

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN MATERIAL  
COMPUESTO LAMINADO ELABORADO A PARTIR DE LA CORTEZA DE LA  
PALMA DE LATA

DANIEL GEOVANNY CHÁVEZ PACHÓN

FAUSTO ANDRÉS GARCÍA PEÑA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2016

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN MATERIAL  
COMPUESTO LAMINADO ELABORADO A PARTIR DE LA CORTEZA DE LA  
PALMA DE LATA

DANIEL GEOVANNY CHÁVEZ PACHÓN

FAUSTO ANDRÉS GARCÍA PEÑA

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Director

ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS

Ingeniero Mecánico, Ph.D

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2016

## DEDICATORIA

*A Dios y a mi madre Dulcelina, por acompañarme en todo momento y lugar durante la realización de este trabajo.*

*A mi padre y hermanos, Jorge, Eddy y Tato, por la compañía y el apoyo brindado en cada una de las etapas de la realización de este proyecto, Gracias.*

*A mi abuelita Margarita, por sus consejos y cariño incondicional.*

*A mi sobrino Santiago, que no tiene ni idea que ya me voy a graduar.*

*A Paola, por ser un apoyo constante durante este año, gracias.*

*A Senobia, por su cuidados y palabras de apoyo.*

***Daniel Geovanny Chávez Pachón***

## DEDICATORIA

*A Dios por otorgarme las capacidades y destrezas necesarias para  
cumplir con esta etapa.*

*A mis queridos padres, Faustino y María, por ser un apoyo  
incondicional en la culminación de mis proyectos y por inculcarme  
valores que hasta el día de hoy han sido de vital importancia para  
mi formación como persona, Gracias.*

*A mis hermanas, Sonia y Marcela, por sus consejos y cariño  
incondicional.*

*A mi sobrino Diego Alejandro, por ser tan especial y sacarme  
sonrisas en los momentos difíciles.*

***Fausto Andrés García Peña***

## **AGRADECIMIENTOS**

Al director del trabajo de grado, el ingeniero Alberto David Pertuz Comas, por su paciencia, apoyo y orientación para llevar a cabo este proyecto.

Al codirector del trabajo de grado, el diseñador industrial Germán Adolfo Díaz Ramírez, por sus importantes orientaciones en los procesos para la manufactura de las probetas y sus aportes a lo largo de todo el proceso de investigación.

Al laboratorio de microscopía electrónica de Guatiguará por su colaboración para la elaboración de las microscopías electrónicas y recubrimientos.

A la escuela de diseño y al técnico encargado por el préstamo de los talleres y la asesoría brindada para la elaboración de las probetas.

A la escuela de ingeniería mecánica por el préstamo oportuno de la máquina universal de ensayos MTS.

A la escuela de metalúrgica por su colaboración para la realización de los ensayos de dureza, estereoscopías y demás.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	19
1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	20
2. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA .....	22
3. OBJETIVOS .....	23
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
4. MARCO TEÓRICO .....	24
4.1 REFERENTES TEÓRICOS .....	24
4.1.1 Palma de lata ( <i>Bactris Guineensis</i> ) .....	24
4.1.1.1 El tallo .....	24
4.1.2 Material compuesto.....	25
4.1.2.1 Clasificación general: .....	26
4.1.3 Encolado de la madera .....	27
4.1.4 Dureza .....	27
4.1.4.1 Ensayo de dureza Vickers .....	28
4.1.5 Ensayo de tracción estático .....	28
4.1.5.1 Diagrama esfuerzo vs. deformación .....	29
4.1.5.2 Módulo de elasticidad .....	30
4.1.6 Falla por fatiga .....	30
4.1.6.1 Método del esfuerzo-vida.....	31

4.1.6.2	Esfuerzo fluctuante .....	32
4.1.7	Análisis de Weibull.....	34
4.1.8	Análisis de fractura .....	35
4.1.8.1	Fractura.....	35
4.1.8.2	Fractografía.....	35
4.2	ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....	36
4.2.1	A nivel nacional.....	36
4.2.2	A nivel internacional.....	37
5.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	43
5.1	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	44
5.2	FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS .....	45
5.2.1	Dimensionamiento de las probetas.....	45
5.2.2	Materia prima.....	46
5.2.3	Secado.....	46
5.2.4	Proceso de cortado.....	47
5.2.4.1	Primer corte .....	47
5.2.4.2	Segundo corte.....	47
5.2.4.3	Tercer corte.....	48
5.2.4.4	Cuarto corte .....	48
5.2.5	Pegue y prensado.....	49
5.2.6	Cepillado.....	49
5.2.7	Espesor.....	50
5.2.8	Lengüetas .....	50
5.2.8.1	Dimensionamiento .....	51

5.2.8.2 Pegue y prensado.....	51
5.2.9 Corte final.....	52
5.2.10 Lijado .....	52
5.3 PRUEBAS PRELIMINARES Y DEFINICIÓN DE VARIABLES .....	52
5.4 SELECCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO .....	54
5.5 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO .....	54
5.5.1 Ensayo de dureza Vickers .....	54
5.5.1.1 Pulido.....	54
5.5.1.2 Recubrimiento.....	55
5.5.1.3 Ejecución del ensayo .....	55
5.5.2 Ensayo de tracción por tipo de fibra.....	56
5.5.3 Ensayo de tracción del material compuesto.....	57
5.5.4 Ensayo de fatiga del material compuesto .....	58
5.5.5 Análisis de la fractura.....	58
6. RESULTADOS Y SU RESPECTIVO ANÁLISIS .....	59
6.1 PRUEBAS PRELIMINARES .....	59
6.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO .....	60
6.2.1 Ensayo de dureza Vickers .....	60
6.2.2 Ensayo de tracción según el tipo de fibra .....	62
6.2.3 Ensayo de tracción del material compuesto.....	64
6.2.4 Ensayo de fatiga del material compuesto .....	66
6.2.5 Análisis de la fractura.....	69
6.2.5.1 Análisis estático .....	70
6.2.5.2 Análisis de fatiga.....	72

7.	CONCLUSIONES.....	74
8.	RECOMENDACIONES.....	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sección transversal del tallo de la palma de lata .....	25
Figura 2. Diagrama esfuerzo vs. deformación .....	29
Figura 3. Diagrama $\sigma$ -N .....	32
Figura 4. Principales patrones de esfuerzo de los elementos de máquinas .....	33
Figura 5. Proceso de ejecución del proyecto .....	43
Figura 6. Dimensiones de las probetas.....	45
Figura 7. Tallo de la palma de lata.....	46
Figura 8. Primer corte .....	47
Figura 9. Segundo corte .....	47
Figura 10. Tercer corte .....	48
Figura 11. Cuarto corte .....	48
Figura 12. Primer pegue y prensado.....	49
Figura 13. Cepillado.....	50
Figura 14. Espesor final de la probeta .....	50
Figura 15. Prensado de las lengüetas .....	51
Figura 16. Probeta terminada .....	52
Figura 17. Secciones del área transversal del tallo según el tipo de fibras que las componen .....	53

