Desarrollo de un material compuesto a base de Guadua Angustifolia para aplicaciones estructurales

Harry Yasir Otálora Ortega

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C.

2016

Desarrollo de un material compuesto a partir de Guadua Angustifolia para aplicaciones estructurales

Harry Yasir Otálora Ortega

Trabajo de grado para optar por el título de

Magister en Ingeniería Mecánica

Asesor:

Luis Mario Mateus Sandoval

Co-Asesor:

Juan Pablo Casas Rodríguez

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C.

2016

Contenido

1 Introducción 1

2 Objetivos 6

2.1.1 Objetivo General 6

3 Marco Teórico 7

3.1 Estructura de fibras naturales 7

3.2 Tratamiento Superficial de las fibras (Remoción de Lignina y Hemicelulosa) 9

3.3 Extracción de fibras 12

3.4 Selección de matriz 13

3.5 Método de manufactura 15

4 Metodología 18

4.1 Remoción de estructuras de cementación 18

4.2 Extracción de fibras 20

4.3 Selección de la matriz 21

4.4 Desarrollo del material compuesto y caracterización mecánica 22

4.4.1 Caracterización Mecánica del material compuesto 23

4.5 Método para manufacturar tubería estructural con el compuesto de G.A. 24

5 Resultados y Discusión 26

5.1 Remoción de estructuras de cementación 26

5.2 Extracción de fibras 28

5.3 Selección de la matriz 31

5.4 Desarrollo del material compuesto..... 32

5.4.1 Manufactura del compuesto..... 32

5.4.2 Caracterización mecánica del compuesto..... 37

5.5 Método para la Manufactura de tubería estructural con el compuesto de G.A. 44

5.5.1 Método de manufactura de tubería 44

5.5.2 Caracterización mecánica de la tubería y comparación con cañas de G.A. 46

6 Conclusiones..... 52

7 Recomendaciones y Trabajo Futuro..... 53

8 Bibliografía 54

1 Introducción

Históricamente el desarrollo estructural busca generar marcos lo suficientemente fuertes de manera que soporten las cargas de diseño de un sistema en cuestión. En términos globales, entre mayores sean las propiedades mecánicas del material podrá resistir cargas más altas; sin embargo, las propiedades mecánicas no son la única variable que juega dentro del sistema, ya que el peso de la estructura es un factor muy importante. El uso de materiales ligeros y de alto desempeño mecánico resulta atractivo en el desarrollo de toda clase de estructuras tanto móviles como estáticas, por ejemplo aviones y edificios respectivamente. Por este motivo desde hace muchos se han desarrollado estructuras en madera ya que presentan dos características fundamentales para este tipo de aplicación: la primera es su buen desempeño mecánico, y la segunda es su forma alargada casi prismática de la cual se pueden conformar perfiles que permiten conformar la estructura. En tiempos actuales se han utilizado algunos materiales de origen sintético tal como aleaciones de aluminio, acero, o materiales compuestos artificiales como la fibra de carbono que representa un material compuesto de alta resistencia y baja densidad.

Estos materiales convencionales presentan una amenaza fuerte al medio ambiente en términos de la huella de carbono asociada a su obtención, disposición y transformación. Por ejemplo para obtener 1 tonelada bruta de acero se requieren 33 800 MJ y 230 000 MJ para aleaciones de aluminio[1]. Esta energía se genera en gran medida gracias a la quema de combustibles fósiles, tales como el petróleo y el carbón. Aun cuando los metales son reciclables, los materiales compuestos como la fibra de carbono embebida en resinas termoestables no lo son. Otra consideración importante a tener en cuenta es que los materiales convencionales son de difícil acceso a la industria colombiana, ya que no todos se producen a nivel nacional [2]. Los anteriores hechos abren la

oportunidad de investigar en alternativas que ataquen esta problemática de modo que se logre una solución con recursos locales y con un desempeño mecánico adecuado.

Un material natural que presenta buenas propiedades estructurales y que a su vez es de obtención local es la Guadua Angustifolia la cual es utilizada ampliamente en Colombia como elemento estructural de manera artesanal, ver Ilustración 1 Izquierda. Esta variedad del bambú es una caña monocotiledónea que crece en forma de tubos cortos unidos longitudinalmente generando dos zonas claras, la zona internodal y la zona nodal la cual es la unión entre dos tubos como se muestra en la Ilustración 1 Derecha.

Ilustración 1.Izquierda: Puente de Guadua Bogotá Colombia[3]. Derecha: Corte longitudinal de caña de G.A.[4].

La Guadua Angustifolia (G.A) es una especie de bambú catalogado como una *Gramínea* que desarrolla estructuras leñosas. Esta clasificación incluye a la guadua en la misma familia que el pasto común [5]. De hecho una de las diferencias evolutivas de estas especies es que la guadua desarrolló órganos especializados en la producción de lignina y hemicelulosa [6]. Estos biopolímeros son los responsables de la existencia de la madera en el mundo, lo que en términos generales permite a las plantas crecer de manera vertical dándoles una ventaja evolutiva para la captación de luz solar con respecto a plantas no leñosas [7]. Una característica que sí comparten la G.A. y el pasto es la alta rata de crecimiento. Existen datos de variedades de guadua que llega a crecer 1 metro al día. Esta alta condición de crecimiento exige un elevado consumo de dióxido de carbono ambiental, fijándolo

en forma de azúcares, celulosa, lignina, etc.[8]. El cultivo extensivo de esta planta disminuye la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera puesto que lo fija en su estructura vegetal. Estos antecedentes presentan a la G.A. como una alternativa sostenible, de acceso local, amigable con el medio ambiente.

Una investigación preliminar desarrollada en la universidad de los Andes [9], buscaba determinar entre otras cosas, las propiedades mecánicas de la guadua colombiana *(Guadua Angustifolia, G.A.)*, puesto que se pueden lograr desarrollos estructurales aprovechando la morfología alargada de la planta, tal como lo han hecho algunas empresas de manera artesanal usando diferentes tipos de uniones como se puede apreciar en la Ilustración 2.

Ilustración 2. Izquierda. Marco de Panda Bikes desarrollo Inglés [10] Derecha. Marco de Gallardo Bikes desarrollo colombiano [11]

De este estudio se pudo concluir que el bambú presenta un potencial importante para sustituir materiales tradicionales ver Ilustración 3 izquierda, en este caso se estudió la resistencia específica de diferentes materiales estructurales.

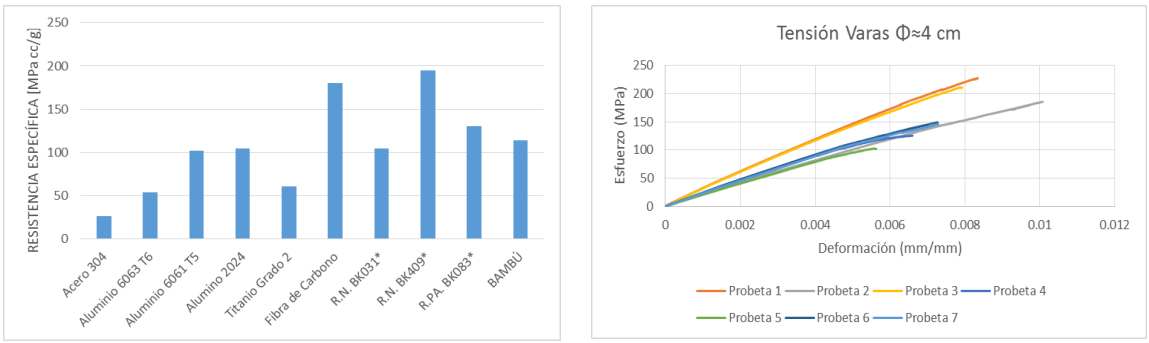


Ilustración 3.Izquierda: Figura de mérito Resistencia específica a la tensión de diferentes materiales [9]. Derecha: Pruebas de tensión de varas de GA [9]

La resistencia específica se calcula como la resistencia por unidad de densidad del material. En otras palabras este valor indica cual es el material que más resiste y que a su vez es más ligero, que es una característica idónea para construir estructuras. Como se puede ver el bambú es una opción adecuada ya que se encuentra por encima de materiales tradicionales como el acero, aluminio y titanio. Sin embargo este material natural no es un material determinístico. Esto quiere decir que no se puede desarrollar un modelo matemático que describa su comportamiento de manera acertada como se puede observar con más claridad en la Ilustración 3 derecha. En este caso se fallaron probetas de 5mm de ancho por 10 cm de largo con un espesor cercano a los 5 mm de cañas de G.A. en tensión, de manera que se pudiera determinar el esfuerzo de ruptura y el módulo de elasticidad del material. Este ensayo presenta una variabilidad considerable tanto en el esfuerzo de ruptura como en el módulo de elasticidad lo cual no es deseable en un material estructural de ingeniería, ya que presenta problemas serios durante la fase de diseño estructural. Además de su comportamiento impredecible, las cañas crecen con discontinuidades geométricas y en algunos casos ligeramente curvas.

Este panorama presenta problemas de ingeniería relacionado con la opción de usar la G.A. como material estructural, renovable y amigable con el medio ambiente. Por lo tanto se plantea modificar su comportamiento aleatorio y tratar de reducir la variación natural de sus propiedades. Sin embargo solucionar este problema no es suficiente, ya que aun cuando se pueda obtener un material que cumpla las características mencionadas anteriormente es necesario desarrollar un método de manufactura que permita conformar perfiles para la posterior construcción de estructuras.

Con base en lo anterior se propone desarrollar un material compuesto que sea reciclable, que tenga propiedades comparables con las de las cañas de G.A. de baja densidad y que sea una alternativa atractiva en la construcción de estructuras, se entiende como “material compuesto” un sistema

multifase obtenido a partir de la mezcla artificial de diferentes materiales con el fin de lograr propiedades que los componentes individuales pueden desarrollar [12]. Teniendo en cuenta esto es muy común embeber fibras de alta resistencia con matrices poliméricas de modo que se aprovechan las propiedades mecánicas de las fibras y se pueden conformar en una geometría específica gracias a la matriz.

En estudios anteriores [6, 13, 14] se demuestra que la G.A. tiene potencial para reforzar matrices poliméricas y también describen la manera correcta de extruir compuestos de fibra corta. El proceso de extrusión se apoya en la extracción de fibras por molienda de las cañas de G.A. [5, 15]. Este proceso de extracción disminuye la longitud de la fibra lo cual permite acoplarla a la matriz por medio de la extrusión, sin embargo el desempeño mecánico del material compuesto depende de la longitud de la fibras de refuerzo [16, 17]. Por otro lado se han desarrollado compuestos de hilo tejido obtenido a partir de bambú mosso (*Phyllostachys edulis)*, las fibras de bambú se extraen por medio de la explosión de vapor y posterior hilado de las fibras de forma similar como se hace con la lana [13, 17]. Este proceso facilita el uso de la planta para conformar diferentes materiales compuestos ya que al tener la tela se puede impregnar con resinas líquidas y moldear el producto. Existen algunos autores que consideran que las fibras de G.A. no pueden ser tejidas [18], ya que esta planta posee unas fuertes estructuras de cementación por lo tanto son muy rígidas para esta aplicación. Con base en lo anterior se propone investigar diferentes métodos que permitan el aprovechamiento de la G.A. para conformar el material compuesto. En esta investigación se presentará el método utilizado para constituir tubería a partir del material compuesto desarrollado.

2 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Proponer una metodología para el desarrollo de tubería estructural a partir de un material compuesto a base de Guadua Angustifolia.

Objetivos Específicos

- Aplicar una metodología que permita remover las estructuras de cementación de la madera
- Extraer las fibras de celulosa de las cañas de Guadua Angustifolia
- Seleccionar una matriz que permita cumplir los criterios de diseño
- Desarrollar un material compuesto y caracterizarlo mecánicamente
- Proponer una metodología para construir tubería estructural, caracterizarla y compararla con cañas de Guadua Angustifolia.

3 Marco Teórico

Los materiales compuestos resultan una opción bastante atractiva para solucionar el problema de reducir la variación natural de las propiedades de la guadua. El desarrollo de biocompuestos reforzados con fibras vegetales tiene algunas características en común sin importar la naturaleza de los sustratos. Estas características atañen a la estructura de la fibra, la naturaleza y compatibilidad de la matriz con el refuerzo y finalmente el método de manufactura. Dentro de esta sección se explican los detalles que se tienen que tener en cuenta para el desarrollo del material compuesto. Se entiende como materiales biocompuestos aquellos que al menos uno de sus sustratos es un material natural [19], estas substancias pueden ser de origen animal o vegetal, según el caso. Ya que esta investigación tiene como refuerzo fibras de G.A. es necesario describir cual es la estructura de las fibras vegetales en general de manera que se pueden desarrollar estrategias que faciliten la extracción de fibras y la remoción de estructuras de cementación, además de esto se explican las características relevantes dentro del proceso de selección de la matriz y se exponen algunas generalidades de los métodos de manufactura.

3.1 Estructura de fibras naturales

En términos generales la madera se compone de tres sustancias: celulosa, lignina y hemicelulosa, además de esto se compone en mucha menor medida de resinas, ceras y grasas [20]. La Ilustración 4 muestra un esquema en el cual se pueden ver las tres sustancias y como se relacionan entre ellas. Se puede observar unos cilindros de celulosa los cuales están compuestos por micro fibrillas de celulosa que a su vez se aglomeran a través de las cadenas de biopolímero correspondientes a la lignina y hemicelulosa; estas sustancias son conocidas como estructuras de cementación.

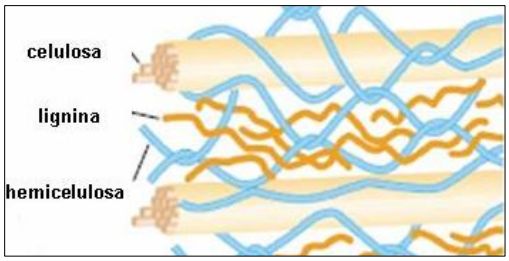


Ilustración 4. Composición de la madera [21]

Del mismo modo la estructura de la G.A. consiste en la disposición de estas 3 sustancias tal como se observa en la Ilustración 4. Se puede decir que esta planta tiene una estructura fractal, la cual consiste en la repetición de un patrón a medida que se aumenta la escala de magnificación. Básicamente se trata de la agrupación de micro fibrillas por medio de las estructuras de cementación (hemicelulosa y lignina) en grupos más grandes y largos a los cuales se denominan fibras. Estas fibras, se alinean longitudinalmente a lo largo de la sección internodal como se puede ver en la Ilustración 5.

