ricos en agua (lignina y hemicelulosa) y que por tanto generan dificultades para lograr que el material compuesto, al ser reforzado con este tipo de fibras tenga unas prestaciones mecánicas adecuadas. La razón principal para que la resistencia mecánica disminuya es que el agua es uno de los inhibidores naturales de la polimerización en las resinas de poliéster insaturado, por lo tanto la presencia de estos componentes es poco deseable dentro de la estructura de las fibras. Adicionalmente, estos compuestos poco deseables agregan una importante fracción de peso a las fibras, que por lo general es del orden del 10%, peso que se puede ver reflejado en el compuesto y que no agrega ningún valor al material. Otra de las razones por las que eliminar estos

componentes es deseable radica en que para algunos tipos de fibras, éstas se dividen en pequeños filamentos, incrementando el área y mejorando la posible humectación con la matriz.

El tratamiento que se ha estudiado para eliminar estos componentes, específicamente la lignina y la hemicelulosa es la mercerización y consiste en tratar las fibras en una solución de Hidróxido de sodio (NaOH), también conocido como soda cáustica. Este tratamiento alcalino se realizó inicialmente a diferentes concentraciones de NaOH, se estudiaron soluciones al 2%, 5% y 8% P/V. Sin embargo, al evaluar las fibras tratadas en soluciones al 5% y 8% se evidenció una disminución de las propiedades mecánicas razón por la cual para el tratamiento de las fibras se empleó la solución de 2% P/V NaOH, las fibras estuvieron sumergidas en la solución durante aproximadamente cuatro horas.

Posteriormente a esto, se realizaron lavados con soluciones al 50% V/V en ácido acético y luego en agua destilada. Finalmente, las fibras fueron secadas en un horno a 30°C durante ocho horas para eliminar el contenido de agua. Al momento de realizar el proceso de mercerización, es posible apreciar un cambio en el color de la solución, este cambio, se hace más evidente en las fibras de coco, donde la solución toma un color rojo (Ver Figura 2). Sin embargo, el cambio en la coloración final de las fibras es mínima, aunque es posible apreciar que las fibras se ponen ligeramente más pálidas como se aprecia en la Figura 3.



Figura 2. Fibras de coco durante la mercerización.

Fuente: El autor

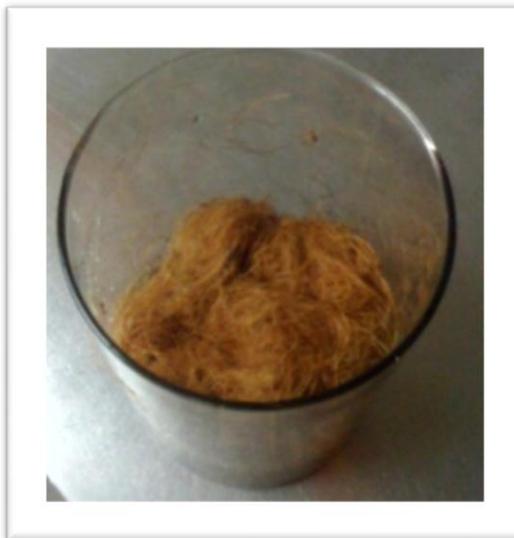


Figura 3. Fibras de coco después de ser mercerizadas.

Fuente: El Autor

La realización de este proceso, permite disminuir la densidad de las fibras gracias a la eliminación de los compuestos antes mencionados. De igual forma, lograr eliminar la lignina y la hemicelulosa, tal como se había mencionado anteriormente, ayuda a mejorar la compatibilidad de las fibras con la resina de poliéster, obteniendo compuestos de mejores prestaciones mecánicas.

**4.2.2 Tratamientos con agentes compatibilizantes.** Como se había explicado anteriormente, las fibras de vidrio comerciales generalmente tienen un tratamiento superficial que se realiza a partir de silanos. Con el ánimo de tener las fibras naturales en iguales condiciones e incrementar su impregnación a la fibra, se estudiaron agentes compatibilizantes con las fibras vegetales de fique y coco.

**4.2.2.1 Tratamiento con silanos disueltos en agua.** Inicialmente se estudió la posibilidad de disolver el amino silano en agua destilada. Este proceso se llevó a cabo para estudiar el impacto de agregar agua a la estructura de la pieza acompañada de silano pues esto puede resultar benéfico puesto que hace posible disminuir considerablemente los costos del tratamiento.

**4.2.2.2 Tratamiento con silano disueltos en etanol.** El tratamiento efectuado con silano, fue también realizado disolviendo el silano en etanol, y se utilizaron dos concentraciones diferentes. En primera instancia se empleó una solución en etanol con 0,5% P/V de silano y posteriormente se empleó una solución con 2% P/V de silano. El principal objetivo de incrementar la cantidad de silano en el tratamiento es estudiar su impacto en el material compuesto final. Inicialmente, se puede pensar que a mayor uso de silano, la resistencia mecánica se puede incrementar. Sin embargo, se esperaría que existiera una concentración óptima a partir de la cual se establezca la mayor compatibilización por parte del silano, esto se pensaría teniendo en cuenta el alto costo del material. Para el tratamiento de las fibras se preparó una solución con etanol al 0,5% P/V de silano, se dejaron las

fibras en la solución durante 15 minutos con agitación continua. Posteriormente, las fibras fueron secadas en un horno durante 20 minutos a una temperatura de 120°C.

**4.2.2.3 Tratamiento con silanos utilizados directamente sobre la resina de poliéster.** Los silanos fueron empleados sobre la resina de poliéster directamente con el fin de evaluar si el comportamiento mecánico del compuesto mejora con respecto al comportamiento obtenido cuando los silanos se le aplicaron a las fibras. Al momento de agregar el silano a la resina, se obtuvo una reacción poco deseable pues la temperatura de la resina se incrementó considerablemente dejándola cerca de la temperatura de gel, lo cual redujo considerablemente el tiempo de trabajo al catalizar en la misma proporción la resina. La resina cambió de color inmediatamente estuvo en presencia del silano, tornándose oscura e intensificando el color morado propio del octoato de cobalto.

### **4.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN**

**4.3.1 proceso de fabricación sin matriz por Hand Lay Up.** Se fabricaron por el método de laminado manual o Hand Lay Up rectángulos de 15x20 cm, utilizando todas las fibras naturales y la de vidrio. El espesor de los laminados fue variable según la humectación de las fibras, finalmente, todos los laminados fueron pulidos para reducir su espesor hasta 4mm aproximadamente. Los rectángulos elaborados con las fibras, fueron posteriormente cortados obteniendo probetas de 12x3 cm .

Los materiales resultantes reforzados con fibras naturales han sido saturados entre un 3 y un 5% de fibra en el peso total del compuesto. Este porcentaje de saturación ha sido el máximo posible empleando la técnica del laminado manual, adicionalmente, el volumen de fibras es muy superior si es comparado con el

volumen de las fibras de vidrio, la razón principal de esta diferencia radica en la menor densidad de las fibras. El material reforzado con fibras de vidrio ha sido saturado en un 30% de fibras en el peso total del compuesto.

Al evaluar cualitativamente la fabricación de los compuestos empleando fibras vegetales se aprecia una alta dificultad para lograr que las fibras se humecten con la resina de poliéster, la principal evidencia de ello, es que la resina se ha escurrido toda hasta la base de la placa de fabricación dejando totalmente despoblada la capa superior del material, problema que se hizo más visible al utilizar las fibras de coco y las fibras de bagazo de caña tal como se aprecia en las Figuras 4 y 5 respectivamente. En cuanto a las fibras de fique (Figura 6), la humectación fue mucho más sencilla y se presentó una sensible mejora al trabajar con las fibras tratadas con NaOH, la cual también se presentó para las fibras de coco, aunque no tanto así para las fibras de bagazo de caña.

Al retirar los materiales de la placa de fabricación, se ha logrado apreciar una importante diferencia en los compuestos reforzados con bagazo de caña. En términos generales, los dos materiales que fueron reforzados con el bagazo, presentaron una matriz tactosa o pegajosa y poco rígida, lo cual puede ser un indicio de una pobre polimerización de la resina.