Figura 18. Probetas con defectos .....	53
Figura 19. Probeta recubierta para el ensayo de microdureza .....	55
Figura 20. Puntos del tallo donde se tomaron las muestras de dureza .....	56
Figura 21. Probetas por tipo de fibra.....	56
Figura 22. Probetas para ensayos de tracción estática .....	57
Figura 23. Estereoscopia del área transversal del tallo .....	61
Figura 24. Ensayo de tracción según tipo de fibra .....	62
Figura 25. Relación entre la dureza y el esfuerzo según tipo de fibra .....	63
Figura 26. Resultados obtenidos de los ensayos de tracción estáticos .....	64
Figura 27. Diagrama de Wöhler $\sigma$ vs. N.....	67
Figura 28. Gráfico comparativo de esfuerzo vs. número de ciclos.....	69
Figura 29. Microscopía electrónica de corteza de palma de lata .....	70
Figura 30. Fractura de ensayo de tracción .....	71
Figura 31. Microscopía electrónica de muestra ensayada a tracción .....	71
Figura 32. Microscopía electrónica en probetas de fatiga.....	73

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultados de ensayos de fatiga en tracción-tracción.....	66
Tabla 2. Resultado de los ensayos de fatiga .....	72

## LISTA DE ANEXOS

**Los anexos correspondientes al presente trabajo de grado se pueden encontrar en el CD adjunto.**

Anexo A Máquinas.

Anexo B Rechazos.

Anexo C Tomas de humedad.

Anexo D Probetas para ensayos preliminares.

Anexo E Ensayo de dureza Vickers.

Anexo F Probetas según tipo de fibra.

Anexo G Probetas para ensayos estáticos.

Anexo H Probetas para ensayos de fatiga.

Anexo I Programación del ensayo estático y dinámico.

Anexo J Ensayos preliminares (datos).

Anexo K Ensayos promedio según tipo de fibra (datos).

Anexo L Ensayos estáticos (datos).

## RESUMEN

### TÍTULO:

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN MATERIAL COMPUESTO LAMINADO ELABORADO A PARTIR DE LA CORTEZA DE LA PALMA DE LATA.\***

### AUTORES:

Daniel Geovanny Chávez Pachón.

Fausto Andrés García Peña.\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Materiales compuestos, Palma de lata, Fibras naturales, Dureza, Curva  $\sigma$  vs.  $\varepsilon$ , Curva  $\sigma$  vs. N.

**RESUMEN:** En el presente trabajo de grado se investiga sobre los materiales alternativos de origen natural que pueden ser usados como insumos para la fabricación de materiales compuestos encolados laminados. Para tal fin se caracterizaron las propiedades tanto estáticas como dinámicas de un material compuesto encolado laminado, en el cual se usa corteza de la palma de lata (*Bactris Guineensis*) como constituyente esencial para la fabricación del mismo. A través de dicha caracterización se logró evidenciar que las propiedades de dureza en la corteza del tallo de la palma de lata y resistencia a la tracción en esta misma zona alcanzan valores de hasta 27,5 [HV] y 354 [MPa]. Sin embargo, dichas propiedades se ven altamente degradadas a medida que se toman zonas de muestra que contienen fibras de áreas más hacia el interior del tallo. Con base en evidencia que la corteza del tallo de la palma de lata presenta ciertas características de fragilidad y un esfuerzo último de resistencia a la tracción promedio de 247 [MPa]. Finalmente, se calculan las constantes de la curva  $\sigma$ -N propuesta por Basquin, la cual se representa como  $\sigma=A \cdot N^b$ , donde las constantes presentan valores de  $A=322$  y  $b=-0,0601$ .

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Alberto David Pertuz Comas.

## ABSTRACT

**TITLE:**

**STUDY OF DYNAMIC BEHAVIOR OF A COMPOSITE LAMINATED MATERIAL MADE OF THE BARK OF LATA'S PALM.\***

**AUTHORS:**

Daniel Geovanny Chávez Pachón.

Fausto Andrés García Peña.\*\*

**KEYWORDS:** Composite materials, Lata's palm, Natural fiber, Hardness, Curve  $\sigma$  vs.  $\epsilon$ , Curve  $\sigma$  vs. N.

**ABSTRACT:** In the present degree work are investigated the principal alternative materials of natural or organic origin that can be used as supplies of composite laminated glued materials used in the industry. For this reason, were characterized both static and dynamic properties of a composite laminated glued material made of the stem of lata's palm (*Bactris Guineensis*) as principal constituent for the elaboration of this. Through these studies can be evidence that the properties of hardness and ultimate tensile strength reach values up to 27.5 [HV] and 354 [MPa] in the perimeter zone of the stem of the lata's palm (*Bactris Guineensis*), however, these properties are degraded in the central zone of the stem, because in that zone the fibers were soft and with a high percent of humidity. Based on the results was obtained the stress-strain diagram purpose by Whöler is possible to evidence that the bark of the stem of lata's palm (*Bactris Guineensis*) has important characteristics of fragility and an ultimate tensile strength average of 247 [MPa], who determine the performance of the material. Finally, the constants of the  $\sigma$ -N curve equation given by Basquin represent as  $\sigma=A*N^b$  were calculated, where the constants are  $A= 322$  and  $b=-0.0601$ .

---

\* Degree work.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Alberto David Pertuz Comas.

## INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos se caracterizan por estar conformados por dos o más materiales distintos y presentar propiedades físicas o químicas determinadas superiores a las de los materiales que lo constituyen. Por estos motivos este tipo de materiales han tenido gran auge en aplicaciones que requieren cierto grupo de propiedades que no convergen naturalmente en un material, como lo son la resistencia mecánica y la baja densidad<sup>1</sup>.

A través de las últimas décadas los materiales compuestos han sido objeto de un gran número de investigaciones, las cuales han abierto la posibilidad de combinar materiales de distintas naturalezas, como por ejemplo los artificiales con los orgánicos<sup>2</sup>.

La presente investigación se refiere al tema de los materiales compuestos hechos a partir de materiales de origen natural y tiene como objeto de estudio el análisis del comportamiento mecánico de la palma de lata (*Bactris Guineensis*) para la fabricación de los mismos.