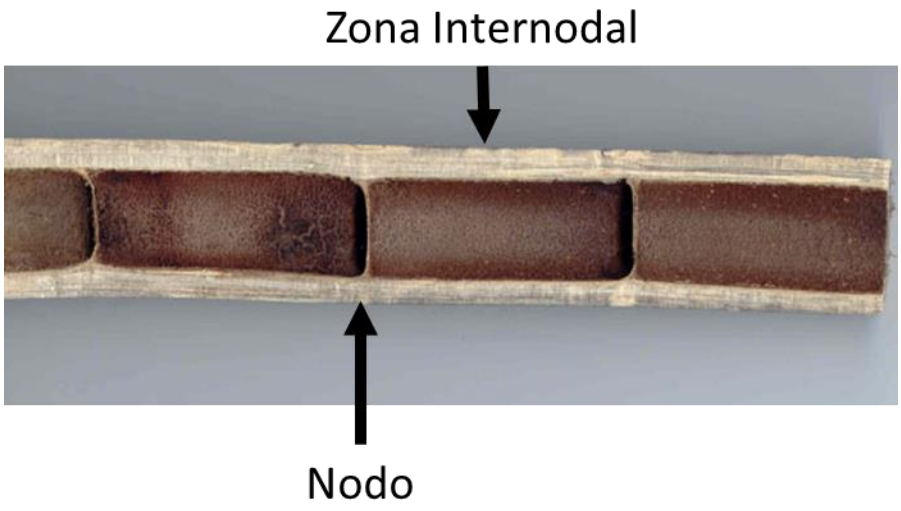


Ilustración 5. Corte longitudinal del bambú [4]

Por otro lado si se realiza un corte transversal en una caña de guadua se puede ver la manera en que se aglomeran las fibras como se muestra en la Ilustración 6. Entre otras cosas se observa el gradiente de densidad de la zona interior hacia la zona exterior de las cañas el cual se presenta por

la gran presencia de estructuras de transporte de agua de la raíz a las ramas elevadas. La planta almacena agua en cada sección internodal, y por medio de estas estructuras tubulares la transporta hacia las hojas más altas [22].

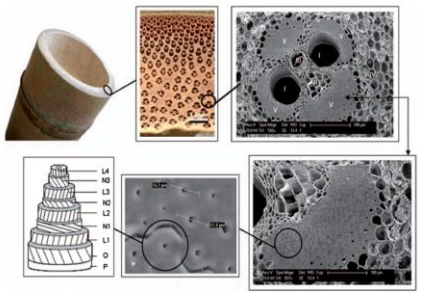


Ilustración 6. Microestructura del G.A. [13]

Estas estructuras tubulares de transporte de agua se construyen por medio de aglomeraciones de fibras de celulosa alineadas longitudinalmente. Una fibra fue extraída mecánicamente y observada bajo el SEM, de manera que se pueda entender como está estructurada [13], como se muestra en la Ilustración 7. Se observa cómo se repite el proceso de alineación de micro fibrillas de manera longitudinal, y son aglomeradas entre ellas por medio de los biopolímeros de cementación.

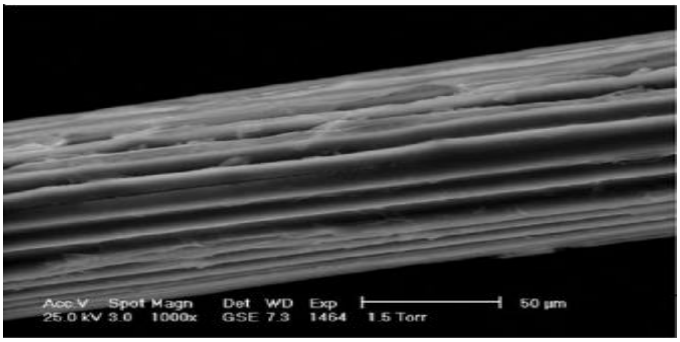


Ilustración 7. SEM de una fibra de Guadua Angustifolia [13]

3.2 Tratamiento Superficial de las fibras (Remoción de Lignina y Hemicelulosa)

Ya que se entiende como está estructurada la madera de G.A. se puede hacer una analogía a un material compuesto, ya que se embeben las fibras de celulosa en los polímeros de cementación. Usualmente es necesario remover las estructuras de cementación de manera que se promueva la transferencia de esfuerzos de fibra a fibra a través de la matriz [23]. En otras palabras, se puede

decir que estos polímeros de cementación inhiben la adhesión entre las fibras y la resina del material compuesto artificial motivo por el cual deben ser removidos [13, 23].

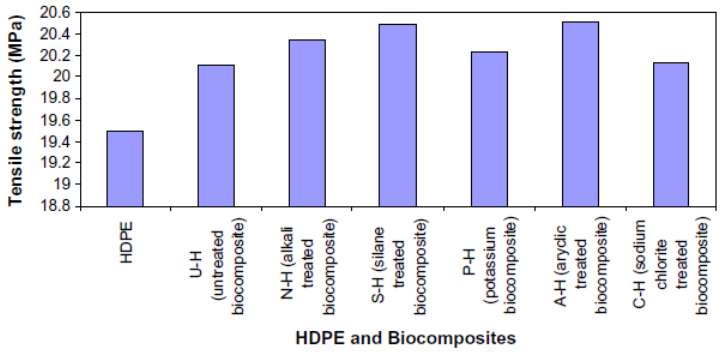


Ilustración 8. Resistencia a la tensión de un compuesto de polietileno de alta densidad y reforzado con lino [24].

En la Ilustración 8 se puede ver con claridad como siempre que se realiza un ataque químico a las fibras de lino se aumenta la resistencia del material compuesto desarrollado en comparación del material compuesto que no tiene ningún tratamiento. Lo anterior se debe al efecto superficial sobre las fibras que tienen este tipo de tratamientos químicos, ya que al disolver las estructuras de cementación, grasas y ceras la superficie queda expuesta para generar enlaces de adhesión con la matriz [23], por el contrario si no son removidas estas estructuras se presentan problemas de calidad de adherencia entre las fibras y la matriz [25]. La Ilustración 9 muestra los resultados del trabajo de Rokbi et al, [23] donde se puede ver el efecto de variar las condiciones del tratamiento alcalino en las propiedades del material compuesto desarrollado en dicha investigación para la cual se reforzó vinil éster con fibras de bambú mosso.

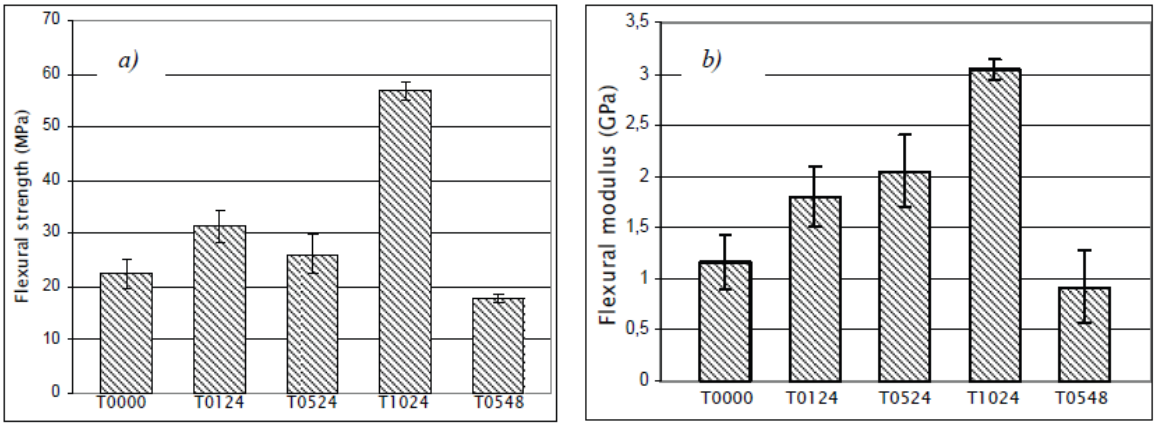


Ilustración 9. Efecto de tratamiento alcalino en fibras de bambú mosso. A) resistencia del compuesto. B) Modulo de Flexión del compuesto [23]

En el trabajo de Rokbi se realiza un experimento que radica en realizar un tratamiento con una solución alcalina a las fibras en un tiempo determinado. Después del tratamiento las fibras deben ser neutralizadas con ácido clorhídrico hasta que el pH de la solución sea neutro. En este experimento se variaron 2 factores, el primero fue la concentración de hidróxido de sodio, y el segundo fue el tiempo que se mantuvieron sumergidas las fibras. Con esto en mente el autor desarrolló una nomenclatura alfa numérica para reconocer cada uno de los procesos. El primer carácter tiene la letra T hace referencia a tratamiento. Los caracteres 2 y 3 son números que hacen referencia a la concentración de hidróxido de sodio en la solución alcalina. Finalmente los caracteres 4 y 5 hacen referencia al número de horas que pasaron sumergidas las fibras en la solución alcalina. Por ejemplo, T1024 quiere decir que el tratamiento fue en NaOH al 10% por 24 horas. Así mismo este experimento contó con un control negativo el cual no tiene ningún tipo de tratamiento y se denominó T0000.

Dentro de este estudio se puede ver que el tratamiento químico tiene un efecto considerable tanto en la resistencia del compuesto como en el módulo elástico del material. Se puede ver que hay una tendencia a aumentar la resistencia global del compuesto en la medida en que se aplica la cantidad precisa de NaOH en el tiempo correcto. Por otro lado se puede inferir que el tratamiento alcalino

aumenta la rigidez de las fibras, ya que el módulo del compuesto es un promedio ponderado de las propiedades de los sustratos [23].

Ahora que se ve claramente que los tratamientos químicos pueden alterar las propiedades del compuesto se entiende que estos buscan disolver las estructuras de cementación de manera que la superficie de celulosa quede expuesta y así hacer una adhesión adecuada entre la matriz y las fibras [25]. En fibras lignocelulósicas, la celulosa es el componente principal. La unidad elemental de la macromolécula de celulosa es el anhidro-d-glucosa, la cual contiene 3 hidroxilos (-OH). Estos grupos hidroxilos forman uniones intermoleculares. La adhesión interna puede ser mejorada a partir de una modificación a la topología superficial de las fibras por medio de un adecuado tratamiento o seleccionado los componentes del sistema de adhesión [26]. En la medida que se presente un ambiente adecuado para remover esos hidroxilos de la superficie de la macromolécula se puede generar una superficie adecuada para lograr un sistema de adhesión pertinente [27].

3.3 Extracción de fibras

Existen diversas técnicas que permiten extraer las fibras de G.A., estos métodos pueden ser tanto de naturaleza química como mecánica por medio de los cuales se rompen las estructuras de cementación de modo que las fibras pueden ser extraídas. Diversas investigaciones han sido realizadas en la Universidad de los Andes para desarrollar compuestos de fibra corta [14, 28]. Sin embargo el reto de esta investigación es desarrollar un compuesto de fibra larga. Este requerimiento descarta algunas técnicas de extracción de fibras, las cuales maceran en cierta medida las fibras tales como la molienda o la explosión de vapor por ejemplo, estos tratamientos comprometen la longitud de las fibras extraídas y se nombran a continuación: Aplastamiento, el cual se enfoca en comprimir sistemáticamente varas de guadua hasta lograr extraer fibras [15]. Molienda, la cual consiste en ingresar cañas de bambú a un molino que se encarga de seccionar los trozos de guadua hasta que sean tan pequeños como para pasar por la rejilla de selección [15]. Y la explosión de vapor

la cual consiste en presurizar un sistema por medio de vapor de agua y luego de alcanzar algunas condiciones de tiempo, temperatura y presión se descomprime el sistema de manera abrupta generando así por medio del choque de presiones la desintegración de la madera [15]. Como es de imaginarse, estos métodos atentan contra la integridad de las fibras de modo que se obtienen longitudes de fibra muy cortas, lo cual va en contravía del requerimiento de longitud. Otro método que permite obtener fibras sin afectar su longitud es el método de rolado el cual consiste en laminar sistemáticamente trozos de madera húmedos de manera que a través del trabajo mecánico de compresión eventualmente se nuclean grietas que son propagadas en el sentido de las fibras a medida que la madera avanza por los rodillos. Teniendo en cuenta que la guadua presenta un alto contenido de lignina y hemicelulosa, es tremendamente resistente a tratamientos mecánicos. Razón por la cual se puede usar un método combinado de extracción de fibras, en el cual se aproveche del tratamiento alcalino que disuelve las estructuras de cementación y por medio del rolado se separan las fibras [15] ya que se presenta un debilitamiento de las estructuras de cementación luego del proceso alcalino es posible extraer las fibras aprovechando la humedad como lubricante para promover el desplazamiento relativo entre las fibras [29].

3.4 Selección de matriz

La adecuada selección de matriz resulta fundamental para el desarrollo del material compuesto. Una característica crítica para la conformación de materiales compuestos es la adhesión entre la matriz y el refuerzo [12, 13, 23, 29], la cual depende de la compatibilidad química entre los sustratos. Dicha compatibilidad hace referencia a la polaridad de las sustancias [12]. La polaridad química es una característica de las moléculas que representa el alejamiento entre las cargas eléctricas en la misma unidad [30]. Esta propiedad se encuentra profundamente conexa con otras propiedades como la solubilidad, el punto de fusión, el punto de ebullición, las fuerzas intermoleculares, etc. [31]. La polaridad de una molécula se debe entender como la cantidad de enlaces polares y la

estructura molecular de compuesto químico. Para ello se calcula un parámetro conocido como *Momento dipolar eléctrico*, el cual es una magnitud vectorial. Donde su magnitud es el resultado de la carga *q* del enlace multiplicado por la distancia que separa *d.* La dirección del vector va de la carga negativa a la carga positiva. La polaridad es la suma vectorial de los momentos dipolares de los enlaces. En la medida que la suma sea nula o no, se puede determinar la naturaleza polar o apolar respectivamente [31].

Una consecuencia de esta propiedad resulta ser la hidrofilia. El agua es una molécula fuertemente polar [32], en la eventualidad de unir dos sustancias no semejantes, es decir polar y apolar, se presenta una repulsión entre ellas; en otras palabras, serían sustancias no miscibles. A este comportamiento se le conoce como hidrofobia. De otro lado, si las sustancias son semejantes (polar y polar) se presenta una disolución como ocurre con la sal común y el agua. A este comportamiento se le conoce como hidrofilia [32].

La estructura internodal del bambú es un reservorio de agua que funciona como almacenamiento y tiene estructuras circundantes que la transportan hacia órganos elevados [7]. La presencia de agua como substancia vital para el desarrollo de la planta exige que las estructuras de transporte (ver Ilustración 6) tengan una naturaleza polar, de modo que el agua pueda ser absorbida por las estructuras de celulosa, hemicelulosa y lignina y pueda ser transportada a zonas elevadas [22]. Esta característica restringe la población de polímeros a aquellos que sean polares. La polaridad de los polímeros permite asegurar una compatibilidad química entre el refuerzo y la matriz de modo que se desarrollen mecanismos de adhesión entre ambos sustratos.