En vista de que todos los materiales fueron fabricados el mismo día, a la misma hora y con la misma preparación de la resina, es posible concluir que la presencia de fibras de bagazo de caña ha afectado la reacción de la resina lo cual es posible apreciar al tacto y en el color final del material que es de aspecto verde.



Figura 4. Compuesto reforzado con coco elaborado sin asistencia de moldes

Fuente: El autor.



Figura 5. Compuesto reforzado con bagazo de caña sin asistencia de moldes

Fuente: El autor



Figura 6. Compuesto reforzado con fibras de fique sin asistencia de moldes

Fuente: El autor.

**4.3.2 Proceso de fabricación del material compuesto con molde.** Con el fin de lograr una mayor saturación en el compuesto y una mejor humectación de las fibras se ha cambiado el método de fabricación, lo cual permite de igual forma analizar diferentes metodologías para la elaboración del material, elemento que puede ser muy útil para la fabricación de productos en serie. Se ha decidido en segunda instancia, realizar los compuestos empleando una matriz que ayude a centrar las fibras en una cavidad y en ese orden de ideas a lograr una mayor saturación del compuesto. Se han elaborado probetas de materiales compuestos utilizando un molde cuyas dimensiones se pueden observar en la Figura 7. Para estas probetas se utilizaron fibras con y sin tratamiento alcalino y también fueron elaboradas probetas con fibras compatibilizadas con silano. Las probetas han sido saturadas con un 5% de fibras en el peso total del compuesto.

De igual forma se han elaborado muestras de la matriz para compararlas con el material compuesto reforzado con fibras de origen vegetal, en esta etapa, no se han elaborado probetas con las fibras sintéticas, pues bien el objetivo es comparar las fibras naturales entre sí, con el fin de determinar si los tratamientos ofrecen mejores prestaciones al material compuesto.

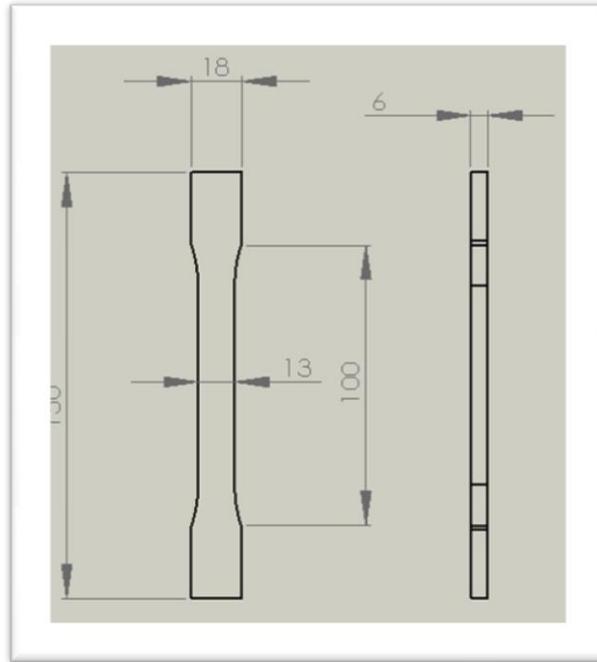


Figura 7. Dimensiones en mm de las probetas elaboradas con molde

Fuente: El autor

La evaluación cualitativa realizada a este proceso permite evidenciar que hay una mayor facilidad para fabricar el material a partir de la cavidad; sin embargo, las fibras de coco, sobre todo, tienden a separarse de la matriz haciendo compleja la saturación final del compuesto. Las fibras de fique han sido fáciles de trabajar y se ha logrado saturar el compuesto sin mayores dificultades, aunque también se

puede observar que las fibras no se mantienen por completo en la cavidad del molde aunque su comportamiento es mejor que el de las fibras de coco (Figura 8).



Figura 8. Fabricación de probetas con molde.

Fuente: El autor

**4.3.3 Proceso fabricación del material compuesto asistido con vacío.** Una tercera metodología de producción fue puesta en práctica para elaborar el material compuesto. Inicialmente, se había realizado un material compuesto por Hand Lay Up con fibras de coco, el cual había sido muy difícil de saturar y la dificultad de procesamiento fue muy alta debido en gran parte a la poca densidad de las fibras, lo cual las hace ocupar un alto volumen y que dificulta en igual medida su manipulación. Con el fin de disminuir estas dificultades y lograr saturar el material de una forma más eficiente y que pueda ser fácilmente replicado en procesos industriales sin que esto implique un mayor sobrecosto, se ha realizado un laminado manual asistido por vacío.

El proceso consiste en realizar una laminación manual, a la cual se le ha colocado un marco de cinta doble faz y se ha cubierto con un plástico resistente al estireno. Al plástico, se le ha adaptado un eyector de vacío con el fin de retirar el aire de la zona en la que se está fabricando el material y adicionalmente cumple la función de aplastar las fibras una vez que el aire se retira de la cavidad (Ver Figura 9).

Este proceso, debe controlarse y la cantidad de vacío aplicada a la pieza no debe ser muy alta, puesto que si se retira con mucha presión el aire, el estireno, al ser altamente volátil y ser uno de los componentes principales de la resina, abandonará la cavidad. El principal problema de que el estireno sea apartado de la resina, radica en que éste es de vital importancia para que el proceso de polimerización se lleve a cabo de una forma satisfactoria, razón por la cual el proceso debe ser controlado y utilizarse sólo mientras se perciba aire en la cavidad.



Figura 9. Uso de sistema de vacío para fabricación del material

Fuente: El autor

Al evaluar cualitativamente el resultado del ensayo se ha podido determinar que el uso de un sistema de vacío que asista al laminado manual puede ser ampliamente deseable en la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras vegetales. El material resultante ha sido posible saturarlo en un 10%, mostrando una mejor apariencia y una mejor distribución de la resina en las fibras (Ver Figura 10); sin embargo, las fibras de la capa superior aún se observan poco impregnadas por la resina, elemento que puede ser mejorado incrementando el tiempo de trabajo. Las presiones negativas para este ensayo han sido bajas, desafortunadamente no ha sido posible determinarlas debido a la resolución del equipo para medir vacío adquirido.



Figura 10. Capa superior del compuesto fabricado con asistencia de vacío

Fuente: El Autor.

**4.3.4 Proceso de fabricación de material compuesto por una fibra para ensayos de desprendimiento.** Para realizar los ensayos de desprendimiento, se sumerge una sola fibra en la matriz de poliéster o en su momento, en la matriz que se esté empleando para fabricar el material. Para lograr que la fibra, se integre con la matriz, se utiliza un montaje especial, en el cual se posicionan una serie de cilindros en los cuales se coloca la resina líquida con el acelerador y el catalizador ya incorporados y posteriormente, con la ayuda de unos elementos para guiar la fibra, ésta se baja hasta quedar inmersa en los cilindros tal como se aprecia en la Figura 11. Una vez que la resina se gelifica y se cura, se obtiene un cilindro sólido, con una sola fibra en el centro inmersa una longitud determinada según el ensayo. El montaje realizado para la elaboración de los ensayos de desprendimiento es igual al empleado por Paniagua y otros [8] para evaluar la adhesión entre las fibras de Queratina con el Poliester insaturado.

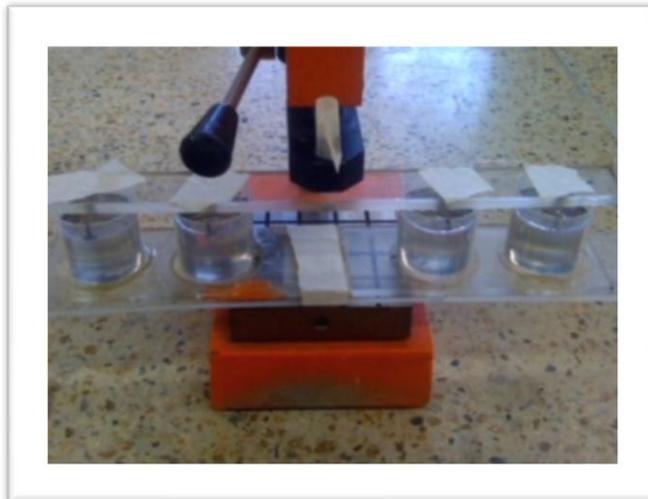


Figura 11. Montaje para fabricar probetas de desprendimiento.