A través del proceso de investigación se presentaron distintas limitantes, entre las cuales destacan la inexistencia de métodos de manufactura prácticos y depurados para la fabricación de las probetas, el costo de la obtención de la materia prima y la inexistencia tanto de datos del comportamiento dinámico como de las propiedades mecánicas de carácter estático de la corteza de la palma de lata.

---

<sup>1</sup> Introducción a los materiales compuestos [en línea]. Madrid (España): Universidad Carlos III, 2008- [citado 21 de abril de 2016]. Disponible en internet: <<http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo1.pdf>>.

<sup>2</sup> KALAM, A.; SAHARI, B.B.; KHALID, Y. A. y WONG, S. V.; Fatigue behaviour of oil palm fruit bunch fibre/epoxy and carbon fibre/epoxy composites. En: *Journal of Composite Structures*, 2005. vol. 71, no. 1, pp. 34-44.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Debido al reconocimiento que se está teniendo de las afectaciones ambientales sufridas por el planeta tierra, como consecuencia en gran parte de procesos de la industria<sup>3</sup>, es deber de los futuros y actuales ingenieros presentar nuevas propuestas que permitan una mayor empatía entre estos dos campos, el ambiental y el industrial.

Una de las grandes áreas de la ingeniería es la de la manufactura. Hoy en día es bastante común el uso de materiales compuestos en esta, los cuales se emplean en la mayoría de las industrias, entre ellas la de transporte y eléctrica, ya que estas necesitan en gran medida, por ejemplo, materiales ligeros y de alta rigidez, las cuales son propiedades que no conmutan naturalmente en un material<sup>4</sup>.

Normalmente los materiales compuestos que se fabrican y utilizan en la industria están conformados por elementos sintéticos. La fabricación de la mayoría de estos elementos requieren procesos de manufactura que implican la utilización de materias primas o prácticas poco amigables con el medio ambiente, además de ser difíciles de degradar naturalmente una vez termina su vida útil<sup>5</sup>.

Un gran aporte que se puede realizar a la industria manufacturera es el cambio de los materiales que se utilizan en esta y los procesos que ellos requieren, es decir, utilizar materiales renovables y compatibles con el medio ambiente, principalmente

---

<sup>3</sup> El alarmante informe sobre el cambio climático [en línea]. Colombia: Revista Semana, 31 de marzo de 2014- [citado 20 de abril de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.semana.com/mundo/articulo/informe-de-onu-sobre-cambio-climatico-en-el-mundo/382145-3>>.

<sup>4</sup> UNIVERSIDAD CARLOS III. Op. cit., p. 2-6.

<sup>5</sup> VI CONGRESO NACIONAL DE MATERIALES COMPUESTOS. (3: 27-29, junio, 2005: Valencia, España). Actas. Asociación española de materiales compuestos, 2005. 1126 p.

en su deposición final, además de no necesitar procesos que involucren elementos contaminantes.

En la actualidad se está incursionando en la implementación de materiales de origen natural para la fabricación de materiales compuestos, que suplan la misma necesidad de los materiales sintéticos con un similar grado de desempeño, pero con el agregado de reducir drásticamente las afectaciones ambientales. Sin embargo y a pesar de las iniciativas presentadas por diferentes industrias y entes investigadores para llevar a cabo dicha tarea<sup>6</sup>, ha sido una gran barrera para esto la escasez de datos disponibles acerca de las propiedades, principalmente las mecánicas, de estos materiales<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> JOSHI, S.V.; DRZAL, L.T.; MOHANTY, A.K. y ARORA, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. En: Revista Composites: Part A. 2004.vol. 35, p. 371-376.

<sup>7</sup> MAJÓ, Mayugo y ANDREU, Joan. Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas. Cataluña, 2003. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de resistencia de materiales y estructuras.

## 2. JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia, a pesar del alto grado de deforestación que sufren los bosques<sup>8</sup>, aún se cuenta con una gran variedad de flora, donde es posible encontrar una gran gama de propiedades físicas en la vegetación, las cuales pueden ser útiles en distintas aplicaciones ingenieriles.

La palma de lata es bastante común en las zonas cálidas del territorio colombiano y es conocida por sus buenas propiedades de resistencia a diferentes esfuerzos, por lo cual es usada por la gente como elemento de refuerzo para la construcción de casas y como materia prima para la elaboración de distintas herramientas<sup>9</sup>, sin embargo los conocimientos acerca de esta, principalmente los de carácter dinámico, no ahondan más allá de las apreciaciones de quienes la usan en sus labores diarias.

Por lo tanto, es de gran importancia conocer de manera científica las propiedades dinámicas que presenta la palma de lata, y de esta manera establecer un marco de referencia para generar posibles aplicaciones en el campo de la ingeniería y lograr aprovechar esta materia prima que brinda el territorio Colombiano.

---

<sup>8</sup> Monitoreo y seguimiento al fenómeno de la deforestación en Colombia [en línea]. Colombia: Ideam, [citado 21 de abril de 2016]. Disponible en internet: < <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/deforestacion-colombia>>.

<sup>9</sup> GIL Y PRADA. Op. cit., p. 178.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento dinámico de un material compuesto encolado laminado elaborado a partir de la corteza de palma de lata, contribuyendo de esta forma con la misión de la universidad industrial de Santander la cual tiene dentro de sus propósitos el generar y adecuar conocimientos. Además, la participación activa liderando procesos de cambio por el progreso y mejor calidad de vida de la comunidad.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar y contrastar información sobre estudios y aplicaciones realizadas con base a materiales compuestos de materiales orgánicos.
- Realizar ensayo de tracción del material compuesto bajo condiciones estáticas. Basados en la norma ASTM D 3039/D 3039M – 07<sup>10</sup>.
- Estudiar el comportamiento dinámico del material compuesto bajo condiciones de carga de tracción-tracción. Basados en la norma ASTM D 3479 /D 3479M–12<sup>11</sup>.
- Realizar el estudio fractográfico de la zona fracturada.

---

<sup>10</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM D 3039/D 3039M – 07. Montgomery: ASTM, 2007. p. 0-13.

<sup>11</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM D3479/D3479M–12. Montgomery: ASTM, 2012. p. 0-6.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 REFERENTES TEÓRICOS

**4.1.1 Palma de lata (*Bactris Guineensis*).** Esta planta perteneciente a la familia de las palmeras (Arecaceae) se encuentra comúnmente en regiones cálidas como lo son las costas del Caribe y el Pacífico, y también en países como Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Venezuela y Colombia, preferiblemente a una altura no mayor a 100 [msnm]. Son reconocidas por su fruto el cual se le llama dependiendo del país y región como corozo, uvita, píritu o coyol y se utiliza en un gran número de postres y bebidas típicas<sup>12</sup>.