Otra característica que hay que tener en cuenta es la temperatura de procesamiento del polímero, ya que las fibras de refuerzo se degradan a una temperatura de 250°C tal como se puede ver en la curva termogravimétrica de las fibras de bambú mostrada en la Ilustración 10 [14]. Esta curva indica que en la medida en que se supere el límite de 250°C las fibras se empiezan a degradar

térmicamente. Por lo tanto el polímero seleccionado debe tener una temperatura de trabajo inferior a 250°C, ser una resina polar como se ha dicho anteriormente y además debe ser una resina termoplástica puesto que se desea que el material compuesto desarrollado sea reciclable. Estas características son a groso modo las que determinan la selección de la resina para el material compuesto.

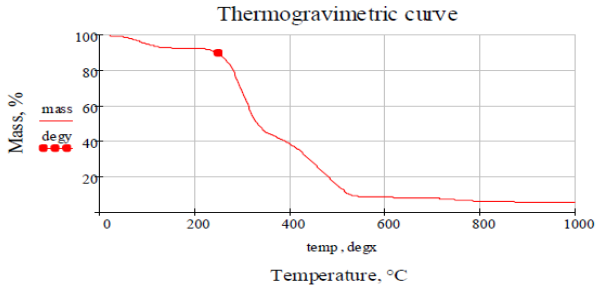


Ilustración 10. TGA de fibras de Guadua Angustifolia [14]

3.5 Método de manufactura

Existen diversas técnicas que permiten manufacturar materiales compuestos con resinas termoplásticas tales como la extrusión o el moldeo por compresión [16, 18]; cabe resaltar que, el moldeo por compresión no presenta problemas con la longitud de la fibra, mientras que la extrusión sí. Por tal motivo se aplica el moldeo como método de manufactura de tablas o láminas de material compuesto con resinas termoplásticas, para este proceso existen diferentes variables a tener en cuenta para la fabricación de este tipo de productos. La primera fase es procesar la madera de manera que se puedan extraer las fibras, teniendo en cuenta los tratamientos alcalinos superficiales para promover los mecanismos de adhesión entre las fibras y la matriz. Después de tener las fibras de refuerzo dispuestas es necesario procesar el polímero en láminas continuas, ya que de lo contrario al mezclarlo con las fibras se presentan defectos dentro del material, como poros, burbujas, etc. Una vez hecho esto, se procede a apilar las capas del compuesto, donde se ubica una capa de polímero por una de refuerzo [18]. Es importante tener en cuenta el porcentaje de masa que se aplica por cada capa ya que este determina el porcentaje de matriz/refuerzo del material

compuesto. Luego de apilar las capas de compuesto se procede a ingresar a la prensa de moldeo la cual debe estar precalentada por lo menos 20°C por encima de la temperatura de fusión del polímero. Debe dejarse el sistema un tiempo suficiente de calentamiento de manera que el polímero se funda. Pasado este tiempo se recomienda realizar unos venteos en la prensa, los cuales consisten en presionar el montaje a una fracción de la presión de conformado por un tiempo corto, y repetir este paso varias veces de manera que se logra mezclar la resina con el refuerzo y eliminar las burbujas o poros dentro del material compuesto. Consecuentemente se debe llevar el montaje a la presión de conformado, la cual debe ser sostenida por un tiempo determinado para finalmente enfriar el montaje y extraer el panel de material compuesto.

Es evidente que en este proceso con tantas variables los resultados varían en términos del cambio de alguna de ellas. Y como se demostró anteriormente en la sección de Tratamiento Superficial de Fibras la variación en el tiempo y concentración de NaOH afecta las propiedades del compuesto, ver Ilustración 9. Por ejemplo Wu [33] desarrolla un estudio que plantea determinar el efecto de aumentar la presión de moldeo en un compuesto de fibras de mazorca con PLA. La Ilustración 11 muestra la variación del esfuerzo de ruptura del compuesto en flexión a medida que se cambia la presión de conformado. En este caso parece no afectar la presión de conformado de la tabla, sin embargo los estudios no son muy numerosos. Además de esto la información relacionada con la variación en términos de tiempo y temperaturas en los procesos de conformación del material es escasa.

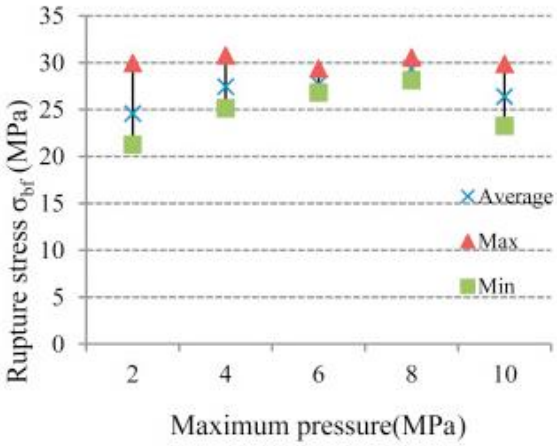


Ilustración 11. Variación del esfuerzo máximo de flexión contra la presión de conformado del compuesto [33]

4 Metodología

La metodología que comprende el desarrollo de este material compuesto incluye cada uno de los objetivos propuestos para esta investigación. En consecuencia se procederá a explicar cuáles son los métodos utilizados para alcanzar cada uno de los objetivos y la manera de medir (si se requiere) las variables que permitan cuantificar el cumplimiento de los propósitos de este trabajo.

4.1 Remoción de estructuras de cementación

El tratamiento superficial realizado a la madera se basó en la previa consulta de los diversos ataques químicos que buscan disolver las estructuras de cementación de diferentes fuentes de celulosa. Como se explicó anteriormente es necesario aplicar un tratamiento químico que diluya las estructuras que no son deseadas (Lignina y Hemicelulosa) para aumentar la fuerza de adherencia superficial entre la matriz y el refuerzo. En el trabajo de Li [25] se analizan diferentes tratamientos superficiales que promueven la adherencia entre la matriz y las fibras lo que se ve reflejado en la resistencia a la tensión del compuesto, por la transferencia de esfuerzos entre los sustratos [24].

Según varios autores el método de alcalinización de fibras es el más usado en el mundo, en el trabajo desarrollado por Rokbi [23] se evalúa el efecto de cambiar las variables del proceso tales como tiempo de inmersión y concentración de hidróxido de sodio. Según este estudio la combinación que da las mejores propiedades es una solución al 10% con 24 horas de inmersión. Teniendo en cuenta esto, se propone replicar la metodología propuesta por este autor tal como se muestra a continuación:

- Preparar solución al 10% de NaOH y agua desionizada.-
- Sumergir la madera por 24 horas.
- Lavar las fibras en agua desionizada.
- Neutralizar la solución alcalina con ácido acético hasta alcanzar pH neutro.

- Revisar la variación de pH y corregir hasta lograr comportamiento estacionario.
- Secar las fibras.

Luego de seguir el procedimiento recomendado es necesario determinar si hubo una reducción en las estructuras de cementación de la madera sumergida. Ya que el tratamiento alcalino es un proceso difusivo se sospecha que las condiciones del proceso expuestas no afectan a todas las fibras de igual forma, razón por la cual es necesario determinar el efecto del tratamiento sobre la madera sumergida. Con base en este hecho es necesario hacer uso de técnicas cualitativas para determinar el efecto en las fibras de cementación. Por este motivo se realiza una prueba con fluoroglucinol agente químico que se torna rojizo en presencia de lignina. Paso seguido se desarrolla un código en Matlab que permita analizar las imágenes para determinar el porcentaje de pixeles “rojos” (positivos para lignina) que tiene la muestra en un área determinada, de manera que se pueda determinar no solo si el tratamiento alcalino está removiendo lignina sino también si el volumen sumergido afecta en los resultados.

Para comparar los resultados es necesario hacer un experimento factorial de dos factores y dos niveles como se puede ver en la Tabla 1, que permita evidenciar el comportamiento del tratamiento químico sobre diferentes volúmenes de madera sumergidos. El experimento cuenta con un grupo de control negativo, el cual es un segmento de madera seca.

Al generar cinco probetas de cada factor y nivel se puede desarrollar una comparación muestral basado en el estadístico T, con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre la madera tratada con la no tratada, además éste experimento permite determinar si hay diferencias entre los diferentes niveles probados en el experimento.

Tabla 1. Experimento factorial de remoción de lignina

Longitud / Ancho	Corta (C) 30 mm	Larga (L) 100 mm
Delgada (D) 5 mm	Bajo – Bajo DC	Bajo – Alto DL
Gruesa (G) 10 mm	Alto – Bajo GC	Alto – Alto GL

Habiendo definido el tamaño de las probetas, el cual varía el volumen inmerso es necesario comparar las fibras externas o superficiales de cada probeta con las fibras internas o intermedias, es decir las que están cerca del centro del área transversal con el fin de evidenciar si el tratamiento alcalino afecta de manera uniforme a las fibras exteriores e interiores, por lo que debe ser necesario realizar un corte longitudinal para exponer estas fibras y realizar la prueba de tinción. El modo de aplicar el agente de tinción es sobre la superficie de la madera aplicando 3 gotas, se espera 3 minutos y se lava la probeta con abundante agua para eliminar los excesos del agente de tinción. Luego de este proceso se procede a tomar fotografías en un estereoscopio con luz, distancia focal y magnificación constantes, y de esta forma se estudia el contorno de colores presentado con el fin de comparar con otros tratamientos.

4.2 Extracción de fibras

Existen diversos métodos para extraer fibras vegetales sin embargo como se explicó en el marco teórico solo se trabaja con métodos de extracción de fibra larga. Por tal motivo se tomó la decisión de usar un método combinado, mezclando un método químico y uno mecánico, partiendo del tratamiento alcalino descrito en la sección anterior. Por esta razón se propone un rolado después de haber realizado el tratamiento alcalino. Este tratamiento se hace con la madera tratada y neutra pasándola entre dos rodillos paralelos que laminan la madera. Es necesario que el espécimen esté húmedo ya que el agua funciona como lubricante entre las fibras y promueve el desplazamiento relativo entre ellas tal como muestra la Ilustración 12.

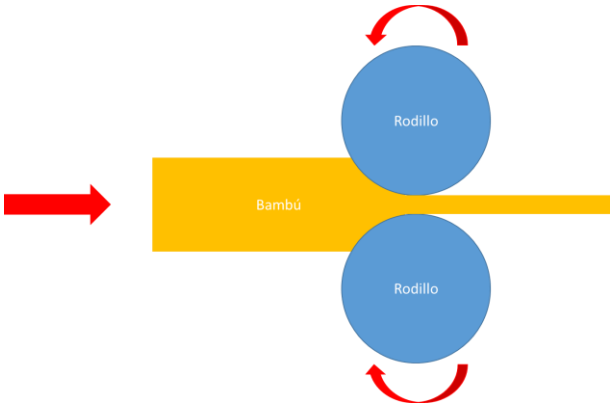


Ilustración 12. Esquema de extracción de fibras por rolado.

Es necesario que las fibras queden bien secas antes del proceso de conformado de la cinta, ya que si quedan húmedas el material compuesto presentará poros por la evaporación del agua durante el proceso de moldeo. Por otro lado cabe resaltar que existen algunos polímeros higroscópicos que tienden a absorber humedad, por lo tanto se pueden ver afectados por esta humedad remanente en las fibras. Por lo que se recomienda secarlas por 24 horas a 80°C

4.3 Selección de la matriz

Para seleccionar la matriz se utilizó el método Delphi de decisión [34] el cual pondera el desempeño de los candidatos evaluados por medio de unos criterios de valoración propuestos por el investigador. Estos criterios permiten adjudicar un puntaje de forma descendente según sea el criterio. Por ejemplo, la Gravedad Específica sería ideal que fuese baja mientras que la tenacidad a la fractura se espera alta, por lo tanto el puntaje se adjudica en términos de conveniencia para el proceso. A continuación se presentan los criterios propuestos para la matriz. Cabe resaltar que los candidatos que entran en el estudio son las matrices termoplásticas, polares, disponibles en el mercado nacional con temperatura de trabajo menor a 250°C tal como se explicó en el marco teórico de esta investigación.

- Gravedad Específica
- Temperatura de procesamiento
- Resistencia a la tensión
- Resistencia a la Flexión

- Módulo de Flexión
- Precio
- Tenacidad a la fractura (IZOD)

4.4 Desarrollo del material compuesto y caracterización mecánica

El método usado para conformar el compuesto es el moldeo por compresión, según diferentes trabajos [15, 16, 18, 23, 26, 29, 35]. En términos generales se debe preparar un sistema de apilación tipo “sándwich” donde en los extremos se ubican láminas de matriz y en el centro se encuentra esparcida la fibra lo más homogénea posible. Luego de esto se aumenta la temperatura del sistema hasta la temperatura de trabajo de modo que en su estado líquido pueda ser comprimida e impregne las fibras para generar el material compuesto. Paso seguido se enfría el sistema y se desmolda.

Cabe resaltar que se desea desarrollar un material compuesto de un espesor cercano a 1 mm para la posterior manufactura de tubería estructural. Este requerimiento presenta una restricción en el molde del sistema, ya que este debe conformar el material compuesto con el espesor bajo y disminuir los defectos de manufactura tanto como sea posible. Esto se logra por medio de un molde no convencional el cual consiste en una lámina de papel aluminio y doblarla como se muestra en la Ilustración 13. Este sistema permite manufacturar un compuesto de bajo espesor [36].

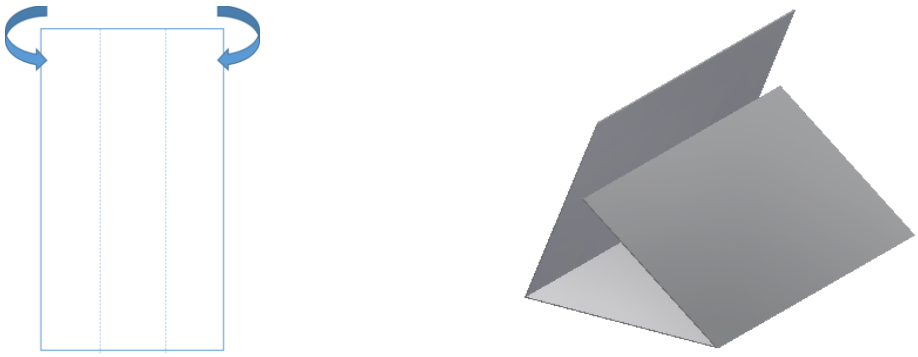


Ilustración 13. Esquema de sobre en papel aluminio

Las condiciones de moldeo se presentan a continuación:

- Temperatura de Calentamiento: 190°C
- Tiempo de Calentamiento: 5 minutos
- Venteos: 20 @10 segundos/venteo
- Fuerza de venteo: 5000 lb
- Temperatura de moldeo:190°C
- Fuerza de Moldeo: 10 000 lb.
- Tiempo de Moldeo: 5 minutos

Para validar la manufactura de la cinta es necesario evaluar la cantidad de inclusiones que se presentan de manera longitudinal, por otro lado para evaluar la sección transversal del compuesto es necesario estudiarla basado en la fracción de volumen representativa, la cual quiere decir que sin importar el aumento que se observe la relación de fibra vs matriz debe ser constante [12]

4.4.1 Caracterización Mecánica del material compuesto

Teniendo definido el método de manufactura es necesario caracterizarlo mecánicamente, por lo tanto se realizan pruebas de tensión y densidad para las fibras, además de esto se realizan pruebas de tensión, densidad y tenacidad a la fractura a diferentes relaciones de fibra y matriz. Con esta información se puede decidir qué relación resulta más ventajosa para la manufactura de la tubería y su posterior caracterización y comparación con las cañas de guadua.