Fuente: El autor

## **5. CARACTERIZACION MACROESTRUCTURAL**

### **5.1 CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS**

Para el estudio de las fibras se sigue el procedimiento descrito en la norma ASTM C1557-03 [9], la cual define el método con el cual pueden ser caracterizadas mecánicamente las fibras, realizando ensayos a tensión.

Se seleccionaron aleatoriamente diez especímenes de cada uno de los tipos de muestra que se desean estudiar, entre los que se han incluido fibras de coco, fique, bagazo de caña, con y sin tratamiento alcalino, y fibras de vidrio para tener un patrón de comparación. Se han montado en las pestañas (Ver Figura 12) seis de cada uno de los tipos de fibra, seleccionando aquellas que presentaban una mayor regularidad y que no mostraban daños aparentes. Las fibras fueron todas medidas al menos en tres puntos con un tornillo micrómetro, con una resolución de 0.01mm resultado adecuado para medir prácticamente todos los especímenes, excepto los filamentos de fibras de vidrio, razón por la cual, se ha decidido estudiar un corte de la fibra, el cual está compuesto por muchos filamentos.

El ensayo se realizó a temperatura controlada de 25°C y una humedad relativa del 50%. La velocidad de deformación fue fijada a 5mm/min, se aplicó un torque de 20N/m en las mordazas y se utilizó una distancia inicial para el ensayo de 5 cm.



Figura 12. Montaje de las fibras en la máquina a tensión

Fuente: El autor

## 5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales realizados mediante Hand Lay Up y con molde fueron ensayos en una máquina universal de ensayos a una temperatura controlada de 25°C y con un 50% de humedad, la velocidad de avance de la cruceta se fijó en todos los casos a una velocidad de 5mm/min. Las probetas elaboradas por Hand Lay Up se ensayaron con una distancia inicial de 80 mm, mientras que las fabricadas con molde se realizaron utilizando una longitud inicial de 100mm. Para todos los casos, se realizó un proceso de pulido a la cara de la pieza que no estaba moldeada, esto con el fin de eliminar posibles elementos que ayudaran a concentrar esfuerzos.

### 5.3 ENSAYOS DE DESPRENDIMIENTO

Uno de los factores que debe estudiarse al momento de fabricar materiales compuestos, es la sinergia que existe entre la matriz y la fibra. Este tipo de ensayos, se utilizan para conocer el comportamiento de una sola fibra cuando ésta se encuentra en la matriz y suelen arrojar dos tipos distintos de falla. La primera de las fallas y que es la más deseada, es que la fibra se rompa. El otro posible caso de falla, es que la fibra se desprenda de la matriz, dejando hueco el espacio que ocupaba. Para ambos casos, la forma usual para calcular la calidad de adhesión entre la matriz y la fibra, expuesta por Zhandarov [10], es calcular la resistencia cortante de la interface empleando la ecuación 1.

$$\tau = \frac{Fmax}{\pi dL} \quad (1)$$

Donde:

$\tau$  Es el esfuerzo cortante

$Fmax$  Es la fuerza máxima aplicada a la fibra

$d$  Es el diámetro de la fibra

$L$  Es la longitud inmersa en la matriz

El ensayo, fue llevado a cabo a una temperatura controlada de 25°C con una humedad relativa del 50%. La distancia inicial del ensayo fue de 25 mm, se aplicó una velocidad de deformación de 5mm/min y un torque de 8 N/m en las mordazas para sostener las fibras.

## 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 ESTUDIO EN FIBRAS VEGETALES

Una evaluación cualitativa de los especímenes refleja que las fibras de origen vegetal tienen una alta irregularidad en su estructura, principalmente las fibras de bagazo de caña y coco, siendo las últimas de un diámetro considerablemente mayor (Ver Tabla 1). Las fibras de bagazo de caña, tienen una forma que se acerca más a un rectángulo que a una circunferencia, complicando su posible medida con medios mecánicos comunes. Las fibras de fique y coco, tienen una apariencia flexible, su manipulación es sencilla y no se fracturan con facilidad. Las fibras de bagazo de caña son bastante frágiles, se rompen con facilidad ante esfuerzos de cortante y son rígidas, lo cual dificulta su manipulación, la longitud de las fibras es menor que las de los otros especímenes, lo cual hace más complejo su montaje para el ensayo mecánico; además, estas fibras presentan residuos adheridos que son los conductos en donde se almacena la sacarosa, generando que sean las fibras de estructura menos homogénea.

Tabla 1. Medidas de los diámetros de las fibras

	<b>CAÑA NT*</b>	<b>CAÑA T**</b>	<b>COCO NT*</b>	<b>COCO T**</b>	<b>FIQUE NT*</b>	<b>FIQUE T**</b>	<b>VIDRIO</b>
DIÁMETRO mm	0.22	0.2375	0.13575	0.12825	0.41375	0.25825	0.041
DESVIACIÓN	±0.058	±0.052	±0.032	±0.025	±0.111	±0.060	±0.003
DENSIDAD g/cm <sup>3</sup>	1.201	1.08	1.15	0.975	1.45	1.29	2.6

\* NT : NO TRATADA    \*\*T : TRATADA

Fuente: El autor

La caracterización de fibras ha permitido determinar diferencias importantes entre todas, de forma que establecen unas buenas relaciones al momento de realizar comparaciones. En las Figuras 13 y 15, se puede apreciar que el módulo de elasticidad y la deformación máxima de las fibras vegetales disminuyó para todos los casos 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.

### A. Modulo de elasticidad (MPa)

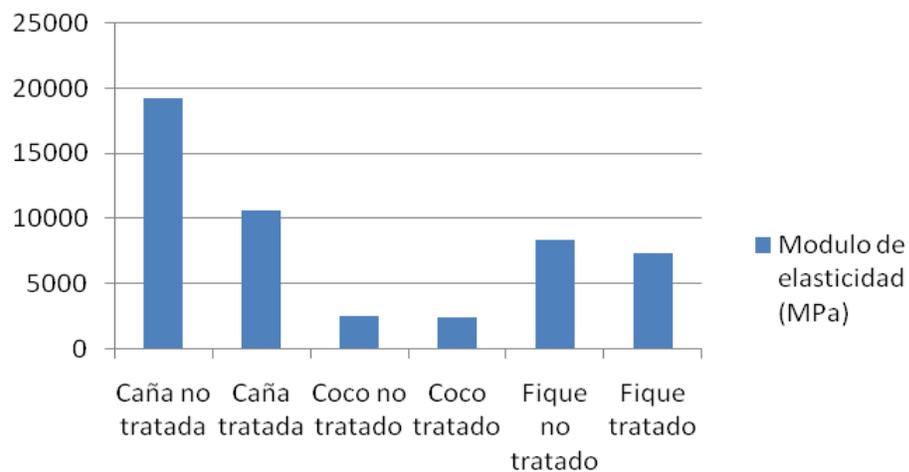


Figura 13. Módulos de elasticidad de las fibras vegetales.

Fuente: El autor

Como se observa en la Figura 13, el módulo de elasticidad de las fibras vegetales se encuentra entre los 2300 y los 19200 MPa, que comparados con las fibras de vidrio, estos módulos son unas 36 veces inferiores, pues el módulo encontrado es de 696730 MPa. (Ver Figura 14), El comportamiento esfuerzo-deformación de las fibras se puede apreciar en la Figura 17, en donde las fibras naturales tienen módulos de elasticidad bajos y características bastante diferentes; las fibras de

coco presentan mayores deformaciones, las fibras de bagazo de caña tienen el módulo más alto de las tres, pero tienen un comportamiento frágil y las fibras de fique se ubican al centro de éstas. Al revisar el módulo específico es posible observar que las fibras naturales se benefician de su baja densidad y en mayor proporción las de coco (Ver Tabla 1), mientras que las fibras de vidrio se ven afectadas por la misma (Ver Figura 16); sin embargo la diferencia entre los módulos de las fibras sigue siendo sensible.