**4.1.1.1 El tallo.** Comúnmente el tallo de la palma de lata tiene entre 3 y 5 [m] de altura y un diámetro de entre 1,5 y 3 [cm], y se reconocen por ser abundantemente espinos. Entre el 60 y 65 % de la sección del tallo se encuentra constituido por células leñosas blandas, porosas y de color claro ubicadas en la parte central, las cuales se encargan de la conducción del agua y sales minerales, el porcentaje restante se compone en su mayoría de la corteza de la palma, la cual es más densa en las plantas de menor diámetro y tiene un espesor aproximado de entre 0,5 y 5 [mm]. Además, existe una zona de interfaz entre estas dos partes mencionadas<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> GIL Y PRADA. Op. cit., p. 32-35.

<sup>13</sup> Ibid., p. 37.

Figura 1. Sección transversal del tallo de la palma de lata



Fuente: GIL GONZÁLES, Ivonne Johana y PRADA GARZÓN, Ronny Germán. Análisis y caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de la palma de lata. Bucaramanga, 2008. Trabajo de grado (Ingenieros Civiles). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. p. 38.

**4.1.2 Material compuesto.** Es aquel conformado por dos o más materiales distintos y presenta algunas propiedades físicas o químicas determinadas superiores a las de los materiales que lo constituyen. Dentro de las propiedades mejoradas de mayor interés ingenieril se encuentran:

- Resistencia mecánica.
- Rigidez.
- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia al desgaste.
- Ligereza.
- Resistencia a la fatiga.
- Aislamiento térmico y acústico.

Uno de los materiales compuestos utilizado en la antigüedad es por ejemplo, los adobes reforzados con paja. En la naturaleza también encontramos materiales compuestos como lo son el nido de una golondrina o las fibras de la madera, aunque estas últimas se consideran compuestas en un carácter microscópico. Para efectos del presente trabajo de grado el concepto de material compuesto se restringe al caso de un material formado por la combinación de varios materiales y que, macroscópicamente, resulte heterogéneo<sup>14</sup>.

#### **4.1.2.1 Clasificación general:**

- Materiales compuestos formados por una matriz reforzada con fibras de otro material distinto.
- Laminados compuestos que consisten en un conjunto de láminas de diferentes materiales unidas unas a otras.
- Materiales compuestos formados por una matriz reforzada con partículas de otro material diferente.

Para los materiales correspondientes a la primera categoría se observa que el material compuesto mejora su resistencia en tres órdenes de magnitud. Por ejemplo, el caso comparativo entre una placa de vidrio que rompe entre los 30 y 70 [MPa] y una fibra de vidrio que resiste entre 3 y 5 [GPa]<sup>15</sup>.

---

<sup>14</sup> UNIVERSIDAD CARLOS III. Op. cit., p 2-6.

<sup>15</sup> Ibid., p. 5.

**4.1.3 Encolado de la madera.** Hace referencia al empleo de adhesivos para unir piezas o elementos de madera. Los primeros usos de este tipo de materiales datan de la época de los egipcios donde los sarcófagos de los faraones poseían chapas de madera encolada.

Para tener una buena unión encolada es necesario que el adhesivo tenga inicialmente buena liquidez, y prensar cuando el adhesivo empiece a fraguar, es decir, a perder movilidad o liquidez. Estas condiciones aseguran mejor penetración del adhesivo en la madera<sup>16</sup>.

**4.1.4 Dureza.** Propiedad de los materiales a resistirse a ser rayados o penetrados, normalmente se relacionan con la solidez y firmeza del mismo y está directamente ligada a las propiedades elásticas y plásticas. Para el cálculo de esta se realizan diferentes tipos de ensayo de penetración, los cuales se clasifican, basados en el tamaño de la huella que dejan estos sobre el material, en dos tipos: macrodureza como el ensayo Brinell y el Rockwell y los ensayos de microdureza como el Vickers y el Knoop<sup>17</sup>.

En el presente trabajo se utiliza para el cálculo de la dureza el ensayo tipo Vickers. Esto se hace con base en la disponibilidad del equipo para la realización el mismo y en que las zonas en las que se realizarán las pruebas son áreas pequeñas y por ende las huellas deben ser de esta misma índole.

---

<sup>16</sup> Los adhesivos y el encolado de la madera [en línea]. Disponible en internet: <[http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:PMVXAUSQXucJ:infomadera.net/uploads/productos/informacion\\_general\\_6\\_adhesivos.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=mx](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:PMVXAUSQXucJ:infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_6_adhesivos.pdf+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=mx)>.

<sup>17</sup> VERGARA, Camacho y MARTINEZ, Norma. Apuntes de Ciencia de los Materiales II. México: Instituto Politécnico Nacional Esime Azcapotzalco, 2008. 109 p.

**4.1.4.1 Ensayo de dureza Vickers.** Prueba de penetración en la cual se aplica una carga predeterminada y de carácter compresivo sobre la superficie del material bajo la acción de un penetrador. Este penetrador varía en su forma y material dependiendo del tipo de probeta a ensayar.

Finalmente se miden la longitud de las diagonales de la huella resultante al retirar la carga, para efectos del cálculo de la dureza Vickers. En la actualidad gran parte de los equipos procesan la información y brindan directamente el resultado<sup>18</sup>.

**4.1.5 Ensayo de tracción estático.** Este ensayo permite calcular las propiedades de los materiales que se relacionan con el diagrama de esfuerzo vs. deformación, entre dichas propiedades encontramos el esfuerzo último de resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad. Para la aplicación de esta prueba la carga se ejerce de forma gradual, para proporcionar suficiente tiempo a fin de que la deformación se desarrolle en su totalidad. Además, la muestra se ensaya hasta su destrucción, por lo cual los esfuerzos sólo se aplican una vez, es decir, bajo condiciones consideradas como estáticas. Dicha condición se aproxima en gran medida a las condiciones reales a las que se someten muchos elementos estructurales de máquinas<sup>19</sup>.