4.4.1.1 Resistencia a la tensión para fibras naturales (ASTM C1557)

Este método provee procedimientos para la determinación de la resistencia axial a la tensión de fibras naturales. La probeta es sometida a una tensión axial aplicada cerca a sus extremos, esta es cargada a una rata determinada y se observa el comportamiento de la fuerza hasta que se alcanza el punto de falla o se logra una carga predeterminada [37].

4.4.1.2 Resistencia a la tensión para materiales compuestos (ASTM D3039)

Este método provee procedimientos para la determinación de la resistencia axial a la tensión de materiales compuestos. La probeta es sometida a una tensión axial aplicada cerca a sus extremos, esta es cargada a una rata determinada y se observa el comportamiento de la fuerza hasta que se alcanza el punto de falla o se logra una carga predeterminada [38].

4.4.1.3 Densidad (ASTM D792)

Este método provee procedimientos para la determinación de la densidad de maderas y productos a base de madera. Dentro de las 6 diferentes opciones que se presentan se usará el método B *"Determinación de volumen por inmersión"*. Esta prueba se realiza para las fibras como para el compuesto [39].

4.4.1.4 Tenacidad a la fractura para polímeros IZOD (ASTM D256) Aplicada al material compuesto

Este método provee procedimientos para la determinación de la tenacidad a la fractura del polímero según la prueba IZOD. Esta prueba se aplica al compuesto para determinar su tenacidad por medio de un péndulo caracterizado [40].

4.4.1.5 Resistencia a la flexión (ASTM D790) Aplicado a tubería

Este método provee procedimientos para determinar el módulo y la resistencia a la flexión de materiales compuestos de matriz polimérica. El método propone una prueba de tres puntos con la carga apoyada en el centro en una viga con soporte simple [41].

4.5 Método para manufacturar tubería estructural con el compuesto de G.A.

El proceso de moldeo de la tubería se divide en 3 pasos, el primero es un enrollado manual del material propuesto con el fin de dar una preforma, a continuación se procede a un proceso de

premoldeo con un molde cilíndrico de dos mitades y por último se desarrolla el moldeo con el molde tipo cilindro con abertura longitudinal.

El primer paso es el del enrollado manual el cual partiendo del material compuesto desarrollado anteriormente se calienta para transformarlo a estado maleable de modo que se enrolle manualmente sobre un tubo denominado alma el cual está encargado de generar el diámetro interno de la tubería de compuesto. Paso seguido se procede a generar el premoldeo que se encarga de convertir la preforma tosca en una tubería conformada, sin embargo este molde presenta algunos problemas de acabado superficial, razón por la cual se procede al último molde el cual consiste en un cilindro con una abertura longitudinal que permite la salida de rebaba y la compresión del molde. La Ilustración 14 muestra un esquema de los moldes usados. El medio de compresión de los moldes es a través de abrazaderas metálicas.

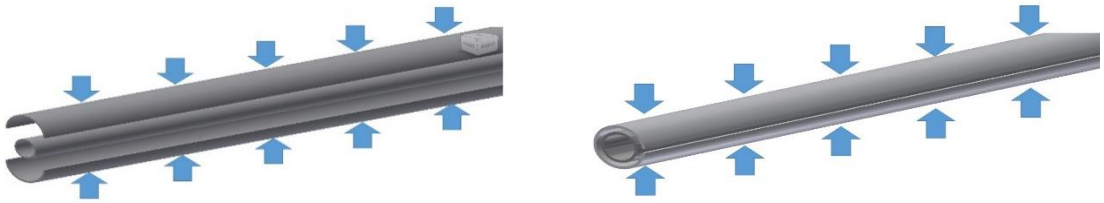


Ilustración 14.Izquierda: premolde cilíndrico de dos mitades. Derecha: molde cilíndrico con abertura longitudinal

El método por el cual se conforman los tubos es el siguiente. Se coloca el material compuesto en el horno a 190°C para volverlo maleable; con el polímero fundido se enrolla manualmente en el alma recubierta de papel parafinado para desmoldar. Luego de esto se debe acomodar el premolde (Ilustración 14 Izquierda), e ingresarlo al horno a la misma temperatura, con el material fundido se deben apretar las abrazaderas 1 vuelta, regresar el molde al horno y repetir el proceso de compresión por las abrazaderas hasta llegar al tope de las abrazaderas. Este proceso se repite con el molde cilíndrico de abertura longitudinal (Ilustración 14 Derecha). De manera que el moldeo haga las veces de venteo y reduzca la cantidad de defectos dentro del material compuesto y mejore el acabado superficial.

5 Resultados y Discusión

A continuación se presentan los resultados de esta investigación. Para mayor claridad esta sección estará estructurada según los objetivos del presente trabajo, de modo que puedan relacionarse de manera directa entre sí.

5.1 Remoción de estructuras de cementación

Se muestra la aplicación al método explicado en la sección 4.1 mediante el cual se logra una descomposición controlada de la lignina. Se puede ver que la densidad de la madera cambia con este tratamiento, ya que al inicio, la madera flota, y pasadas algunas horas la madera se hunde en el fondo del recipiente. Además de esto las fibras toman un color amarillento justo después de ser sumergidas en la solución de NaOH al 10%. Y este color tiende a volverse un tono amarillo ocre a medida que avanza el tiempo de inmersión, ver Ilustración 16.

0 horas 3 horas 24 horas

Ilustración 15. Tratamiento alcalino a la madera de G.A.

Posterior al tratamiento alcalino se lavan las muestras y se neutraliza la solución con ácido acético, de manera que se protejan las fibras del agente alcalino para una descomposición por efectos de residuos dentro de las fibras. La Ilustración 16 muestra un ejemplar de cada uno de los tamaños sumergidos para el experimento factorial.

Ilustración 16. Ejemplares para el experimento factorial de remoción de lignina.

La Ilustración 17 muestra un esquema del proceso de alcalinización de las fibras donde se puede apreciar una diferencia considerable entre las tonalidades alcanzadas por las probetas tratadas y por las que no tuvieron ningún tipo de tratamiento químico (Control Negativo).

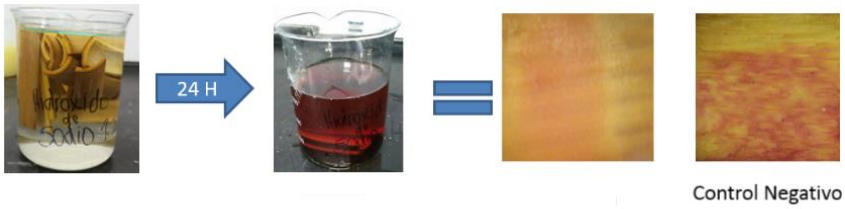


Ilustración 17. Esquema del experimento

A continuación se muestran los resultados obtenidos por medio del software de análisis de imágenes, Ilustración 18. Se puede ver que para el área analizada el control negativo presenta un alto contenido de pixeles positivos para lignina, mientras que a las probetas que se les realizó el tratamiento químico se reduce en un porcentaje cercano al 80%. Lo anterior no quiere decir que la lignina fue reducida en este porcentaje, ya que este experimento no es cuantitativo. Lo que sí se puede decir es que el tratamiento químico realizado a la madera reduce la presencia de lignina en relación con la madera no tratada. Además de lo anterior se puede notar que el tratamiento no presenta diferencias significativas entre ninguno de los niveles. Esto quiere decir que no importa la geometría de las probetas el tratamiento afecta de igual forma a todos los especímenes sumergidos en el tiempo determinado.

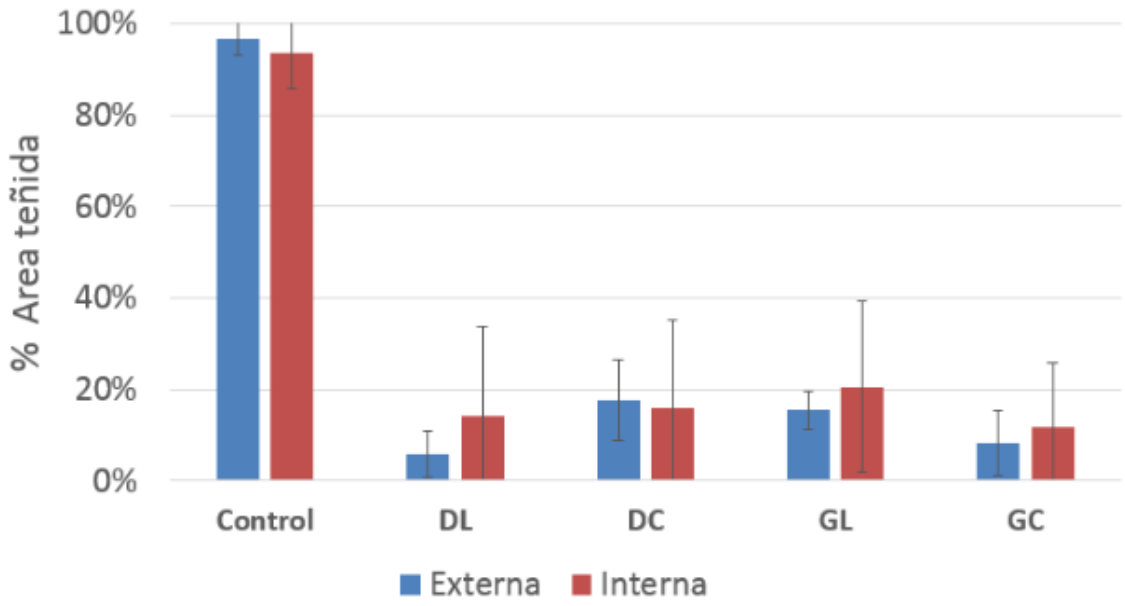


Ilustración 18. Resultados de datos procesados en Matlab

Otra característica importante es que tampoco se presenta una diferencia significativa entre las muestras externas o superficiales con las muestras internas o intermedias ni en la combinatoria de estas. Esto quiere decir que el tratamiento alcalino aplicado afecta a todo el volumen sumergido de madera en el tiempo determinado. Esto resulta muy valioso, ya que se puede decir que se remueven cantidades uniformes de lignina en el volumen de las probetas ya que no existe discrepancia entre las fibras superficiales y las fibras intermedias de cada trozo de madera. Lo anterior es el resultado de una comparación muestral con el 95% de confidencia en el estadístico T.

5.2 Extracción de fibras

Diferentes variaciones del método de laminado se probaron para la extracción de fibras, esta sección presenta los resultados obtenidos a través del proceso de rolado y se puede ver porque se toma la decisión de realizar el proceso después del tratamiento alcalino. Básicamente el proceso de rolado es un proceso de compresión puntual por medio de unos rodillos que se van acercando entre sí. En este proceso el estado puntual de esfuerzos es tan alto que se rompen las estructuras de cementación y a medida que se disminuye la distancia entre los rodillos se generan grietas en el

sentido de las fibras como se puede ver en la Ilustración 19. Estas grietas se van propagando cada vez que los rodillos se acercan, hasta que finalmente la madera colapsa en las fibras que lo componen. Este proceso tiene el problema que a medida que se avanza se maceran mucho las fibras, entran torcidas y se rompen, lo cual es un resultado negativo en términos que lo que se busca son fibras lo más largas posibles.

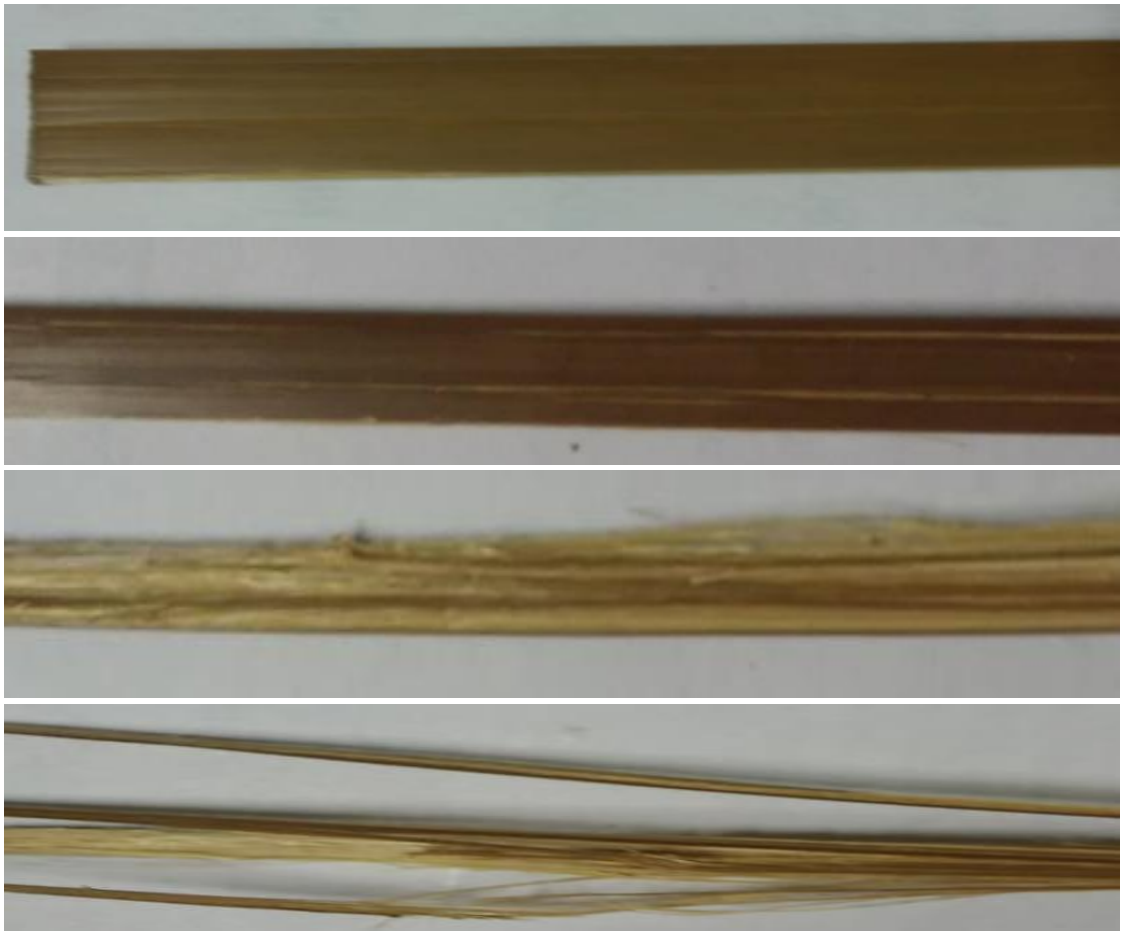
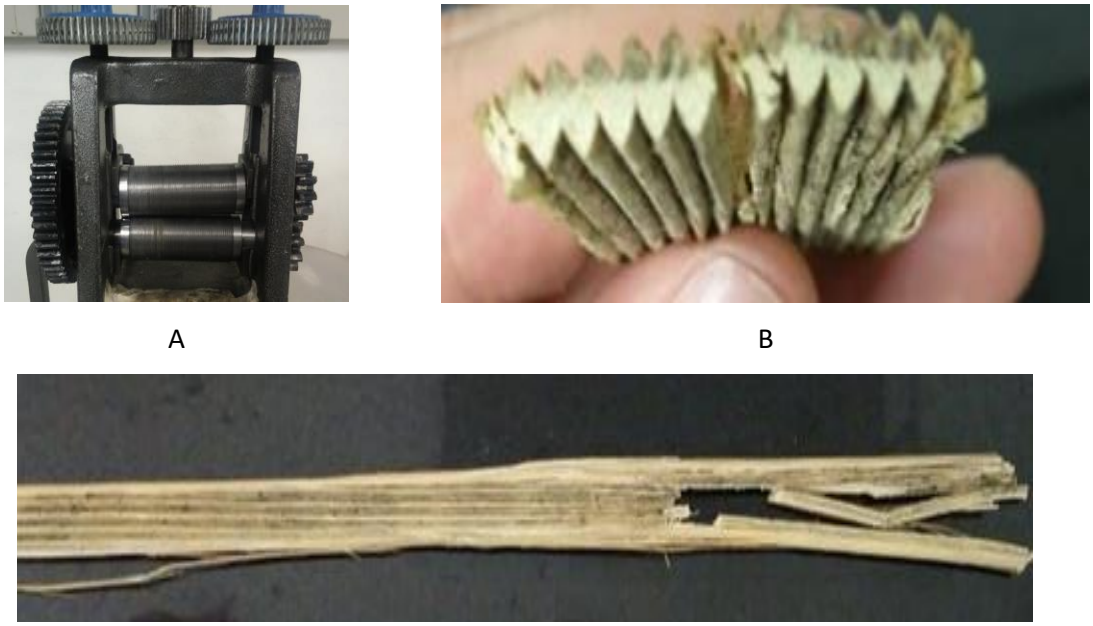