**B. Modulo de elasticidad (MPa)**

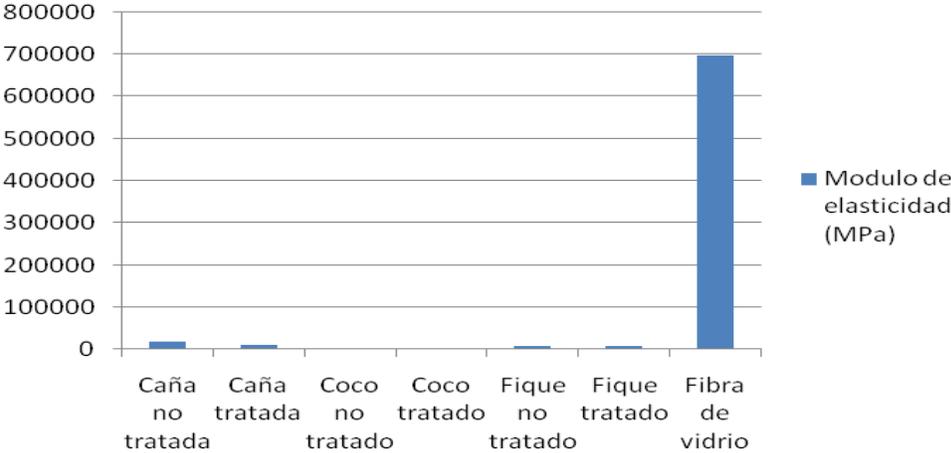


Figura 14. Módulo de la fibra de vidrio, en comparación a las fibras vegetales

Fuente: El autor

### C. Alargamiento (mm)

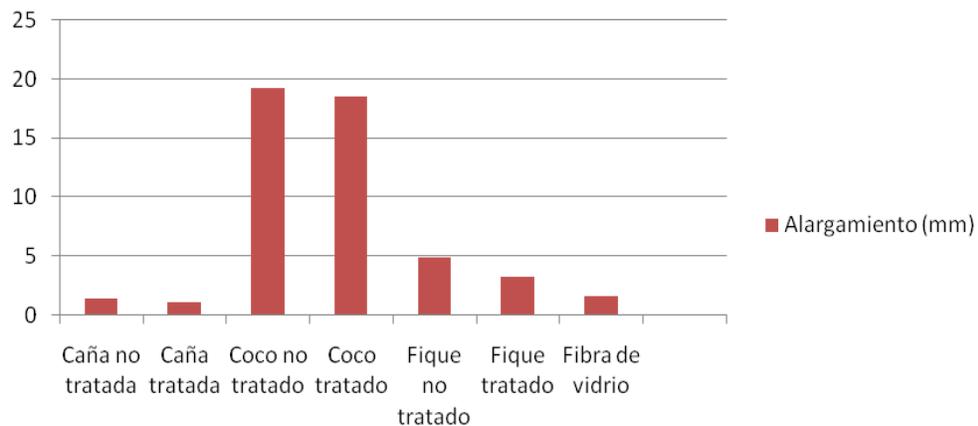


Figura 15. Alargamiento o deformación máximo de las fibras.

Fuente: El autor

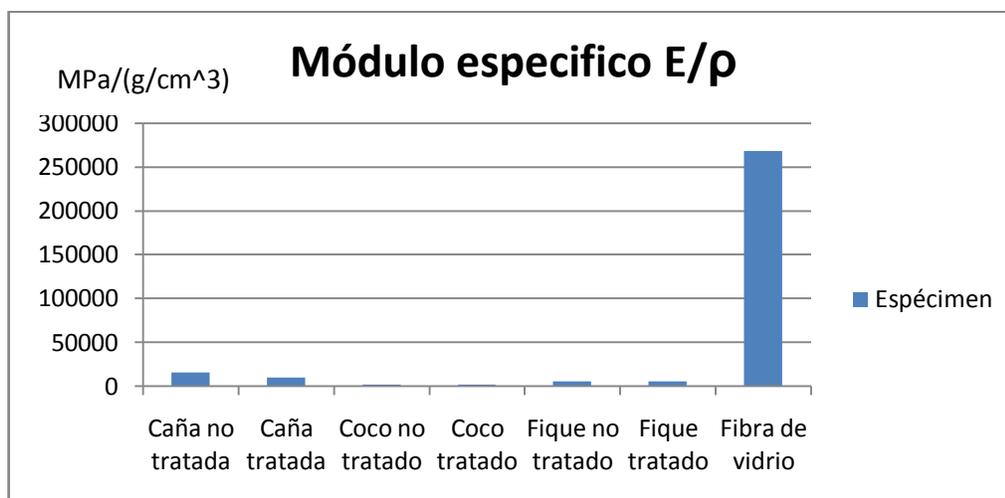


Figura 16. Módulo específico de fibras

Fuente: El autor

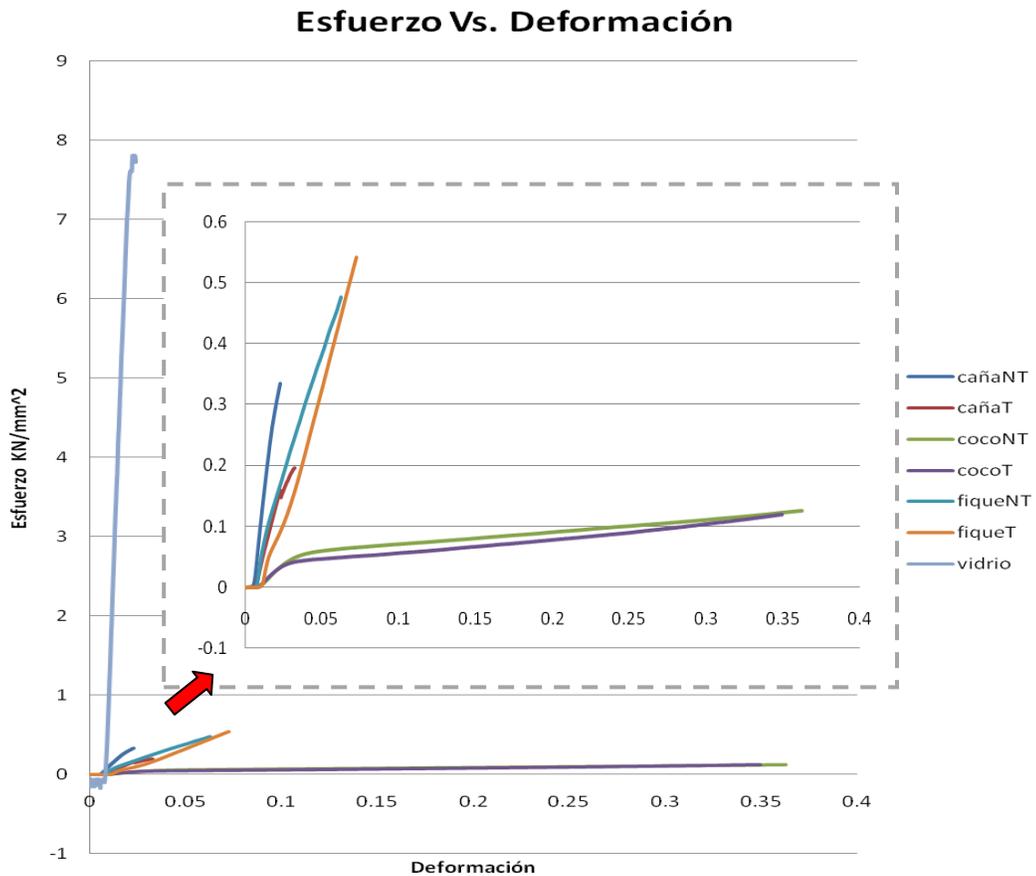


Figura 17. Esfuerzo vs. Deformación unitaria de las fibras.

Fuente: El Autor

## 6.2 ESTUDIO EN MATERIALES COMPUESTOS

Al momento de elaborar los compuestos, se ha logrado percibir la amplia dificultad para saturar principalmente los de coco y bagazo de caña con la resina. Las fibras de fique han tenido un mejor comportamiento; sin embargo, la resina se derrama y escurre sobre la superficie de trabajo y no moja las fibras como se desea. Las fibras de vidrio presentan una excelente humectación con la resina de poliéster, con lo cual se mejoran las condiciones de trabajo y se disminuyen los desperdicios de resina. En general, las fibras tratadas con NaOH han presentado una mejor

humectación que aquellas que no han sido tratadas, con excepción de las fibras de caña que no presentan una mejora evidente.