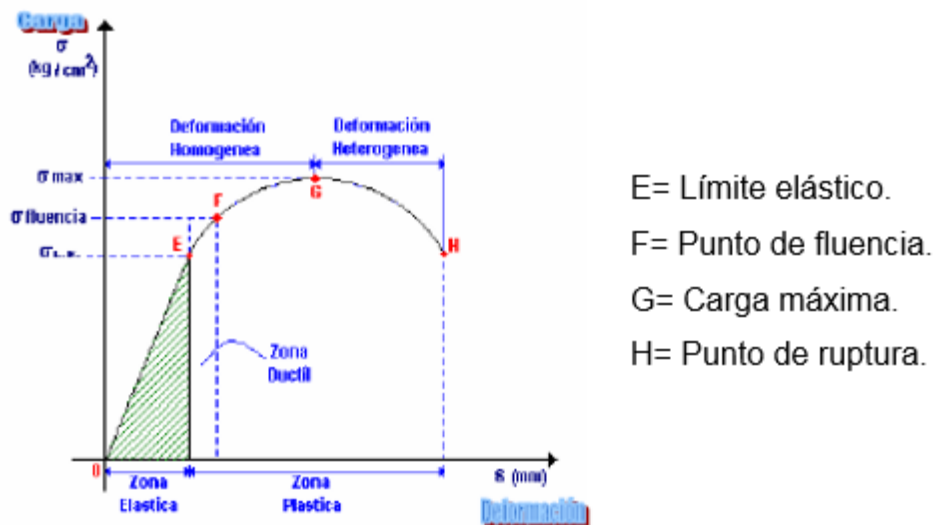
---

<sup>18</sup> Ibid., p. 27.

<sup>19</sup> BUDYNAS, Richard y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México: Instituto Politécnico Nacional Esime Azcapotzalco, 2008. 109 p. México: McGraw-Hill, 2008. 1092 p. ISBN-13: 978-0-07-312193-2.

**4.1.5.1 Diagrama esfuerzo vs. deformación.** En la Figura 2, se presenta un diagrama de este tipo en forma genérica. En algunos casos, cuando los materiales son muy frágiles; las zonas elásticas y plásticas son mucho más pequeñas, principalmente la segunda, es decir, las deformaciones son de pocos milímetros. También ocurre en este tipo de materiales que los puntos G y H se encuentran casi en el mismo nivel de esfuerzo, y este es bastante alto. Por el contrario cuando los materiales son altamente dúctiles estos tienden a deformarse en gran medida, tanto en su zona elástica como plástica, sin embargo, los niveles de esfuerzo máximo o último de resistencia a la tracción son bajos<sup>20</sup>.

Figura 2. Diagrama esfuerzo vs. deformación



Fuente: VERGARA, Camacho y MARTINEZ, Norma. Apuntes de Ciencia de los Materiales II. México: Instituto Politécnico Nacional Esime Azcapotzalco, 2008. p. 32.

<sup>20</sup> VERGARA y MARTINEZ. Op. cit., p. 32.

**4.1.5.2 Módulo de elasticidad.** Es un parámetro que permite caracterizar el comportamiento de un material elástico, dependiendo de la dirección de aplicación de una fuerza. Este se determina en la primera parte del ensayo de tensión, cuando el material se deforma elásticamente. Para efectos numéricos este se puede calcular por medio de la Ley de Hooke, donde:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [PSI]; [Pa]$$

E= Módulo de elasticidad.

$\sigma$ = Esfuerzo.

$\varepsilon$ = Deformación.

Este módulo se relaciona directamente con la fuerza de enlace entre los átomos del material, siendo mayor en materiales rígidos, como el metal, que en los dúctiles<sup>21</sup>.

**4.1.6 Falla por fatiga.** Generalmente cuando los elementos de máquinas fallan bajo la acción de esfuerzos repetidos o fluctuantes, durante el análisis de la falla se revela que los esfuerzos máximos reales a los que se encontraba sometido la pieza o elemento se encuentran por debajo de la resistencia última del material y en algunas ocasiones incluso por debajo de la resistencia a la fluencia. Cuando la característica más notable de la falla es que se produce bajo esfuerzos que se repitieron un gran número de veces, se determina que la causa fue la fatiga.

Las fallas por fatiga tienen una apariencia similar a la fractura frágil, dado que las superficies no presentan mayor adelgazamiento en el caso de elementos

---

<sup>21</sup> Ibid., p. 34.

metálicos y por ende una pequeña deformación. Sin embargo, a diferencia de las fallas estáticas, las fallas por fatiga se desarrollan de manera muy distinta y a través de tres etapas. La primera etapa es el inicio de una o más microgrietas las cuales no se pueden detectar a simple vista. Durante la segunda etapa dichas microgrietas aumentan su tamaño y forman superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas longitudinales. Finalmente en la etapa tres se produce una fractura súbita y rápida durante el ciclo de esfuerzo final<sup>22</sup>.

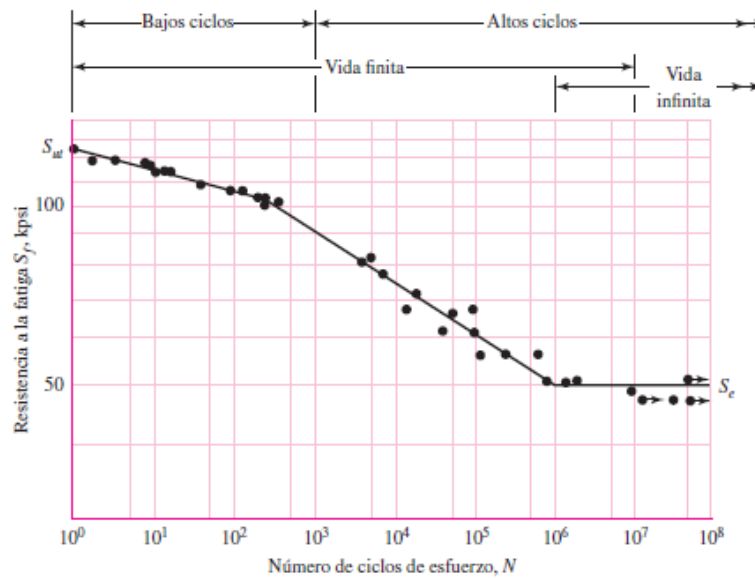
**4.1.6.1 Método del esfuerzo-vida.** Aunque este método no es el más exacto, debido a su carácter estadístico y su dependencia del número de muestras, si es el más usado debido a su practicidad en la aplicación e interpretación. En este caso para determinar la resistencia de los materiales en fatiga, las muestras se someten a fuerzas repetidas o variables y de magnitudes específicas, mientras se cuentan los ciclos del esfuerzo hasta su destrucción<sup>23</sup>. Como conclusión de estos ensayos se genera un diagrama de esfuerzo-vida ( $\sigma$ -N), como el mostrado a continuación.

---

<sup>22</sup> BUDYNAS y NISBETT. Op. cit., p. 258.

<sup>23</sup> Ibid., p. 265.