Ilustración 19. Proceso de extracción de fibras por rolado

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea entonces propagar las grietas por medio de la manufactura de rodillos dentados, que generen las grietas desde el inicio del proceso de rolado, ver Ilustración 20. Sin embargo los resultados no fueron los esperados, ya que el material tuvo una respuesta muy tenaz, en la cual no se evidenciaba el crecimiento de grieta deseado, más bien el material tendía a deformarse siguiendo el sentido de los dientes hasta que se fracturaba justo como

en el caso anterior como se puede ver en la Ilustración 20. Esos resultados fueron importantes para entender que las fibras se mantenían juntas debido a las estructuras de cementación, y que en la medida en que se debiliten estas estructuras se podrán extraer las fibras más fácilmente.



A B C

Ilustración 20. Resultados del proceso de rolado dentado. A: Fotografía del montaje dentado B: vista superior. B: vista frontal

Teniendo en cuenta lo anterior se procede a desarrollar una variación al método, realizando el rolado después del proceso alcalino. Cabe recordar que este proceso alcalino se realiza para eliminar las estructuras de cementación de las fibras de manera que se acoplen mejor con la matriz. Este proceso presenta una ventaja adicional, pues al remover estas estructuras debilita la integridad estructural de la madera, de modo que las fibras tienden a separarse más fácil. Es importante tener en mente que este proceso debe realizarse con la madera húmeda, ya que el agua hace las veces de lubricante entre las fibras y promueve el desplazamiento relativo entre las fibras. En este momento se tomó la decisión de hacer el rolado con los rodillos dentados por temas de agilidad del proceso. La Ilustración 21 izquierda muestra los resultados de este proceso. Se puede ver que las fibras están más sueltas y que efectivamente se alinean como fibras individuales. Sin embargo se evidencia maltrato en algunas fibras. Este efecto se da por acercar los rodillos muy rápido, ya que la madera

ingresa torcida y se macera demasiado al girar los rodillos, por lo anterior se procede a repetir la prueba con los rodillos lisos y bajando paulatinamente los rodillos obteniendo unas fibras menos maltratadas que benefician el proceso de manufactura del compuesto, ver Ilustración 21 derecha.

Ilustración 21. Izquierda: Fibras roladas después del tratamiento alcalino con rodillos dentados

Derecha: Fibras roladas después de tratamiento alcalino con rodillos lisos.

5.3 Selección de la matriz

Aplicando el método Delphi se determinan los criterios de evaluación de diferentes polímeros polares disponibles en el mercado colombiano, que sean reciclables y que su temperatura de trabajo sea menor a 250°C. La Tabla 2 muestra la matriz de evaluación desarrollada para seleccionar la resina adecuada. Estos criterios resultan importantes en el desarrollo del material compuesto y también en el eventual desempeño estructural del material. Por esta razón se determina utilizar como matriz el Poliestireno Cristal (PS) como matriz ya que en conjunto es la resina que más puntos suma. Sin embargo la matriz de selección está pensada para darle mayor peso a algún criterio de selección en términos de escoger el polímero que mejore ese criterio específicamente.

Tabla 2. Tabla de decisión de Delphi

Material	Grav. Esp.	Pnt	Temp. Proceso [°C]	Pnt	Resist. Tensión [MPa]	Pnt	Resist. Flexión [MPa]	Pnt	Módulo Flexión [GPa]	Pnt	Tenaz. Izod [J/m]	Pnt	Precio [$/kg]	Pnt	Total
PS	1.04	6.5	190	7	51.02	6	102.04	9	3.5	8	16	1.5	5300	7	45
PLA	1.25	2	190	8	60	7	82.7	6	3.5	9	16	1.5	6800	5	38.5
ABS	1.2	3.5	215	5	41.4	4.5	68.9	4	3.1	7	320	7	6100	6	37
PET	1.35	1	277	1	62.1	8	96.5	8	2.76	6	53	3	3950	9	36
PUR	1.2	3.5	215	5	41.4	4.5	89.6	7	1.72	3	854	9	11700	1	33
PP	0.91	9	215	5	34.5	3	48.3	3	1.38	1.5	442	8	7800	3	32.5
PA 6	1.13	5	260	2	65.39	9	80.69	5	1.9627	4	107	5	10000	2	32
HIPS	1.04	6.5	150	9	19.31	1	36	1	2.28	5	95	4	7200	4	30.5
HPDE	0.96	8	232	3	25.5	2	42.75	2	1.38	1.5	160	6	4750	8	30.5

5.4 Desarrollo del material compuesto

El método seguido para manufacturar el material compuesto requiere evaluar la calidad de los resultados obtenidos. Además de esto es necesario caracterizar las fibras y el material compuesto. Por este motivo esta sección va a ser dividida en dos partes, la primera se enfoca en la manufactura del compuesto y la segunda en los ensayos que permiten caracterizar el compuesto [18].

5.4.1 Manufactura del compuesto.

La manufactura del material compuesto parte de las fibras tratadas y extraídas y de la resina extruida en una lámina de forma que se puede aplicar el sistema de apilación, el cual hace referencia a la forma de acomodar la matriz y las fibras de manera que permite moldear con éxito el compuesto. Es claro que la masa de fibra depende de la masa de resina y entre ellas generan la relación fibra-matriz del material compuesto. Es importante tener esto en cuenta ya que el espesor de la lámina de resina que mejor funciona independientemente de la cantidad de fibra añadida al compuesto es de 0.4 mm, ya que más gruesa la cinta queda muy quebradiza, y más delgado de eso la manufactura del compuesto presenta muchos defectos. A continuación se procede a apilar tal como se muestra en la Ilustración 22. Cabe resaltar que como el polímero es translucido, las fotografías no muestran mayor detalle.

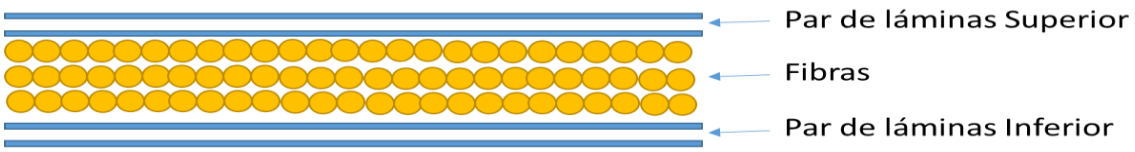


Ilustración 22. Esquema de acomodación de los sustratos del compuesto

Definido la estructura de apilación del compuesto se procede a evaluar la cantidad de fibra necesaria para lograr un compuesto uniforme, ya que se evidencia unas inclusiones de resina tal como muestra la Ilustración 23, por lo tanto se plantea medir la cantidad de inclusiones de manera longitudinal aumentando la cantidad de fibra en el material compuesto con el fin de determinar qué relación de fibra matriz produce un material con la menor cantidad de defectos posible. Por lo tanto se desarrolla un software en Matlab® que analiza la cantidad de pixeles que no tiene fibra visto como manchas blancas en la imagen. Por lo tanto se analizan diferentes composiciones de Fibra-Matriz. A simple vista se puede ver que a medida que aumenta la cantidad de fibra en el material compuesto la cantidad de inclusiones disminuye.

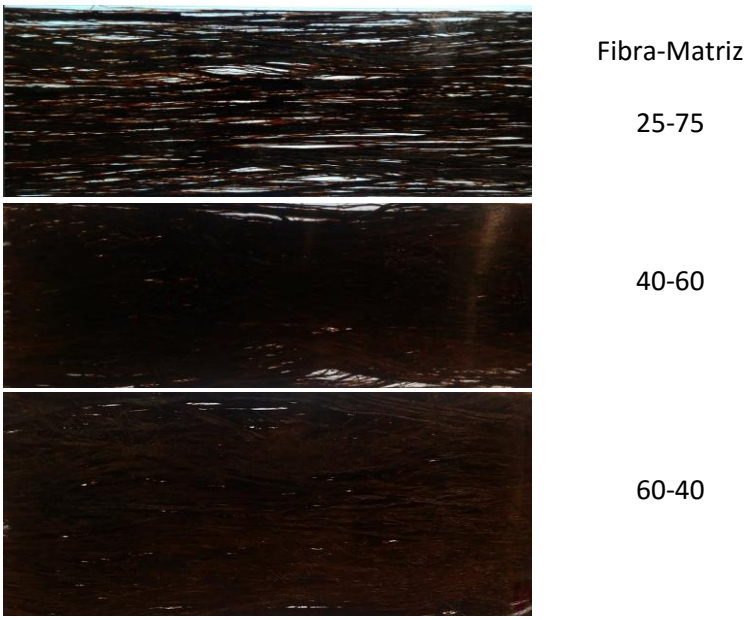


Ilustración 23. Algunas fotografías a contraluz de 3 composiciones.

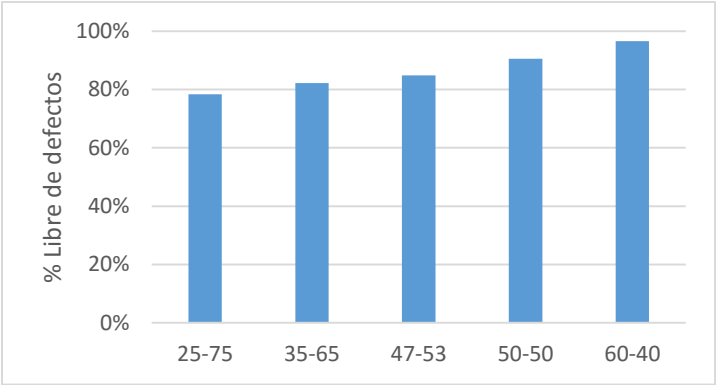


Ilustración 24. Porcentaje de llenado longitudinal

La Ilustración 24 muestra los resultados del análisis de imágenes que muestra una clara tendencia ascendente con el aumento de la cantidad de fibra a llenar el 100% del área. Esto quiere decir que a medida que se aumenta la masa de fibra en relación con la resina las inclusiones de resina tienden a desaparecer como es evidente. Sin embargo el aumento excesivo de fibras introduce otros problemas en el sistema relacionados con la suficiencia de resina, ya que para la relación 60-40 se presentan esta clase de defectos en el material compuesto como se puede ver en la Ilustración 25. Esto quiere decir que la matriz no está impregnando las fibras en su totalidad y quedan parches de fibra suelta lo que se puede ver como un defecto, ya que al no tener la fibra un medio aglomerante no representa un continuo por lo tanto esta zona no soporta esfuerzos estructurales. Este defecto se puede ver como una futura grieta razón por la cual no es bueno llegar al límite de relación fibra-Matriz de 60-40.

Ilustración 25. Carencia de matriz superficial

Con base en lo anterior se procede a realizar el análisis transversal. Para este caso se analiza la relación 60-40, ya que al tener más fibras impregnarlas resulta más difícil, por lo tanto este es el

peor escenario para impregnar el refuerzo. A esta relación se le realiza un corte transversal a las fibras en una zona donde no presente los defectos mencionados. Para este análisis es necesario revisar cómo se esparce la matriz alrededor de las fibras, en un volumen representativo, ver Ilustración 26. Esto quiere decir que se toman fotografías a diferentes escalas de magnificación y se hace un análisis de las fases presentes en la imagen. Al definir la cantidad de área que ocupa cada una de las fases del material compuesto se puede determinar la relación real de fibra matriz en una fracción de volumen representativa, y repetir el proceso para una fotografía magnificada.

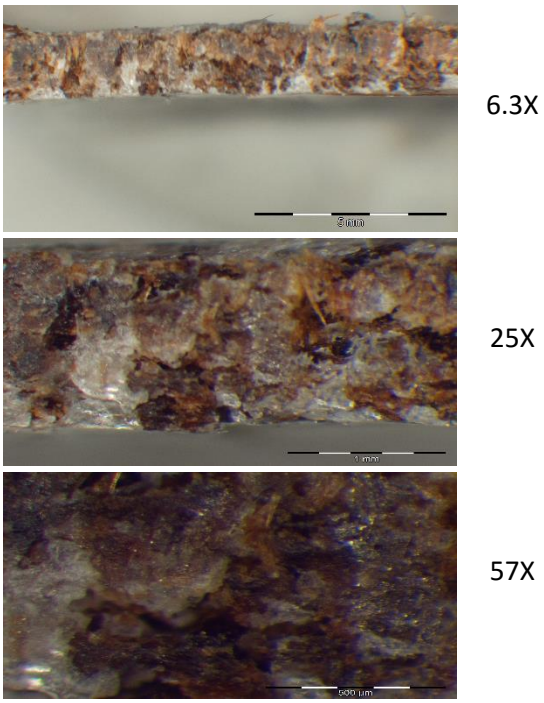


Ilustración 26. Cortes transversales del compuesto

Estas imágenes son convertidas a blanco y negro a una escala de 8 bits, esto quiere decir que cada pixel va a tener un valor de intensidad de luz entre 0 y 255 lo cual puede ser entendido como una escala. Teniendo en cuenta lo anterior se puede entonces desarrollar un análisis donde se determina el nivel de intensidad lumínica que representa matriz, fibra y porosidad, de modo que se pueda desarrollar el análisis de volumen representativo, tal como se muestra a continuación en la Ilustración 27.