En la Figura 18, se presenta el comportamiento mecánico de los materiales compuestos, como puede observarse el mejor desempeño lo logra el material reforzado con fibra de vidrio y el peor desempeño lo tiene el material reforzado con fibras de bagazo de caña. En la Figura 19 se presenta que las fibras de coco presentan la mayor deformación de las fibras naturales. El compuesto elaborado con fibras de coco tratadas, presentó un módulo de elasticidad inferior en un 17%, mientras que el material elaborado con fibras de fique tratadas mejoró en un 13%.

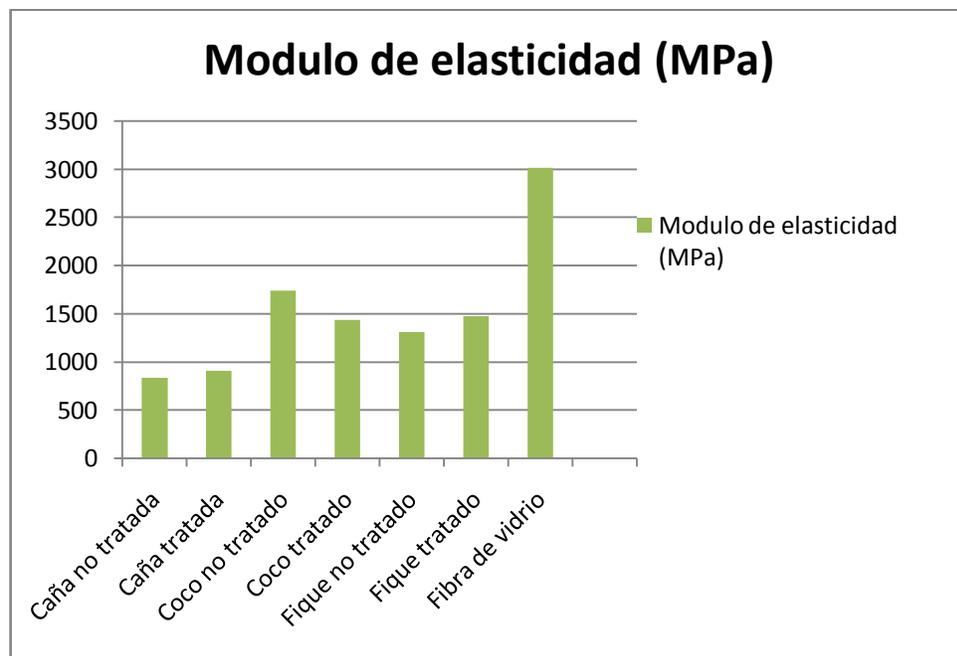


Figura 18. Módulo de elasticidad de los compuestos ensayados a tensión

Fuente: El autor

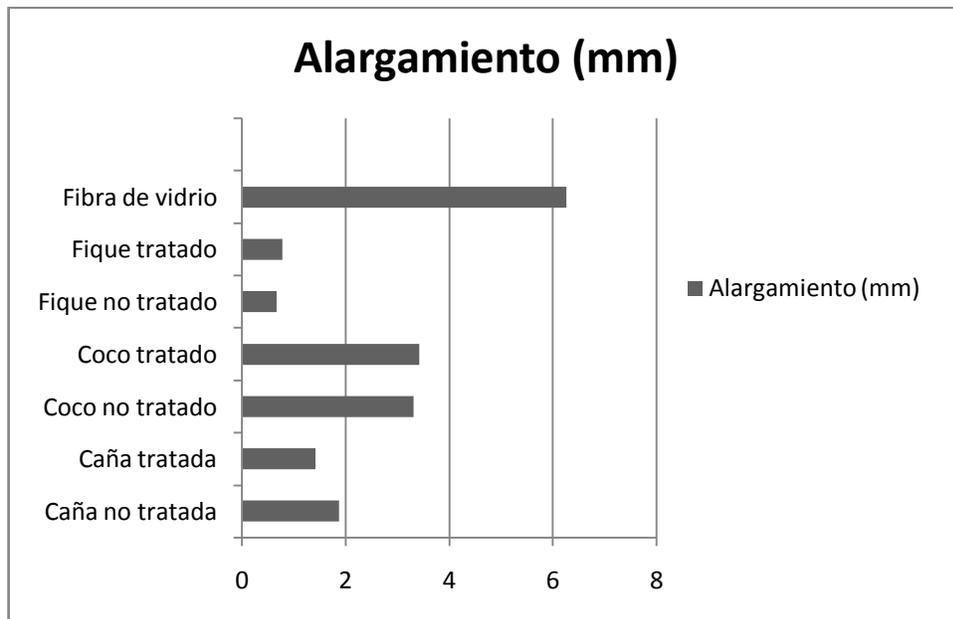


Figura 19. Alargamiento de los compuestos en el ensayo a tensión

Fuente. El autor

Es posible apreciar también, que el módulo de elasticidad resultante de ambas fibras es inferior a 1500MPa, siendo este módulo la mitad del módulo de elasticidad del compuesto elaborado con fibras de vidrio. En la Figura 20, se observa cómo las fibras sintéticas soportan casi cuatro veces más carga. Las fibras de coco tratado soportan tres veces más la carga que el compuesto elaborado con fibras no tratadas. De igual forma, el compuesto elaborado con fibras de fique tratadas soportó un 23% más de carga que la fibra no tratada, y en el mismo sentido, el compuesto elaborado con bagazo de caña tratada mejoró en un 41%.

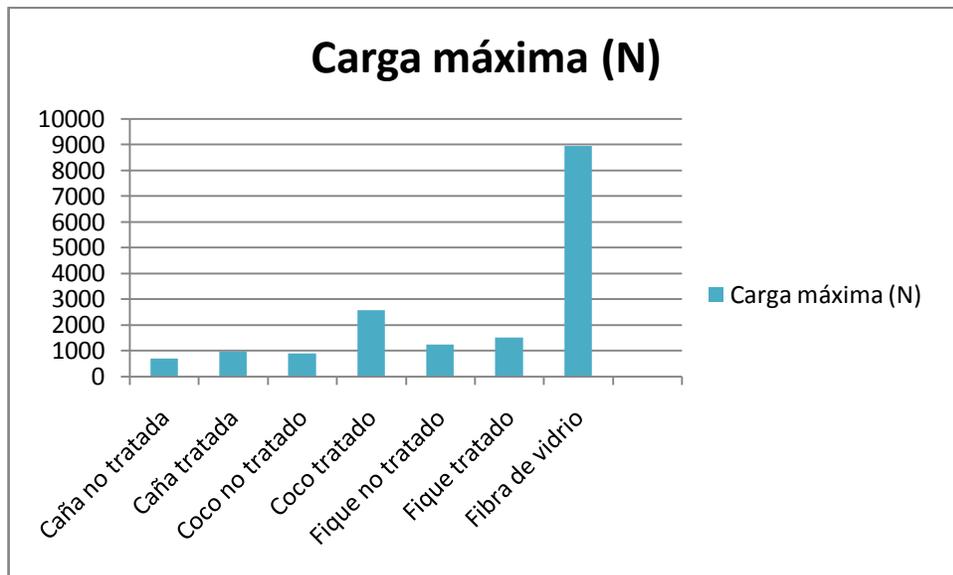


Figura 20. Carga de máximo o esfuerzo máximo soportado por el compuesto

Fuente: El autor

Una vez encontrados estos resultados, se repitieron los ensayos a tensión utilizando el molde para fabricar el compuesto con un mayor porcentaje de fibra en el compuesto. Para esta comparación se estudiaron las fibras de fique y de coco, descartando las fibras de bagazo de caña debido a su alta dificultad de procesamiento y bajo comportamiento mecánico. Al revisar el módulo de elasticidad de los compuestos saturados al 5% se puede apreciar una mejora sensible del 43.54% y 40.40% utilizando fibras de coco y fique respectivamente, tal como se aprecia en la Figura 21.