Figura 3. Diagrama  $\sigma$ -N

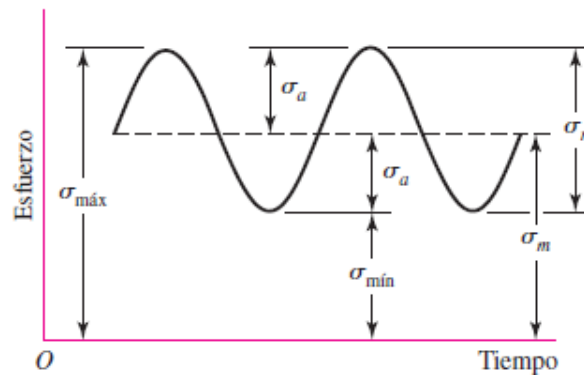


Fuente: BUDYNAS, Richard y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México: Instituto Politécnico Nacional Esime Azcapotzalco, 2008. 109 p. México: McGraw-Hill, 2008. ISBN-13: 978-0-07-312193-2. p. 266.

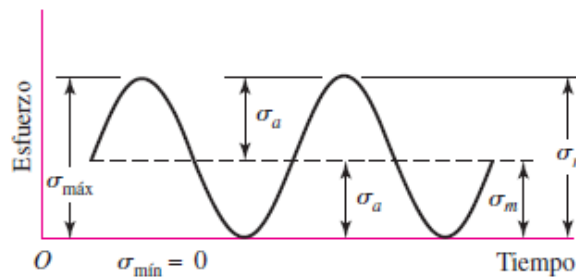
**4.1.6.2 Esfuerzo fluctuante.** Generalmente los esfuerzos fluctuantes a los que se someten las máquinas adoptan un patrón sinusoidal. Sin embargo, no se descarta la aparición de patrones erráticos y poco predecibles. Dos factores que determinan el comportamiento de dicho patrón son el esfuerzo alternante ( $\sigma_a$ ) y el esfuerzo medio ( $\sigma_m$ )<sup>24</sup>. A continuación se presentan los principales patrones de esfuerzo, y se identifican sus respectivos componentes. El patrón usado en el presente trabajo de grado será el mostrado en la Figura 4.a.

<sup>24</sup> Ibid., p. 292-294

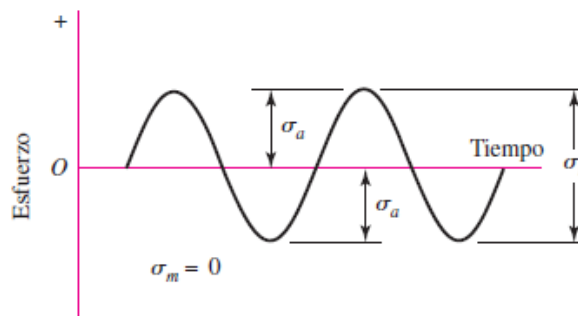
Figura 4. Principales patrones de esfuerzo de los elementos de máquinas



a)



b)



c)

Fuente: BUDYNAS, Richard y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México: Instituto Politécnico Nacional Esime Azcapotzalco, 2008. 109 p. México: McGraw-Hill, 2008. 1092 p. ISBN-13: 978-0-07-312193-2. p. 293.

Un aspecto importante para la definición del patrón de esfuerzos es la razón de esfuerzo (R), la cual se define como<sup>25</sup>:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

**4.1.7 Análisis de Weibull.** La distribución de Weibull es un método estadístico de probabilidad continua el cual depende de tres parámetros conocidos como la localización, forma y escala. Estos parámetros proporcionan a este modelo una gran flexibilidad.

*“El parámetro umbral o parámetro de localización indica el origen de tiempos. El parámetro de forma se define en términos del exponente de la función potencial que determina la razón de fallo del modelo. En términos de este parámetro se definirá la monotonía de la razón de fallo”<sup>26</sup>.* Cabe resaltar que si en algún momento el parámetro de localización llega a ser cero la distribución de Weibull se conoce como una distribución de dos parámetros.

La distribución de Weibull está dada por las siguientes ecuaciones que son la densidad de probabilidad y la función de distribución.

---

<sup>25</sup> Ibid., p. 294

<sup>26</sup> RUIZ, María. Modelos Aleatorios Aplicados [en línea]. Granada (España): Universidad de Granada, 2004- [citado 18 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <[http://www.ugr.es/~mruiz/temas/Resumen\\_T3.pdf](http://www.ugr.es/~mruiz/temas/Resumen_T3.pdf)>.

$$f_T(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\}$$

$$F_T(t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\}$$

Denotando  $\eta$  el parámetro de escala y  $\beta$  el parámetro de forma<sup>27</sup>.

**4.1.8 Análisis de fractura.** Para realizar el análisis de fractura de un hay que tener en cuenta que este puede involucrar diversas disciplinas entre la cuales se encuentran: mecánica del medio continuo, física estadística, ciencia de materiales, física de estado sólido, geometría fractal y fractografía entre otras.

**4.1.8.1 Fractura.** La fractura es generada cuando ocurre la separación o fragmentación de un objeto bajo la influencia de un esfuerzo aplicado. Al ocasionarse la fractura se crean nuevas superficies, estas son llamadas comúnmente como superficies de fractura<sup>28</sup>.

**4.1.8.2 Fractografía.** La fractografía es la inspección macroscópica y microscópica de la zona en la cual se ha generado la fractura. A través de ella se busca dilucidar cualitativamente mediante una inspección visual los rasgos que presenta dicha fractura<sup>29</sup>.

---

<sup>27</sup> Ibid., p. 1 y 2.

<sup>28</sup> ORTÚZAR, Raúl. Revista de Marina. Mecánica de fractura en estructuras navales [en línea], [citado 18 de junio de 2016]. Disponible en internet: < <http://revistamarina.cl/revistas/2000/1/ortuzar.pdf>>.

<sup>29</sup> IPOHORSKI, Miguel y ACUÑA, R.J. Fractografía: Aplicaciones al análisis de fallas [en línea]. Buenos Aires (Argentina): Comisión nacional de energía atómica, 1988. [citado 18 de junio de 2016]. Disponible en internet: < <http://www2.cnea.gov.ar/cac/ci/CICACInformes/cicacInformeCNEA490.pdf>>.

## 4.2 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Debido a que los materiales compuestos hechos a partir de materiales de origen natural no se estudian sino desde finales del siglo pasado, los antecedentes sobre investigaciones realizadas de estos a nivel regional y nacional son bastante escasos y en aspectos como la fatiga aún en mayor medida, pues existen gran número de limitantes, entre las cuales una de las principales es la falta de equipos para realizar los ensayos necesarios.