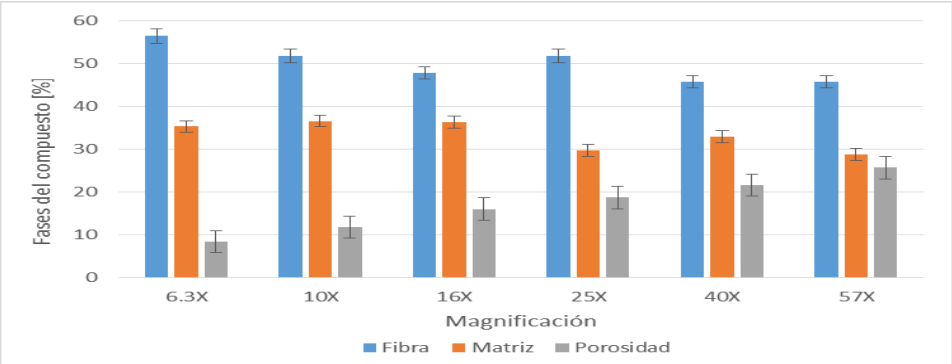


Ilustración 27. Fases en el compuesto, corte transversal

Se puede ver que existen tres fases presentes en el material compuesto la fibra, la resina y algo de porosidad, además se puede ver que a medida que crece el aumento de la imagen la porosidad aumenta; esto tiene sentido ya que el poro ocupa mayor lugar dentro de la imagen lo cual distorsiona la proporción de fibra y matriz dentro del material compuesto. Si se remueve la porosidad como muestra la Ilustración 28 y se evalúa la verdadera relación fibra-matriz del compuesto, se puede ver que el compuesto resulta estable en términos de la relación de diseño que es 60-40.

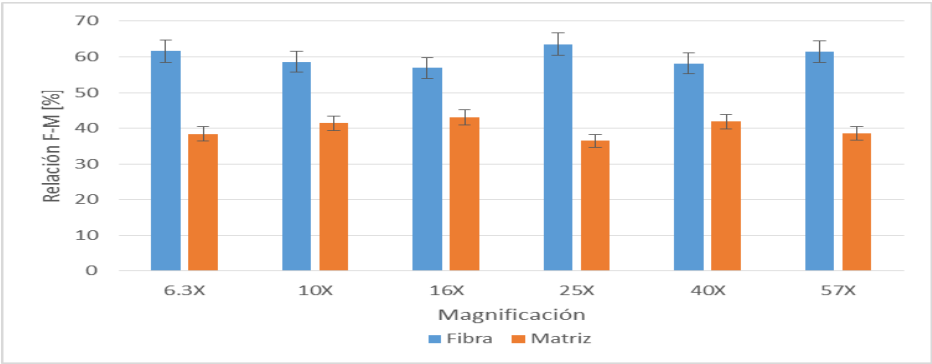


Ilustración 28 Relación fibra matriz sin la porosidad

Con base en lo anterior se puede decir que el polímero impregna de manera uniforme el área transversal del compuesto, y que a medida que se aumenta la magnificación de la imagen este sistema de dispersión de matriz se mantiene constante.

Por lo tanto se puede determinar que la relación de fibra-matriz que se recomienda por presentar la menor cantidad de defectos posibles es la 50-50, ya que básicamente se busca desarrollar un material compuesto lo más uniforme posible, con la menor cantidad de inclusiones de matriz y que presente un buen sistema de distribución de resina en el área transversal. Estos resultados se deben a que las fibras no están tejidas por lo tanto pueden moverse durante el proceso de moldeo y generar las inclusiones, por otro lado la cantidad elevada de venteos permite esparcir de manera homogénea la matriz en la sección transversal del material compuesto.

Con base en la información obtenida anteriormente es necesario ahora determinar cuál es la relación fibra-matriz adecuada para manufacturar la tubería; como se determinó la relación 50-50 es la que mayor cantidad de refuerzo acepta presentando la menor cantidad de imperfecciones pero hacer falta evaluar su desempeño mecánico. Por este motivo es necesario caracterizar diferentes relaciones de cintas de modo que se establezca cuál brinda mejores propiedades mecánicas.

5.4.2 Caracterización mecánica del compuesto

La caracterización mecánica del material compuesto se divide en 2 partes, inicialmente es necesario caracterizar las fibras extraídas por medio de los siguientes estándares ASTM:

- C1557 (Tensión en fibras)
- D792 (Densidad por inmersión)

El paso a seguir es la caracterización del desempeño mecánico del material compuesto, por este motivo se procede a aplicar los siguientes ensayos ASTM:

- D3039 (Tensión en materiales compuestos)
- D256 (Tenacidad a la fractura para polímeros y materiales compuestos)
- D792 (Densidad por inmersión)

Por último se realiza la prueba de flexión en 3 puntos pero a la tubería desarrollada, al moldear el material compuesto como un cuerpo esbelto los resultados obtenidos no son característicos del material. A continuación se presentan los resultados para la caracterización de las fibras.

5.4.2.1 Caracterización de fibras (Densidad D792 y Tensión ASTM 1557)

La prueba de densidad de fibras se realiza a las fibras extraídas como se menciona en secciones anteriores. Estas fibras son sumergidas en alcohol isoporpílico y se mide el aumento de peso en el sistema cuando se sumergen las fibras según la norma; la densidad se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_m = \frac{m_m \rho}{m_m + m_{cv} - m_{cm}}$$

Donde:

ρ_m: Densidad de la muestra 0.789[g/cc]

m_m: Masa de la muestra

m_{cv}: Masa canastilla vacía

m_{cm}: Masa canastilla con la muestra

Tabla 3. Densidad de fibras tratadas

FIBRAS TRATADAS 24h10% NaOH				
No Probeta	Masa [g]	Canastilla Vacía [g]	Canastilla con muestra [g]	Densidad [g/cc]
1	1.2745	11.3307	11.8849	1.3961
2	1.5591	11.3328	12.0163	1.4049
3	1.3823	11.3399	11.9497	1.4118
4	1.1698	11.3299	11.8452	1.4102
5	1.5571	11.332	12.0276	1.4261

La Tabla 3 presenta los resultados del ensayo de densidad para las fibras. Se puede ver que la densidad de las fibras es muy estable, varía muy poco con un promedio de 1.4098 g/cc y un coeficiente de variación (CDV) de 7.78%. Esta densidad es necesaria porque se utiliza en el cálculo

del área transversal de las fibras, ya que medir el área transversal es muy difícil por lo tanto se propone calcularla con el peso y la densidad promedio, ingresando como parámetro la longitud de 10 cm para todas las fibras que se van a probar en tensión, tal como muestra la siguiente ecuación.

$$A = \frac{m}{\rho L}$$

Donde:

A: Área transversal promedio

m: Masa de las fibras

ρ: Densidad de las fibras

L: longitud de las fibras

Por medio de esta ecuación se puede determinar el área promedio de las fibras para poder calcular el esfuerzo en la prueba de tensión. Las fibras fueron preparadas en un marco de papel para evitar que se rompieran o se entorcharan durante la prueba como muestra la Ilustración 29. Encima del papel se dispuso cinta transparente y sobre esta cinta se agregó una gota de adhesivo epóxico la cual mantiene la fibra firme en el montaje. Además de esto se cortó el papel para evitar probar el marco durante el ensayo según indica la norma [37].

Ilustración 29. Probeta de fibra a tensión

La Tabla 4 muestra los resultados de las pruebas a tensión efectuadas a las fibras, se puede ver que exististe una variación cercana al 30% en los resultados de resistencia a la tensión. Esta variación se explica desde el punto de vista de la extracción de las fibras, ya que hay que separarlas manualmente

del manojo de fibras y es probable que se ingresen defectos en las fibras. Aun cuando las fibras se extraen por medio del proceso de rolado, existen partes donde siguen estando agrupadas por remanentes de lignina, de modo que puede encontrarse dos o tres fibras de forma puntual, y al separar una sola fibra se pueden ingresar defectos por la manipulación. La fibra presenta una resistencia de 390 MPa que es un valor alto, lo cual la hace interesante para ser usada como refuerzo en materiales compuestos. El módulo elástico es un módulo alto comparado con las resinas, además se puede ver que este tiene una variación cercana al 20% causada por remanentes de lignina sobre las fibras y por factores como los nutrientes dentro del proceso de crecimiento de la planta etc. Con un módulo promedio de 17.77 GPa se puede esperar que los resultados de tensión aumenten con el refuerzo ya que este valor es mayor que el de la resina.

Tabla 4. Resultados de Tensión en Fibras

No probeta	Carga Máx [N]	Peso [g]	Área Transv. [mm^2]	Resistencia Tensión [MPa]	Módulo de Elasticidad [GPa]
2	4.09	0.0024	0.02	242.58	21.55
4	16.36	0.0043	0.03	541.84	20.76
5	10.24	0.0028	0.02	520.62	19.57
8	18.23	0.0064	0.04	405.53	17.67
9	29.62	0.0101	0.07	417.59	14.31
11	6.59	0.0024	0.02	391.17	22.20
13	22.48	0.0078	0.05	410.46	13.82
14	23.86	0.0073	0.05	465.46	15.58
15	14.69	0.0090	0.06	232.44	12.84
17	18.07	0.0059	0.04	436.05	15.61
18	3.54	0.0022	0.02	229.06	21.64
			Promedio	390.25	17.77
			Coef. Variación [%]	28.28	19.67

5.4.2.2 Tensión en materiales compuestos ASTM D3930

Teniendo entonces los resultados de las fibras se puede proceder a evaluar el compuesto a tensión. Para esta prueba se manufacturan tiras de 1 pulgada de ancho por 10 pulgadas de largo del material compuesto según indica la norma [38], la Ilustración 30 muestra los resultados de las diferentes relaciones probadas

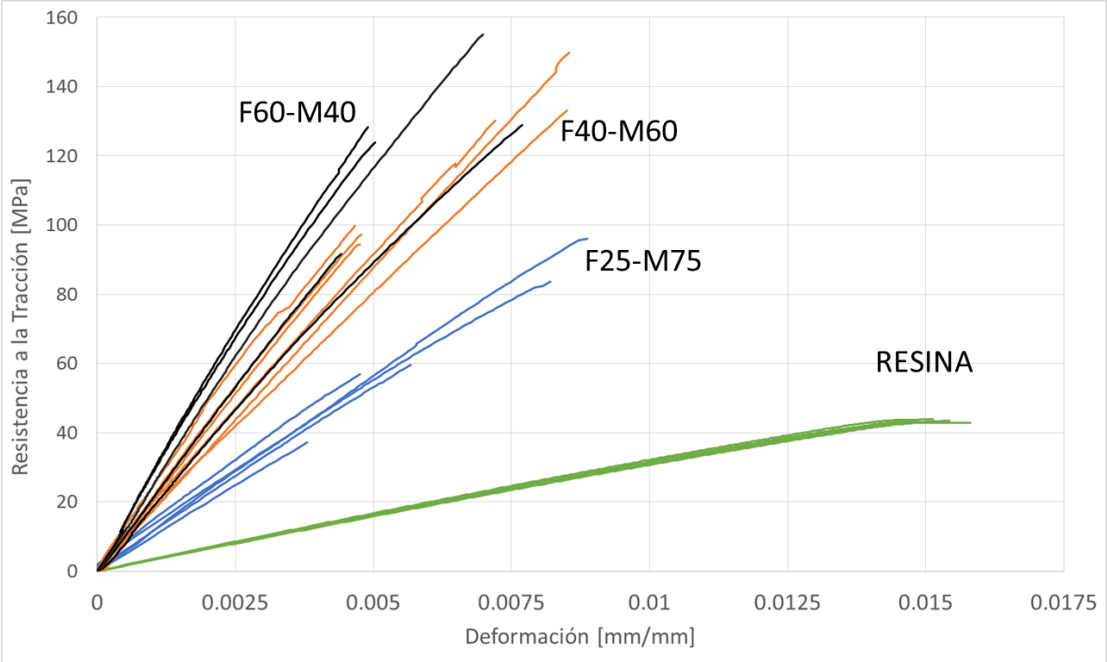


Ilustración 30. Ensayo de tensión de la cinta de compuesto

De esta gráfica se pueden analizar diferentes cosas, la primera es el cambio en el módulo elástico del compuesto a medida que se aumenta la cantidad de fibra, se observa como la pendiente se pronuncia más, se pueden diferenciar 3 zonas que corresponden al aumento en la cantidad de refuerzo en las probetas, la primera es la resina sola, luego viene la relación 25-75 y finalmente se presenta una zona de alto módulo correspondiente a las relaciones de mayor cantidad de fibra. Por otro lado se puede ver que la dispersión de los datos aumenta considerablemente con el aumento de las fibras ya que al tener más fibras dentro del compuesto y ser muy difícil alinearlas de manera perfecta se presentan diferentes defectos que alteran el esfuerzo de falla y el módulo elástico del

material junto con la variación mostrada previamente por las fibras. Esta información se puede ver de manera explícita en la Ilustración 31.