Posterior a estos ensayos, se decidió evaluar el compuesto reforzado con las fibras de fique y de coco, empleando el agente de acoplamiento. Al estudiar a tensión las probetas elaboradas con las fibras tratadas con silanos fue posible determinar que los compatibilizantes mejoraron las prestaciones mecánicas del compuesto a medida que se incorporan en mayor cantidad a las fibras; sin

embargo, el comportamiento de los compuestos elaborados con compatibilizantes no superó el comportamiento del compuesto elaborado con las fibras tratadas en NAOH sin silano (Ver Figura 21). Los materiales en los cuales se incorporaron fibras tratadas con silano disuelto en agua, presentaron una dramática disminución en su resistencia mecánica con un comportamiento inferior en 50.79% para el caso del coco y de 32.91% para el caso del fique al compararlos con los compuestos reforzados con las fibras mercerizadas. Esta disminución en las propiedades mecánicas, se debe en principio a la incorporación de agua en el compuesto lo cual es problemático para la polimerización de la resina como se había explicado en un principio. Para los demás casos en los que el silano fue disuelto en etanol, es posible que esta disminución en las prestaciones del material tenga su fundamento en la oxidación que ha presentado la resina al estar en contacto con las fibras silanizadas (Ver Figura 21), reduciendo su capacidad de transmitir la energía a la fase de refuerzo, lo cual en el peor de los casos implicó una disminución de la resistencia del compuesto en un 23.65% para el caso del coco con 2% de silanos.

En términos generales, se pudo observar que el material compuesto reforzado con fibras de coco mercerizadas, presentó el mejor de los comportamientos mecánicos obteniendo un mejor desempeño que el compuesto elaborado con fibras de fique mercerizadas en un 3%, cuando ambos fueron evaluados con un 5% de saturación en el compuesto. En esta etapa del estudio, también fueron evaluadas a tensión probetas fabricadas a partir de la matriz con el fin de realizar comparaciones con los materiales reforzados con fibras vegetales encontrando que para todos los materiales reforzados al 5%, haciendo excepción en aquellos donde el silano se trató en agua, el comportamiento mecánico fue superior en un 34.74% y un 32.79% para el refuerzo de coco y fique respectivamente (Ver Figura 21).

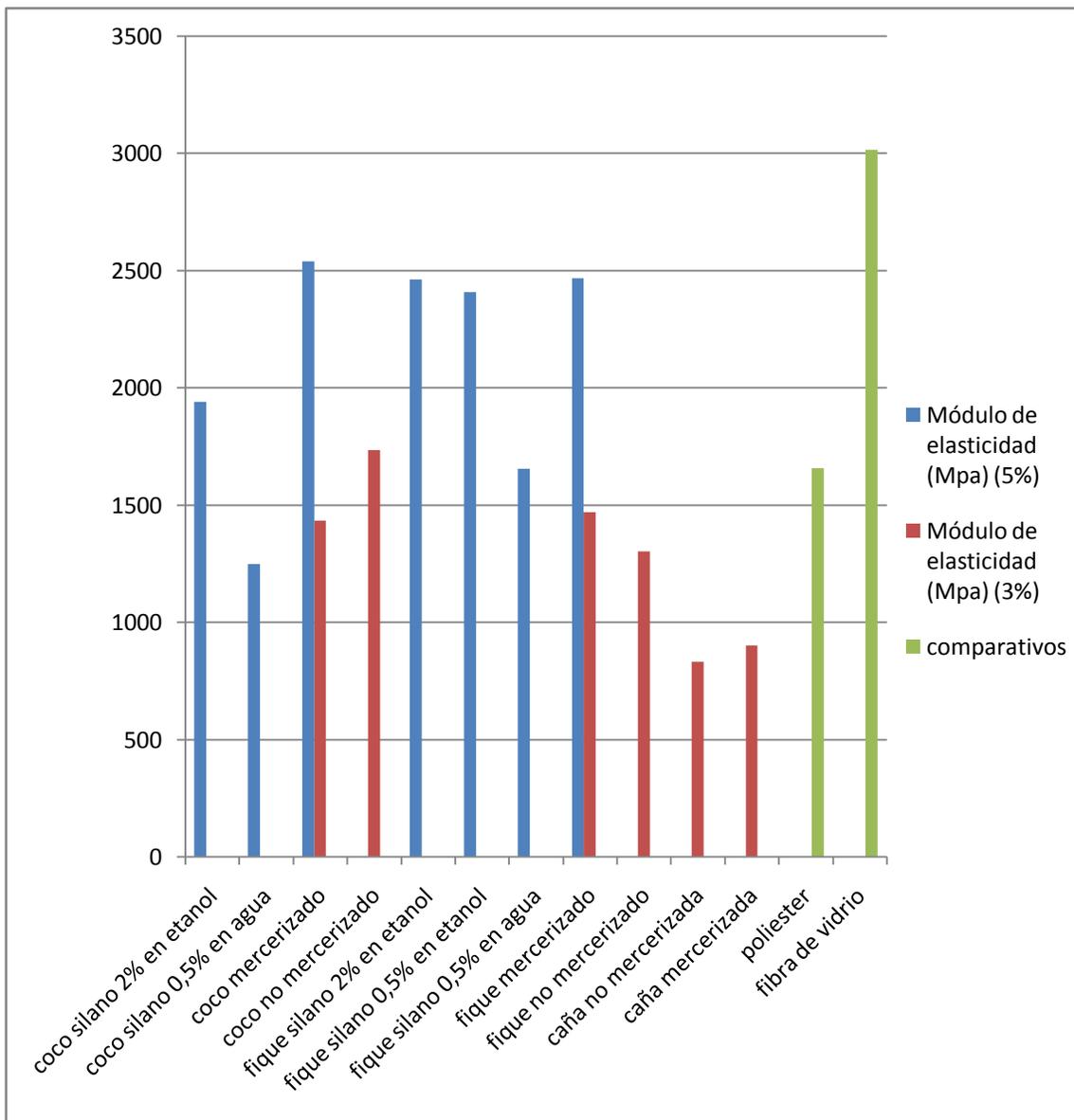


Figura 21. Módulo de elasticidad en MPa, para materiales compuestos y poliéster

Fuente: El autor

### 6.3 ESTUDIO DE ADHESIÓN CON LA MATRIZ

Luego de determinar que el compuesto con mejores prestaciones mecánicas es el reforzado con coco, se procedió a estudiar la adhesión entre la matriz y la fibra con los ensayos de desprendimiento o pull out. Empleando la Ecuación 1, (Ver sección 5.3) se calcularon los esfuerzos cortantes que se presentan en la Tabla 2 obteniendo como resultado que el esfuerzo cortante que se produce en las fibras de vidrio es superior al que se produce en las fibras de coco en un 79.26%. Sin embargo, para la longitud estudiada, ambos tipos de fibras se fracturaron en vez de desprenderse de la matriz.

Tabla 2. Resultados de ensayos de pull out

Especímenes	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Esfuerzo cortante ( $\tau$ ) (MPa)
Coco	0.306±0.068	4.925±0.176	1.067±0.121
Vidrio	0.168±0.033	3.5±2.192	5.151±0.166

Fuente: El autor

Con el ánimo de estudiar más de cerca el comportamiento de la interface entre la fibra y la matriz, las probetas ensayas de los moldes, fueron llevadas a un microscopio electrónico de barrido (SEM). En la Figura 22, se puede observar la pobre adherencia entre las dos fases, cuando las fibras no presentan ningún tratamiento superficial, en la Figura 23 es posible observar que existe desprendimiento por parte de las fibras aún después de su tratamiento alcalino, sin embargo algunas de ellas se han fracturado al mismo nivel de la matriz. Es importante observar que la dirección de las fibras es perpendicular al corte de la probeta, que comparado con la Figura 24, se aprecia una orientación diferente al sentido de aplicación de la carga, lo cual demuestra que la orientación de las

fibras es de vital importancia para lograr que el compuesto tenga una resistencia mayor. La Figura 25, presenta el corte de una fibra luego del ensayo a tensión y es apreciable que se ha quedado en la matriz, alcanzando su ruptura antes que desprenderse, evidenciando una mayor sinergia, y un logro en la compatibilidad entre la resina y la fibra.