**4.2.1 A nivel nacional.** En estudios realizados en 2008 por Gil y Prada<sup>30</sup>, donde se analizaron y caracterizaron las propiedades mecánicas de la palma de lata (*Bactris Guineensis*), se concluye que la humedad de la misma es considerable tanto interior de su tallo como en la corteza, presentándose una humedad general del 50,99 %, en ambas partes. Además, se calculó que la corteza de esta palma resiste en tracción hasta 305 [MPa]. Sin embargo, en este caso se realizó a una lámina de la corteza de la palma, por ende, no se considera a este como un material compuesto encolado laminado.

En el presente estudio se realizó este mismo ensayo pero con láminas de la corteza unidas con un pegamento, para así poderla categorizar como un material compuesto encolado laminado, y compararlo con otros materiales compuestos realizados a partir de otros materiales de origen natural como el cáñamo, el bambú, el kenaf y el sisal.

Para el año 2014 Takeuchi<sup>31</sup> realizó estudios de las propiedades mecánicas de un material laminado elaborado a partir de bambú (*Guadua angustifolia*) y encontró

---

<sup>30</sup> GYL y PRADA. Op. cit., p. 63 y 71.

<sup>31</sup> TAKEUCHI, Caori Patricia. Caracterización mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural. Bogotá, 2014. Tesis (Doctor en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

que este posee esfuerzos últimos de resistencia a la tracción de 120 [MPa] en promedio.

**4.2.2 A nivel internacional.** En 1998 Bond y Ansell<sup>32</sup> quienes estudiaron el comportamiento a la fatiga de las uniones en bisel de materiales compuestos de madera usados en la manufactura de las palas para turbinas aerogeneradoras, mostraron que este tipo de uniones son bastante críticas pues son concentradores para el desarrollo de la falla por fatiga. Los resultados también mostraron que las curvas de esfuerzo versus número de ciclos para cada una de las maderas utilizadas fueron bastante similares. Lo anterior permitió la formulación de una curva maestra para predecir el comportamiento de las uniones en bisel en materiales compuestos de diferentes clases de madera bajo de cargas reversibles.

En cuanto a estudios de maderas laminadas podemos ver que en el 2001 Hacker y Ansell<sup>33</sup> destacaron la posibilidad de realizar estudios con este tipo de material sin necesidad de realizar modificaciones en el mismo para que no sufran daños por parte de las mordazas de las máquinas de ensayos, lo cual es un factor crítico a la hora de realizar los mismos, ya que si las probetas se ven afectadas por este agarre los datos de las pruebas no serán los deseados, por ende en el presente trabajo se considera la posibilidad inicial de realizar únicamente el refuerzo para el agarre de las probetas propuesto por la norma establecida previamente para los ensayos de tracción y fatiga.

---

<sup>32</sup> BOND, I.P. y ANSELL, M.P. Fatigue properties of jointed wood composites: Part I Statistical analysis, fatigue master curves and constant life diagrams. En: Journal of materials science. 1998. vol. 33, p. 2751-2762.

<sup>33</sup> HACKER, C.L y ANSELL, M.P. Fatigue damage and hysteresis in wood-epoxy laminates. En: Journal of materials science. 2001. vol. 36, p 609-621.

Además, Majó y Andreu<sup>34</sup> realizaron investigaciones en el año 2003 donde resaltan la importancia que tiene en la fatiga, el que los materiales naturales sean heterogéneos y anisotrópicos, agregado a que comúnmente presentan discontinuidades o defectos, los cuales son introducidos en muchas ocasiones durante el proceso de fabricación de las probetas, debido a que esta manufactura en algunos casos es bastante artesanal. Los autores resaltan que los elementos mencionados anteriormente *“originan estados de tensión tridimensional que constituyen un gran obstáculo para reflejar de manera eficiente las consecuencias en la acumulación de daño por fatiga”*<sup>35</sup>. Además, son los que normalmente determinan el comportamiento de estos materiales bajo cargas cíclicas, pues tienden a ser los causantes primarios de la falla. Estos autores también contribuyen a reforzar uno de los precedentes establecidos como causa para la realización del presente trabajo pues aunque este fenómeno de falla llamado fatiga es conocido desde mediados del siglo XIX, instituyen que aún es difícil *“desarrollar un marco conceptual que permita predecir la forma de deterioro microestructural según un estado de cargas, su evolución, su interacción y su influencia sobre las propiedades mecánicas del material”*<sup>36</sup> y de esta manera definir valores de la esperanza de vida de elementos estructurales para poder realizar diseño que se ajusten a los requisitos de vida establecidos para los mismos<sup>37</sup>.

En este mismo año (2003) Wambua, Ivens y Verpoest<sup>38</sup> a través de un estudio comparativo resaltan las ventajas de usar cáñamo por encima del vidrio para la fabricación de materiales compuestos, siempre y cuando las aplicaciones sean aptas para este. Se puede evidenciar a través de este estudio que el cáñamo posee una menor densidad, costos más bajos y es un recurso renovable y

---

<sup>34</sup> Majó y Andreu. Op. cit., p. 2-8

<sup>35</sup> Ibid., p. 21.

<sup>36</sup> Ibid., p. 1.

<sup>37</sup> Ibid., p. 1.

<sup>38</sup> WAMBUA, Paul; IVENS, Jan y VERPOEST, Ignaas. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. En: Revista Composites Science and Technology. 2003. vol. 63, p. 1259-1264.

reciclable. Además, requiere cantidades considerablemente más bajas de energía para su fabricación y no es abrasivo ni presenta mayor riesgo para salud cuando es inhalado.

Como consecuencia de los estudios que se venían realizando se pudo observar que varios autores como D' Almeida, Aquino y Monteiro<sup>39</sup>; De Andrade, Chawla y De Toledo<sup>40</sup> y Shah et al.<sup>41</sup> empezaron a realizar estudios en los años 2006, 2008 y 2013 respectivamente, basados en el uso de materiales naturales tales como el sisal, piassava y el yute, como base para la fabricación de materiales compuestos. Comparando con estos estudios se puede concluir que el material que mejor se comporta ante los diferentes tipos de esfuerzos es el cáñamo, únicamente el sisal se equipara a este en la resistencia al impacto. Desafortunadamente el desempeño de dicho material no es comparable con los materiales sintéticos, ya que este soporto 53 [MPa] como máximo en tensión y flexión, lo cual es bastante menor a los esfuerzos soportados por las fibras de vidrio<sup>42</sup>. Sin embargo, los autores resaltan la posibilidad de utilizar dichos materiales como componente principal en diferentes aplicaciones de ingeniería, las cuales no generen altos esfuerzos sobre los mismos.