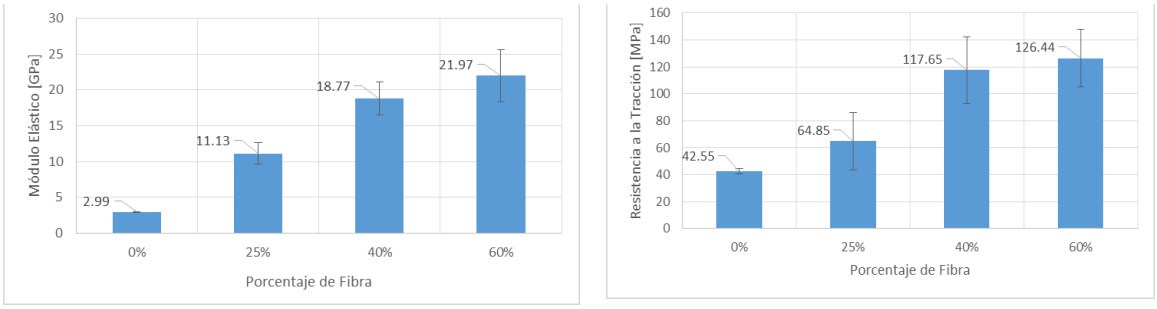


Ilustración 31. Izquierda: Modulo de elasticidad. Derecha: Esfuerzo máximo de tensión

Se observa que con el refuerzo el módulo de elasticidad aumenta, así que el módulo elástico aumenta más de 7 veces cuando se compara el polímero y la relación 60-40. Por otro lado se puede ver como la resistencia a la tracción sigue la misma tendencia ascendente con el aumento de fibra al sistema de moldeo, y se puede ver que se aumenta casi 3 veces la resistencia a la tensión, sin embargo la variación del esfuerzo de ruptura parece mantenerse constante independiente de la cantidad de refuerzo asociado al material compuesto ya que la desviación estándar oscila sobre 22 MPa independientemente la cantidad de refuerzo sobre el compuesto. Otra característica interesante es que los datos sugieren un punto de saturación de fibra para el cual las propiedades no aumentan con el aumento de la fibra en el compuesto. Esto se puede ver ya que estadísticamente hablando el moldeo 40-60 no presenta ninguna diferencia significativa con el 60-40 según una comparación muestral con el 95% de confiabilidad siguiendo el estadístico T.

5.4.2.3 Tenacidad a la fractura prueba IZOD ASTM D256

La tenacidad a la fractura es una propiedad muy importante en estructuras, ya que esta es la capacidad del material de absorber energía debido a un impacto. No se puede desarrollar un material compuesto con baja tenacidad a la fractura, de hecho una de las razones principales para reforzar un polímero es aumentar esta propiedad, ya que su tenacidad a la fractura no es muy buena

comparada con los metales por ejemplo. A continuación se muestran los resultados del ensayo, ver la Ilustración 32

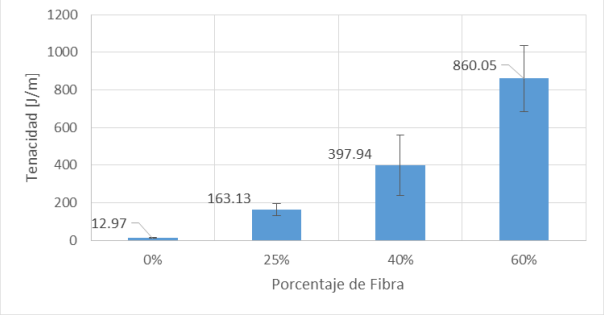


Ilustración 32. Tenacidad a la fractura del compuesto a diferentes relaciones fibra-matriz

De la misma manera que en los ensayos de tensión se puede ver que la tendencia de la propiedad es ascendente con el aumento de la fibra en el compuesto. Esta es la propiedad que más aumenta en relación a la cantidad de fibra ya que si se compara la resina con la cinta 60-40 se puede ver que hubo una mejora de más de 66 veces. Esto quiere decir básicamente que al acomodar las fibras de manera perpendicular al impacto, las mismas van a funcionar como disipadores de energía al romper las fibras de refuerzo. Además, se puede ver que las tres relaciones fibra y matriz discrepan estadísticamente hablando, esto quiere decir que efectivamente a medida que se aumenta la cantidad de fibras se aumenta la tenacidad a la fractura ya que existe mayor cantidad de fibras que se deben romper toda vez que se aumenta la relación del refuerzo dentro del compuesto.

5.4.2.4 Densidad del compuesto ASTM 792

La densidad del compuesto es una propiedad muy importante en el diseño de estructuras, puesto que esta determina la capacidad de construcción de estructuras ligeras. La Ilustración 33 muestra los resultados obtenidos al realizar la prueba de densidad por inmersión de la misma manera que se hizo con la densidad en fibras. Esta propiedad depende de la densidad de la matriz y el refuerzo, por lo que se desea que ambos sustratos tengan una baja densidad.

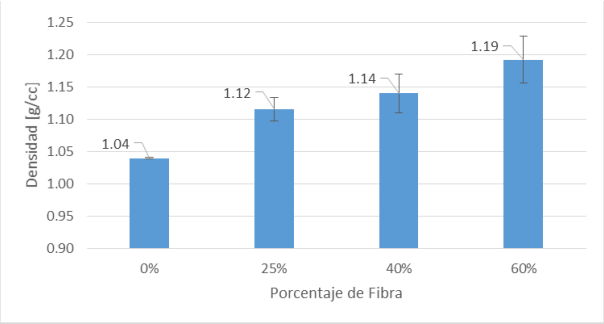


Ilustración 33. Densidad de diferentes relaciones fibra-matriz

La resina presenta una densidad de 1.04 g/cc mientras que el compuesto más denso es precisamente el que mayor cantidad de refuerzo tiene con una densidad de 1.19 g/cc, con esto en mente si se compara la resina con el compuesto 60-40 el aumento es tan solo 0.15 g/cc el cual representa un incremento del 14%. Se puede ver que aunque la tendencia es a aumentar con el refuerzo la pendiente es muy baja.

5.5 Método para la Manufactura de tubería estructural con el compuesto de G.A.

Con la información presentada en la sección anterior es posible entonces centrarse en una relación de cinta 50-50 que evita tener los defectos de ausencia de matriz presentados en la Ilustración 25, y que además presenta buenas propiedades mecánicas. Por este motivo se procede a desarrollar un método que permita manufacturar tubería con las cintas de compuesto desarrollado. Después de explicar en detalle el método desarrollado se presenta una sección con las pruebas de flexión basado en la norma ASTM D790 junto con una sección de comparación en las cuales se evalúa el producto desarrollado contra las cañas de G.A.

5.5.1 Método de manufactura de tubería

La tubería puede ser conformada a partir de una cinta plana, enrollando la cinta alrededor de un molde llamado alma como se puede ver en la Ilustración 34-Superior uniendo las esquinas opuestas y de este modo se logra maximizar la longitud de la tubería; la línea azul representa el alma y sobre

esta se realiza el enrollado manual. Los resultados del proceso de enrollado manual se pueden ver en la Ilustración 34 Inferior. Se observa una preforma muy tosca que no presenta resistencia estructural.

Ilustración 34. Superior: Cinta plana antes de ser enrollada
Inferior: Cinta enrollada manualmente

Paso seguido se procede a ubicar la preforma dentro del premolde tal como se muestra en la Ilustración 35 superior aplicando el método descrito en la sección de metodología, terminado este proceso se pasa al moldeo tal como se muestra en la Ilustración 35 inferior. Es importante tener en cuenta que dentro de los procesos de fundido del material compuesto se pueden generar burbujas por gases de desecho, es necesario evitar estas burbujas ya que generan defectos en la tubería.

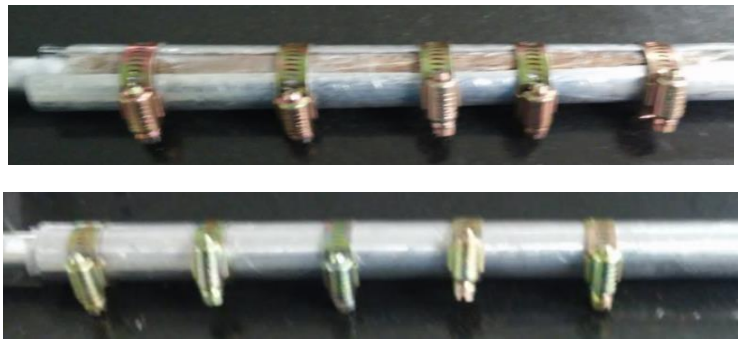


Ilustración 35. Superior: Sistema de premoldeo
Inferior: Sistema de moldeo

Finalmente se procede a la fase de desmolde obteniendo resultados típicos como el mostrado en la Ilustración 36, donde se puede ver un tubo de sección transversal uniforme, con dimensiones estándar, ya que los tubos usados son fabricados a partir de tubería comercial.

Ilustración 36 Tubería de compuesto

5.5.2 Caracterización mecánica de la tubería y comparación con cañas de G.A.

La Ilustración 37 muestra los resultados de la prueba de flexión practicada a la tubería, se puede ver que al principio las probetas crecen con la misma pendiente, lo que esto quiere decir que tienen un módulo de elasticidad con baja variación, además de esto se pueden ver algunos defectos puntuales en la probeta 2 y 6 que cambian el camino en una zona puntual pero luego que este defecto se propaga el compuesto retoma la pendiente por la que venía. Pasada una deformación de 0.005 mm/mm empiezan a propagarse las grietas dentro del material de manera aleatoria, y es en esta zona donde se logra el esfuerzo máximo del material. Se observa que el crecimiento de grieta es controlado puesto que los niveles de esfuerzo disminuyen paulatinamente después del esfuerzo máximo.

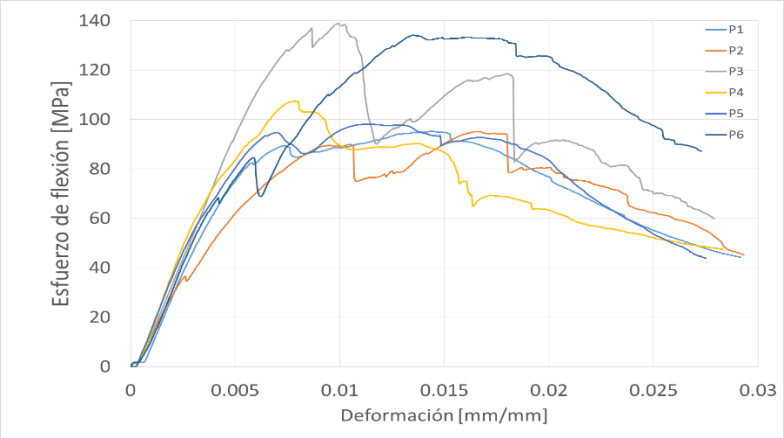


Ilustración 37. Flexión en 3 puntos

Teniendo la caracterización mecánica completa se puede comparar el material desarrollado con las cañas de guadua, ya que la idea principal era desarrollar un material compuesto que aprovechara las bondades de las cañas. La primera característica es el módulo de elasticidad, ver Ilustración 38. Se observa que no se encuentra diferencia significativa entre esta propiedad, esto quiere decir que en tensión el compuesto desarrollado es comparable con la G.A. Lo que sí pudo mejorarse fue la variación de la propiedad. Se puede ver que el CDV del compuesto es de 13.8% contra el 18.1% de las cañas de G.A probadas en un estudio anterior [9]. Aunque no se logró una mejora en la propiedad nominal se disminuyó de 4.3% la variación del módulo elástico.

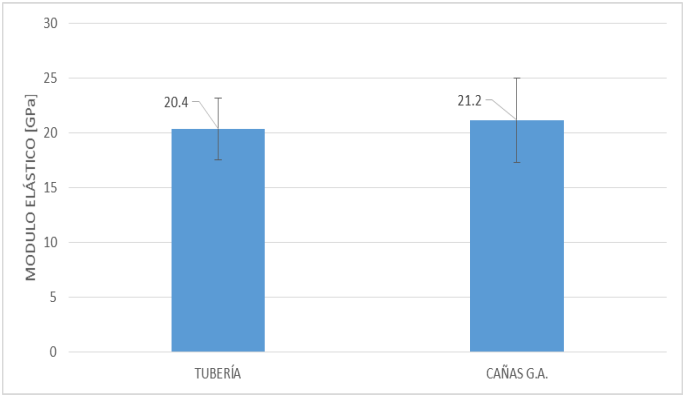


Ilustración 38. Comparación del Módulo de Elasticidad.

La Ilustración 39 muestra la comparación para la resistencia máxima a la tracción, tampoco se encuentran diferencias significativas entre el valor nominal de la propiedad para ambos materiales. Sin embargo, se puede ver una mejora en la variación de esta propiedad. El CDV para el compuesto es de 18% contra el 27.9% que tiene las cañas. Para este caso se puede ver una disminución cercana al 10% del coeficiente de variación de esta propiedad.

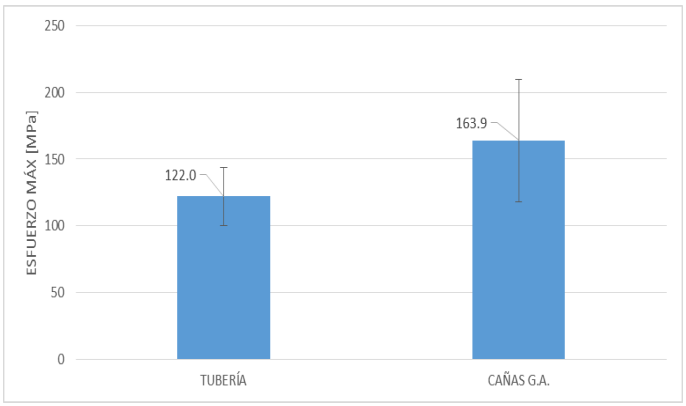


Ilustración 39. Comparación de la Resistencia a la Tracción

La comparación para el módulo de flexión no mejora en comparación con la G.A ya que el compuesto pierde cerca de 44.57 GPa. Por otro lado, la variación en el módulo de flexión es menor en la tubería desarrollada tal como se ve en la Ilustración 40.

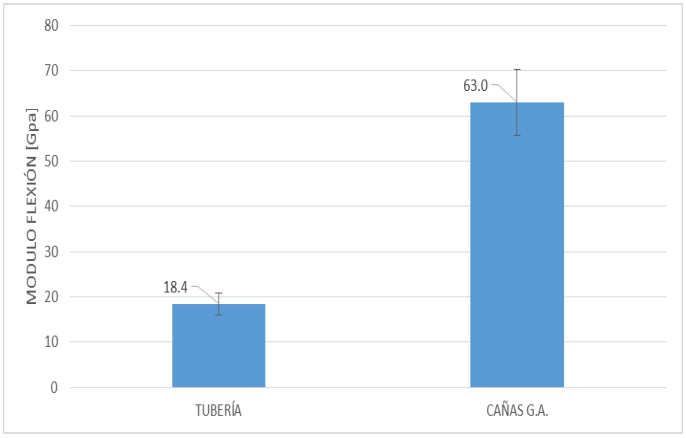


Ilustración 40. Comparación del Módulo de Flexión

La Ilustración 41 muestra la comparación para la resistencia a la flexión. Para esta propiedad no se encuentran diferencias significativas para el valor nominal. Por otro lado el CDV se aumenta en un 8.1% en comparación con el de las cañas debido a los defectos nucleados durante el proceso de manufactura, tal como se discutió anteriormente.