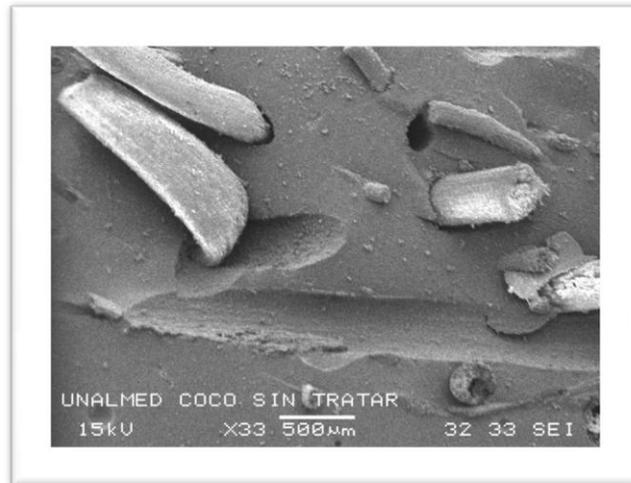


Figura 22. Superficie del compuesto de fibras de coco no tratadas

Fuente: El autor



Figura 23. Superficie del compuesto de fibras de coco mercerizadas

Fuente: El autor

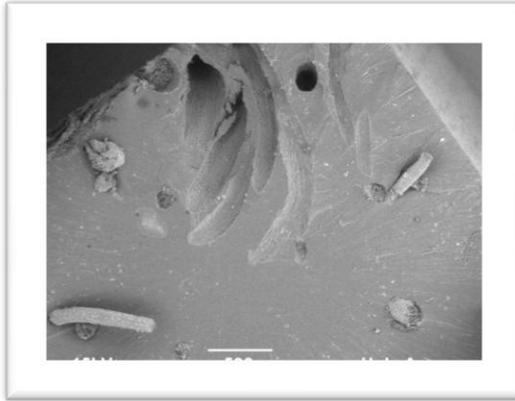


Figura 24. Compuesto de fibras de coco tratado con silanos en etanol al 2%

Fuente: El autor

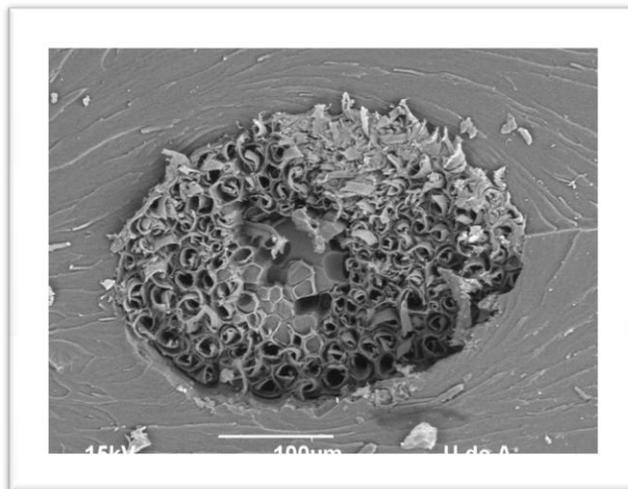


Figura 25. Fibras de coco con tratamiento alcalino

Fuente: El autor

## 7. MODELO DE COSTOS PARA LAS FIBRAS DE COCO TRATADAS

Una de las principales razones por las cuales sería interesante entrar a trabajar fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica, pasa por la necesidad de reducir los costos de producción del producto final. Como se había expresado anteriormente, existen algunas piezas, cuya vida útil en el mercado es relativamente baja como por ejemplo un maniquí, el cual se puede desechar o cambiar después de 3 o 4 años de uso, en comparación con una pieza de un vehículo, la cual está sometida a condiciones mucho más difíciles, y que por lo general pueden tener una vida útil de 15 años o más. En caso de que un producto demuestre tener unas condiciones de uso adecuadas para ser fabricado con materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de coco, la variable precio puede jugar un papel importante en la decisión del fabricante. A continuación, se expone una aproximación al posible precio de la fibra de coco, teniendo en cuenta los procesos necesarios para mejorar la sinergia con la matriz.

Tabla 3. Tabla de productos necesarios para aproximar el modelo de costos

Producto		Precio (COP)	Cantidad por producto	Unidad
Fibra de vidrio molida		6479	1	Kg
Fibra de coco separada		1250	1	Kg
Proceso de mercerización	Agua destilada	10350	3.8	Lt
	Ácido acético	14330	1.8	Lt
	NaOH	2760	500	g

Fuente: El autor

Como puede apreciarse en la Tabla 3, la diferencia en costo entre la fibra de coco separada de la concha puesta en la ciudad es bastante alta con respecto al de la fibra de vidrio; sin embargo, esta fibra tiene la lignina y la hemicelulosa en su estructura, razón por la cual no goza de una buena compatibilidad con la resina de poliéster.

Para tratar un Kg de fibra de coco en condiciones ideales de procesamiento y haciendo uso de sistemas de mezclado especiales, es posible considerar que se requieren durante el proceso de mercerización aproximadamente 500 ml de agua destilada y 10 gramos de NaOH, adicionalmente, son necesarios para el lavado posterior 250ml de agua destilada acompañados de 250ml de ácido acético. Teniendo en cuenta estas cantidades requeridas, los costos por Kg de coco mercerizado se aprecian en la Tabla 4.

Tabla 4. Costos por cantidad requerida

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad necesaria</b>	<b>Costo de la cantidad necesaria (COP)</b>
Agua destilada	750 ml	2042.76
Ácido acético	250 ml	1990.27
NaOH	10 g	55.2
Sub Total 1		4088.23
Costo por Kg de fibra de coco		1250
Sub Total 2 por Kg de fibra de coco tratada húmeda		5338.23
Costo de secado por Kg		400
Total por Kg de fibra de coco tratada y seca		5738.23

Fuente: El autor

Como puede apreciarse en la Tabla 4, el tratamiento químico representa el 69.42% del costo final de un kilogramo de coco tratado lo cual es bastante significativo.

Al comparar el precio resultante de un Kg de fibra de coco con un Kg de fibra de vidrio molida, se puede observar una diferencia del 11.43% siendo más económico el Kg de la fibra de coco. Sin embargo es importante resaltar que la gran diferencia entre un Kg de fibra coco con respecto a uno de fibra de vidrio radica principalmente en su volumen; por lo tanto, si se revisa el precio por volumen, teniendo en cuenta que la densidad de la fibra de vidrio es de  $2.6 \text{ g/cm}^3$  y la densidad final de las fibras de coco es de aproximadamente  $0.975 \text{ g/cm}^3$ , se obtiene que un kg de fibra de vidrio tiene un volumen de  $384 \text{ cm}^3$ , mientras que las fibras de coco tienen un volumen de  $1025 \text{ cm}^3$ , lo cual es una relación de 2.67 veces mas volumen con fibras de coco. Si se lleva esta relación a los costos se obtiene:

Costo por  $\text{cm}^3$  de fibra de coco: 5.60COP (pesos colombianos)

Costo por  $\text{cm}^3$  de fibra de vidrio: 16.87COP

Como se puede apreciar en los datos anteriores, la diferencia en precio considerando el volumen, tiene una variación del 66.8%, siendo considerablemente mas económica la fibra de coco. De esta forma, se corrobora que trabajar con fibras de coco puede resultar mas económico que emplear las fibras de vidrio siempre que la aplicación así lo permita.

## **8. FABRICACIÓN DE UNA PIEZA UTILIZANDO COMO FASE DE REFUERZO LA FIBRA DE COCO MERCERIZADA**

Con el fin de estudiar la posibilidad de transferir los resultados obtenidos durante la investigación a un proceso industrial, se fabricó el alerón trasero de un Renault Twingo, logrando en éste identificar los principales problemas que pueden encontrarse al momento de fabricar una pieza comercial.

El proceso inicia con la preparación del molde aplicando cera desmoldante y posteriormente una capa de gel coat que ayuda a preparar la superficie exterior para la pintura de la pieza como se aprecia en la figura 26 y 27.