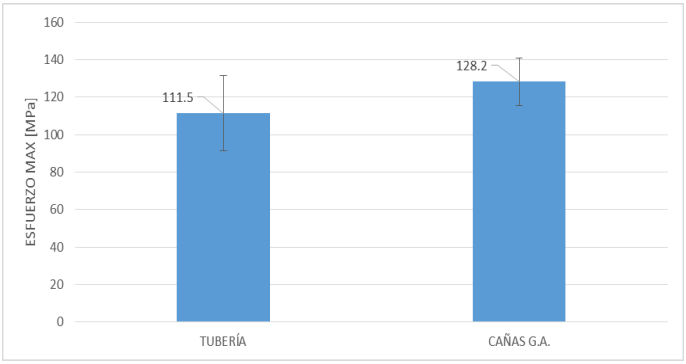


Ilustración 41. Comparación de la Resistencia a la Flexión

La Tenacidad a la fractura se compara en la Ilustración 42. Se puede ver que esta propiedad no representa ningún tipo de diferencia en su valor nominal. Por otro lado los CDV de ambos materiales son muy cercanos, se evidencia una diferencia del 1.5% a favor de las cañas naturales.

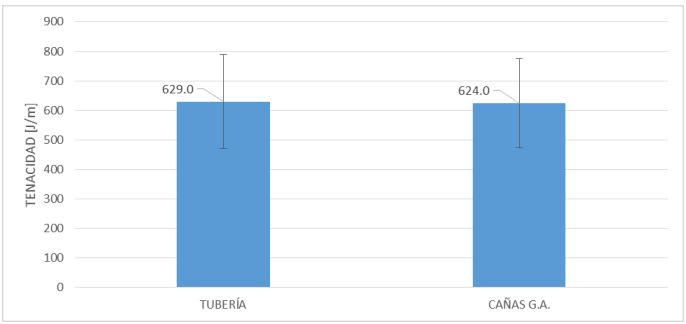


Ilustración 42. Comparación de la Tenacidad a la Fractura

La comparación entre la densidad de los materiales se ve afectada por el tratamiento químico y los diferentes procesos compresivos que sufren las fibras. Como se puede recordar la G.A. tiene un sistema de capilares asociados a la madera, mediante los cuales se propicia el transporte de agua a las ramas elevadas. Este sistema es uno de los responsables de la baja densidad de esta madera, este sistema colapsa durante el proceso alcalino y la extracción de fibras, la Ilustración 43 muestra la comparación de densidades entre la tubería y las cañas de G.A.

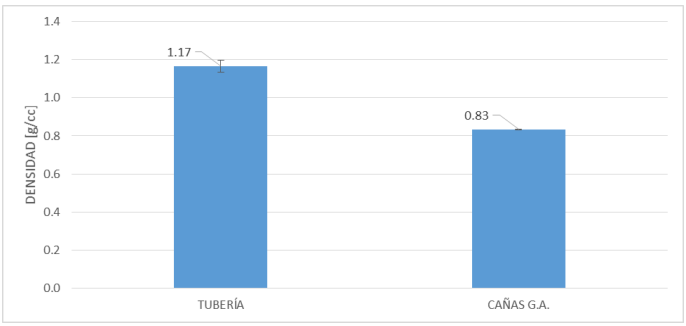


Figura 1. Comparación de Densidad

Este sistema colapsa luego del tratamiento alcalino, además las fibras sufren compresión en diferentes etapas del proceso de extracción de fibra y manufactura. Aun cuando ambos materiales tienen una variación pequeña en su densidad, CDV 2.7% y 0.4% para la tubería y las cañas respectivamente, se ve un aumento del 40% en la densidad nominal del compuesto con respecto a las cañas. Aunque este resultado sugiere ser negativo en contexto con otros materiales como el aluminio (2.7 g/cc) el compuesto sigue teniendo una densidad menor.

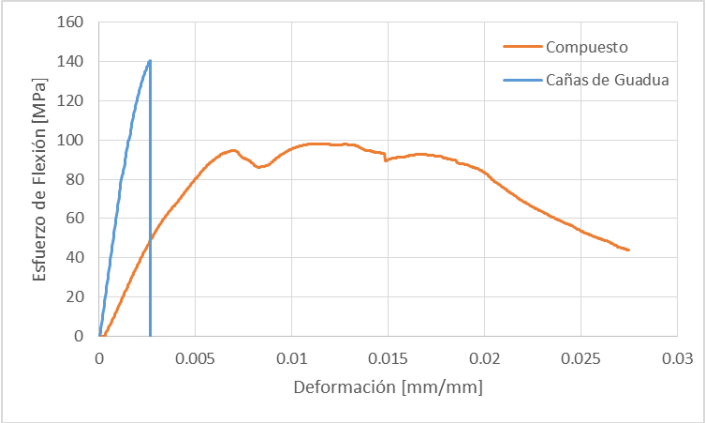


Ilustración 43. Comparación de la tenacidad

La tenacidad del material se entiende como el área bajo la curva esfuerzo-deformación, para materiales compuestos se toma la región elástica para calcular dicha propiedad. Se evidencia una mejora del material compuesto en comparación con las cañas, ya que según esta prueba las cañas presentan una tenacidad de 0.175 MPa mm/mm mientras que la tubería desarrollada presenta una

tenacidad de 0.294 MPa mm/mm lo cual representa un aumento de cerca de 1.7 veces del desempeño del material compuesto comparado con las cañas de guadua.

Es importante presentar un resumen de la comparación que permita verificar la información de manera global y sintetizada, la Tabla 5. En términos generales se logra desarrollar tubería a partir de un material compuesto con propiedades mecánicas estadísticamente comparables con las de las cañas de guadua, además se pudo reducir la variación natural de las propiedades con el desarrollo del material compuesto. Sumado a lo anterior se tiene una propagación controlada de grieta para la tubería y se tiene autonomía en la geometría de los perfiles, ventajas que no se evidencian en el desempeño de las cañas de guadua en el estudio de referencia [9].

Tabla 5. Resumen de la comparación de las propiedades tubería vs cañas

Propiedad	**Promedio**	**Dispersión**
Modulo elástico	Igual	Mejor
Rest. Tensión	Igual	Mejor
Módulo flexión	Peor	Mejor
Rest. Flexión	Igual	Peor
Tenacidad Fract.	Igual	Igual
Densidad	Peor	Peor
Tenacidad	Mejor	Mejor
Moldeable	Si	
Propag. grieta	Mejor	

6 Conclusiones

A partir del presente trabajo se pueden presentar las siguientes conclusiones:

- El proceso de remoción de estructuras de cementación resulta efectivo en el volumen de madera sumergido, ya que no se encontraron diferencia significativa entre los diferentes volúmenes de madera sumergidos, ni tampoco entre las fibras superficiales y las internas como en la combinatoria de ellas.

- Se evidencia una mejora considerable en las propiedades de la resina cuando se acopla con el refuerzo. Por ejemplo la tenacidad a la fractura aumenta más de 66 veces con respecto a la resina. Esto indica que las fibras efectivamente se comportan como refuerzo de la matriz de Poliestireno y que promueven un desempeño mecánico considerablemente mayor que el de la resina.
- El método de manufactura de tubería a partir de un material compuesto resulta exitoso para conformar perfiles tubulares, sin embargo puede ser objeto de mejora en términos de defectos de fabricación dentro del tubo, ya que se propagaron dentro de la zona elástica del material.

- Este material compuesto reforzado con fibras naturales es comparable con las cañas de G.A. en términos de desempeño mecánico. Además en términos generales se disminuye la variación natural del desempeño mecánico a comparación de las cañas.
- El material compuesto desarrollado cuenta con ciertas ventajas de ingeniería que no presentan las cañas naturales:

    - Autonomía en conformación geométrica
    - Aumento en la tenacidad
    - Crecimiento controlado de Grieta

7 Recomendaciones y Trabajo Futuro

Teniendo en cuenta los resultados de esta investigación se proponen algunas recomendaciones para ser tenidas en cuenta en el trabajo futuro:

- Evaluar la opción de tejer o hilar las fibras de guadua extraídas luego del proceso de alcalinización, ya que presentan evidencia de perder rigidez con el tratamiento químico de modo que pueden ser objeto de evaluación con el fin de lograr desarrollos de mayor tamaño
- Mejorar el proceso de manufactura de la tubería de manera que no se presenten los defectos puntuales en la zona elástica, lo cual permite mejorar el desempeño de los perfiles estructurales.
- Evaluar el efecto de variar las condiciones del tratamiento químico sobre las fibras extraídas, ya que en esta investigación se replicó un fragmento del método propuesto por Rokbi, sin embargo no se evaluó el desempeño del material compuesto variando condiciones de tiempo y concentración del hidróxido de sodio
- Evaluar el efecto de cambiar la matriz para obtener mejores propiedades, ya que el Poliestireno presenta algunos criterios con bajo puntaje, puede ahondarse en la investigación de resinas que cumplan con los criterios de selección y presenten un mejor comportamiento mecánico.
- Finalmente se recomienda desarrollar un método de manufactura de tubería más larga, ya que en este trabajo se lograron desarrollos de cerca de 20 cm. Es importante pensar en desarrollos de longitudes más grandes de manera que se pueda empezar a competir en el mercado de materiales estructurales.

8 Bibliografía

1. Ecología, I.N.d., *Manejo y reciclaje de los residuos de envases y embalajes*, ed. SEDESOL. 1993, Mexico D. F.
2. Valencia, S.M.G., *Utilización en Colombia de puentes de circunstancia fabricados en materiales compuestos con refuerzo de fibra de vidrio*. 2001, Uniandes.
3. Rico, A.M., P.d. Guadua, Editor. 2011: http://www.panoramio.com/photo/14389195.
4. Tlapitzalli, *Corte longitudinal de la guadua*. 2010.
5. Dixon, P.G. and L.J. Gibson, *The structure and mechanics of Moso bamboo material*. Vol. 11. 2014.
6. Zakikhani, P., et al., *Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites.* Materials & Design, 2014. **63**: p. 820-828.
7. Antonio Luiz de Barros Salgado, A.A. *Bambusa Guadua en Brasil*. in *I Congreso Mundial del Bambú*. 1992. Pereira.
8. Londoño, X., et al., *Caracterización anatómica del culmo de guadua angustifolia Kunth (Poaceae–Bambusoideae).* Colombia. 12p.
9. Otalora, H., *Selección de materiales para vehículos de tracción humana y su método de manufactura*, in *Documento Interno (Problema Especial). Universidad de los Andes*. 2015, Universidad de los Andes.
10. Bikes, P., *Ramy z Bambusu*. 2014: http://www.mebik.sk/ramy-z-bambusu-bamboo-bike/.
11. Bikes, G., *Gallardo Indomable*. 2013, Gallardo Bikes: www.gallardobikes.co.
12. Chung, D.D.L., *Composite materials. [recurso electrónico] : science and applications*. Engineering Materials and Processes. 2010: London : Springer, 2010. 2nd ed.
13. Abdul Khalil, H.P.S., et al., *Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review.* Materials & Design, 2012. **42**: p. 353-368.
14. Ramirez, F., et al. *Bamboo-guadua fibers for composites*. in *Proc. 15th European Conference on Composite Materials*. 2012.
15. Zakikhani, P., et al., *Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites.* Materials & Design, 2014. **63**: p. 820-828.
16. Castro Medina, L.M., E.A. Marañón León, and C.F. Rodríguez Herrera, *Caracterización de un material compuesto de Pla con fibras del Raquis de la palma de aceite (Elaeis guineensis)*. Tesis (Ingeniero mmecánico). Universidad de los Andes. 2012: Bogotá : Uniandes, 2012.
17. Sukmawan, R., H. Takagi, and A.N. Nakagaito, *Strength evaluation of cross-ply green composite laminates reinforced by bamboo fiber.* Composites Part B: Engineering, 2016. **84**: p. 9-16.
18. Porras Holguín, N.A. and E.A. Marañón León, *Desarrollo y caracterización de materiales compuestos a partir de acido poliláctico (PLA) y tela de bambú*. Tesis (Magíster en Ingeniería Mecánica). Universidad de los Andes. 2009: Bogotá : Uniandes, 2009.
19. Wool, R.P. and X.S. Sun, *Bio-based polymers and composites*. 2005: Amsterdam ; Boston : Elsevier Academic Press, 2005.
20. Walker, A., *Enciclopedia de la madera : 150 tipos de madera del mundo*. 2007: Barcelona : Blume, c2007.
21. Galarga, R., *Lignina*, E.d.l. madera, Editor. 2001: http://www.cerzos-conicet.gov.ar/BoletinCERZOS/2009-16/sabia.htm.
22. Sadava, D.E., *Life : the science of biology*. 2014: Sunderland, Mass. : Sinauer, 2014. Tenth edition.

23. Rokbi, M., et al., *Effect of chemical treatment on flexure properties of natural fiber-reinforced polyester composite.* Procedia Engineering, 2011. **10**: p. 2092-2097.
24. Ku, H., et al., *A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites.* Composites Part B: Engineering, 2011. **42**(4): p. 856-873.
25. Li, X., L.G. Tabil, and S. Panigrahi, *Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review.* Journal of Polymers and the Environment, 2007. **15**(1): p. 25-33.
26. Rout, J., et al., *The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites.* Composites Science and Technology, 2001. **61**(9): p. 1303-1310.
27. Monteiro, S.N., L.A.H. Terrones, and J.R.M. D'Almeida, *Mechanical performance of coir fiber/polyester composites.* Polymer Testing, 2008. **27**(5): p. 591-595.
28. Merchan Rueda, E.A., J.A. Medina Perilla, and G.O. Porras Rey, *Desarrollo y caracterización de un compuesto de fibrocemento reforzado con fibras de guadua*. Tesis (Ingeniero Mecánico). Universidad de los Andes. 2015: Bogotá : Uniandes, 2015.
29. Abdul Khalil, H.P.S., et al., *16 - The use of bamboo fibres as reinforcements in composites*, in *Biofiber Reinforcements in Composite Materials*. 2015, Woodhead Publishing. p. 488-524.
30. Atkins, P.W., *Shriver & Atkins inorganic chemistry*. 2006: Oxford ; New York : Oxford University Press ; New York : W.H. Freeman and Co., 2006. 4th ed.
31. Atkins, P.W. and L. Jones, *Chemical principles : the quest for insight*. 2008: New York : W. H. Freeman, c2008. 4th ed.
32. Brown, T.L. and T.L. Brown, *Química : la ciencia central*. 2004: México : Pearson Educación, c2004 9a. ed.
33. Wu, T., X. Wang, and K. Kito, *Effects of pressures on the mechanical properties of corn straw bio-board.* Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2015. **8**(3): p. 123-129.
34. Landeta, J., *El método Delphi. Una técnica de previsión del futuro*. 1999: Ariel.
35. Mohanty, A., et al., *Effect of process engineering on the performance of natural fiber reinforced cellulose acetate biocomposites.* Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004. **35**(3): p. 363-370.
36. Niño, J., *Moldes para películas por medio de moldeo por compresión*, U.d.l. Andes, Editor. 2016.
37. ASTM, *Standard Test Method for Tensile Strength and Young’s Modulus of Fibers*. 2014, ASTM International.
38. ASTM, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. 2014, ASTM International.
39. ASTM, *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. 2013, ASTM International.
40. ASTM, *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*. 2010, ASTM International.
41. ASTM, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. 2015, ASTM International.