Figura 26. Molde preparado con cinco capas de cera desmoldante

Fuente: El autor



Figura 27. Aplicación de gel coat utilizando brocha

Fuente: El autor

Luego de que el gel coat se seca en la pieza se puede comenzar a aplicar la fibra de coco en la cavidad del molde. Antes de comenzar a aplicar la fibra en la pieza definitiva, se realizaron ensayos cualitativos separando la fibra y distribuyéndola sobre el molde con el fin de evaluar cómo sería su asentamiento sobre la pieza. Tras revisar este elemento, se decidió que sería necesario picar la fibra finamente con el fin de mejorar la distribución de la fibra sobre la pieza y ayudar así al proceso de impregnación. Esto es posible realizarlo pero es necesario tener en cuenta que la modificación en la longitud de las fibras puede afectar el comportamiento mecánico del compuesto y que no necesariamente corresponde al encontrado en los ensayo a tensión. Una vez que la fibra fue picada, se aplicó sobre la cavidad una cantidad suficiente de resina para mojar toda la superficie y se comenzó a distribuir la fibra picada sobre la superficie de la cavidad tal como se aprecia en la Figura 28.



Figura 28. Aplicación de la fibra sobre la cavidad

Fuente: El autor

Una vez que la fibra se ha aplicado adecuadamente sobre cada una de las superficies de la cavidad, éstas se cierran para lograr unir las dos piezas y se emplea resina para sellar la unión. La pieza se deja curar durante un día completo conservando la cavidad cerrada con el fin de evitar que las contracciones de la resina afecten de manera significativa la geometría o dimensiones finales de la pieza. Posterior al día de curado, la pieza es desmoldada y se aprecian importantes excesos de resina en la unión de ambas piezas (Figura 29). Éste exceso debe ser eliminado utilizando una pulidora.



Figura 29. Pieza desmoldada con exceso de resina

Fuente: El autor

Una vez que se retira el exceso, la pieza debe pulirse y en caso de tener algún imperfecto, como burbujas, es el momento adecuado para eliminarlas. Una vez que la pieza se tiene completa, se procede a pintar y el producto está terminado.

La apariencia final de la pieza es igual al de las piezas fabricadas con refuerzos en fibra de vidrio (Figura 30). Al igual que durante la elaboración de las probetas por el método de laminado manual, la saturación del compuesto fue problemática, aunque picar la fibra fue una importante ayuda para lograr ubicar la fibra dentro de la cavidad del molde. Para fabricar la pieza se utilizó la misma cantidad de resina que se emplea para una pieza estandarizada, razón por la cual esta pieza no representa sobrecostos con respecto a la pieza reforzada con fibras de vidrio. El uso de vacío para fabricar la pieza podría beneficiar ampliamente la saturación del compuesto que para este ejercicio es de aproximadamente el 5%.



Figura 30. Alerón terminado

Fuente: El autor

## 9. CONCLUSIONES

Las fibras vegetales pueden ser utilizadas como fase de refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica en aplicaciones donde no se requieran altas prestaciones mecánicas, (valores de módulo de elasticidad inferiores a 2.500 MPa).

Es posible utilizar agentes de compatibilidad tales como silanos para mejorar la sinergia entre la matriz y el refuerzo; sin embargo, los tratamientos de fibras con silanos disueltos en etanol han generado una reacción no deseada en la matriz que puede estar disminuyendo su capacidad de transmitir energía a la fase de refuerzo, afectando las propiedades mecánicas del compuesto en general.

Las fibras tratadas con hidróxido de sodio presentaron un desempeño aceptable y mejoraron las propiedades mecánicas de la matriz al evaluarla sin refuerzo. Este hallazgo, permite demostrar que las fibras vegetales sí están actuando como refuerzo dentro del material compuesto al comparar los módulos de elasticidad de las probetas ensayadas.

Los compuestos resultantes al utilizar fibras de coco y fique tienen un alto valor estético y pueden ser empleados como materiales en productos de bajos requerimientos mecánicos y de necesidades estéticas específicas; no obstante, este valor estético se ha perdido cuando las fibras se tratan con silanos en etanol debido al oscurecimiento de la matriz.

Los compuestos elaborados con fibras de bagazo de caña no presentaron un comportamiento mecánico bueno, en comparación con aquellos compuestos elaborados con las fibras de fique y coco. Adicionalmente, el bagazo de caña tiene

muchas aplicaciones industriales, lo cual disminuye su fácil consecución como residuo.

Vale la pena realizar estudios con fibras de coco en matrices de comportamiento flexible dadas las condiciones de la fibra a tensión, ya que la deformación que presentan puede ser una cualidad en compuestos que requieran de estas características.

La saturación de los compuestos elaborados con las fibras vegetales fue bastante complejo, razón por la cual vale la pena realizar estudios incrementando el porcentaje de fibras en el material compuesto total. Se hicieron esfuerzos por llevar la saturación a niveles entre el 10 y el 40%, sin embargo la baja densidad de las fibras sólo permitió llevar los compuestos hasta un 10% asistido por vacío. La saturación de este tipo de compuestos no necesariamente debe compararse con los de fibras de vidrio en peso, pues bien la diferencia en el volumen es sensible y la saturación por medios manuales puede resultar muy compleja.

El uso de sistemas de vacío para la elaboración de materiales compuestos puede ser una buena herramienta para lograr incrementar la saturación del material; es importante tener en cuenta que las altas presiones pueden extraer el estireno de la resina, disminuyendo su capacidad de polimerizar.

El uso de fibras de coco como fase de refuerzo puede resultar ser una buena estrategia en costos gracias a la menor densidad de las fibras y la diferencia hallada en el costo en función del volumen.

Las fibras de vidrio presentan una mayor adhesión a la matriz de poliéster; sin embargo, para los ensayos realizados de desprendimiento, ninguno de los especímenes empleados se extrajo de la matriz, lo cual es un buen indicio de la sinergia que tiene la fibra de coco con la resina.

Es posible realizar productos cuya resistencia mecánica esté dentro de los patrones encontrados, para mejorar la manufacturabilidad de las piezas, se recomienda picar finamente las fibras para ayudar a que éstas se distribuyan homogéneamente por la superficie del laminado.

La orientación de las fibras naturales es de vital importancia en las propiedades mecánicas del compuesto, pues dependiendo de la dirección de la carga éstas trabajan de una mejor forma y mantendrán una mayor sinergia con la matriz reduciendo los desprendimientos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] GROOVER, Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna Materiales, procesos y sistemas. México : Ed. Prentice Hall, 1997
- [2]. DIPA, Ray y Sarkar, B. K.. Characterization of Alkali-Treated Jute Fibers for Physical and Mechanical Properties. Calcutta.s.n., 2000.
- [3] TAPIA, Clotario, y otros. Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Compuestos y como Biomasa. En: Revista Tecnológica ESPOL. Vol. 19, N 1 (Octubre 2006). P113-120 ISSN: 0257-1749.
- [4] GAY, Daniel, HOA, Suong V., TSAI, Stephen W. Composite materials design and applications. Washington D.C. : CRC PRESS, 2003. p. 22-25
- [5] VINCENT VELA, María Cinta, ÁLVAREZ BLANCO, Silvia. ZARAGOZA CARBONELL, José Luis. Principales Polímeros Comerciales. Valencia : Editorial de la UPV. s.f. p. 49-51
- [6] QUESADA SOLÍS, Karol, y otros. Utilización de las Fibras del Rastrojo de Piña como Material de Refuerzo en Resinas de Poliester. En: Revista Iberoamericana de Polímeros. Vol. 6, N 2 (Junio de 2005), p157-179
- [7] FORSDYKE, Ken L. y STARR, Trevol F. Thermoset Resins Market Report. 2002
- [8] PANIAGUA, Marco, OSSA, Alexander y RUIZ, Gladys. Características de adhesión entre fibras de queratina y poliester insaturado en: REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA U.DE .A Vol N° 46. p. 15-23. Diciembre de 2008.
- [9] NORMA ASTM C1557-03 Standar Test Method for Tensile Strenght and Young's Modulus of Fibers.
- [10] S. ZHANDAROV, E. Mäder. "Characterization of fiber/matrix interface strength". *Composites Science and Technolgy*. Vol 65.2005. p 149-1606.