Por otra parte, Forero<sup>43</sup> analizó en 2007 el mercado de los materiales compuestos y resalta el gran crecimiento que está teniendo el mercado de elementos

---

<sup>39</sup> D' ALMEIDA, J.R.M.; AQUINO, R.C.M.P. y MONTEIRO, S.N. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. En: Revista Composites: Part A. 2006. vol. 37, p. 1473-1479.

<sup>40</sup> DE ANDRADE SILVA, Flavio; CHAWLA, Nikhilesh y DE TOLEDO FILHO, Romildo. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. En: Revista Composites Science and Technology. Octubre, 2008. vol. 68, p. 3438-3443.

<sup>41</sup> SHAH, Darshil; SCHUBEL, Peter; CLIFFORD, Mike y LICENCE, Peter. Fatigue life evaluation of aligned plant fibre composites through S-N curves and constant-life diagrams. En: Revista Composites Science and Technology. Enero, 2013.vol. 74, p. 139-149.

<sup>42</sup> WAMBUA; IVENS y VERPOEST. Op. cit., p.1261.

<sup>43</sup> Las fibras naturales en los materiales plásticos compuestos [en línea]. [citado 21 de abril de 2016]. Disponible en internet: < <http://www.plastico.com/temas/Las-fibras-naturales-en-los-materiales-plasticos-compuestos+3057872>>.

fabricados a partir de estos materiales en Latinoamérica, a pesar de que la participación de esta región en dicho mercado es muy baja en comparación con Estados Unidos y Europa. Es importante para los países que están incursionando en este mercado el generar productos que estén a la vanguardia de los avances mundiales, más aún cuando se están creando directrices donde por ejemplo, la Unión Europea planteó que para el 2015 el 95% de la masa de los automóviles debía ser reutilizable, tal y como se resalta en el documento Materiales compuestos<sup>44</sup>. El ser reutilizables, por ejemplo como carbón, es una de las grandes ventajas de los materiales de origen natural, los cuales son bastante amigables con el medio ambiente en su deposición final.

En cuanto a estudios de fatiga, en el año 2009 Chaplan, Nafa y Guenfoud<sup>45</sup> presentaron algunos aspectos de gran importancia en este tipo de ensayos, dentro de los cuales se encuentran dos que son de particular relevancia para la realización del presente trabajo de grado. El primer aspecto es la frecuencia de trabajo a la cual se realizan estas pruebas, se puede observar que para el caso de los ensayos tanto de tensión como compresión a una frecuencia de 10 [Hz] las probetas alcanzaban un mayor número de ciclos bajo los mismos niveles de esfuerzo en comparación a cuando se sometían a frecuencias de 0,1 [Hz]. El segundo aspecto de relevancia es el estudio del comportamiento de las probetas bajo diferentes relaciones de esfuerzo R, se observa que para este caso las probetas fallan de manera más prematura cuando tenemos un  $R=-1$ .

Entre los años 2012 y 2014, Baño et al.<sup>46</sup> (2012), Estévez et al.<sup>47</sup> (2013) y Martínez<sup>48</sup> (2014) realizaron diversos estudios de tracción en maderas laminadas,

---

<sup>44</sup> Materiales compuestos [en línea]. Málaga (España): Universidad Malacitana, 2004- [citado 21 de abril de 2016]. Disponible en internet: < [http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc\\_docencia/Tema7\\_CM.pdf](http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema7_CM.pdf)>.

<sup>45</sup> CHAPLAIN, Myriam; NAFA, Zahreddine y GUENFOUD, Mohamed. Damage of Glulam Beams Under Cyclic Torsion: Experiments and Modelling. En: Revista Springer science.

<sup>46</sup> BAÑO, V.; ARGÜELLES-BUSTILLO, R.; REGUEIRA, R. y GUAITA, M. Determination of the stress-strain curve in specimens of Scots pine for numerical simulation of defect free beams. En: Revista Materiales de Construcción. 2012. vol. 62, p. 269-284. ISSN: 0465-2746.

en los cuales se puede observar que materiales como los usados para construcción, específicamente de mallas espaciales, presentan baja resistencia a los esfuerzos de tracción paralelos a la fibra con un esfuerzo último de resistencia entre los 15 y 18 [MPa]<sup>49</sup>. En el caso del *Pinus Sylvestris* podemos ver que su respuesta a la tracción es mucho mejor, soportando un esfuerzo último de 89 [MPa]<sup>50</sup> y por último, el tipo de madera laminada que presenta un mejor comportamiento es la hecha a partir del bambú (*Guadua angustifolia*), la cual alcanza esfuerzos últimos de resistencia a la tracción de 120 [MPa]<sup>51</sup>.

Para estudios como el que se realizan en el presente trabajo de grado es importante considerar las implicaciones que representan el uso de un material de origen natural, pues estos se ven afectados por variables que no tienen ningún tipo de afectación sobre los materiales sintéticos. Fotouh, Wolodko y Lipsett<sup>52</sup> en el año 2014 analizaron el efecto de la humedad en las fibras naturales de materiales compuestos, variando el porcentaje de concentración de esta entre un 40 y 0%. Los autores concluyeron que la humedad tiene un efecto negativo sobre el desempeño de este tipo de materiales.

---

<sup>47</sup> ESTEVEZ CIMADEVILA, J; OTERO CHANS, D; MARTIN GUTIERREZ, E y VAZQUEZ RODRIGUEZ, J. Análisis experimental de las barras de madera laminada con sección tubular utilizadas en la construcción de una malla espacial. *Maderas, Cienc. tecnol.* [online]. 2013, vol.15, n.2 [citado 2016-09-19], pp.153-170. Disponible en: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2013000200003&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2013000200003&lng=es&nrm=iso)>.

<sup>48</sup> MARTÍNEZ GARCÍA, Samuel. Bambú como material estructural: Generalidades, aplicaciones y modelización de una estructura tipo. Valencia, 2015. Trabajo de grado (Ingeniero Agrónomo y del medio ambiente). Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Medio Ambiente. 46 p.

<sup>49</sup> ESTEVEZ, OTERO, MARTIN y VAZQUEZ. Op. cit., p. 161.

<sup>50</sup> BAÑO, ARGÜELLES, REGUEIRA y GUAITA. Op. Cit., p. 270.

<sup>51</sup> MARTÍNEZ GARCÍA. Op. cit., p.14.

<sup>52</sup> FOTOUH, Ahmed; WOLODKO, John y LIPSETT, Michael. Fatigue of natural fiber thermoplastic composites. *En: Revista Composites: Part B.* 2014. vol. 62, p. 175-182.

Finalmente, en el presente año (2016) Hunger et al.<sup>53</sup> analizaron la posibilidad de someter a ensayos de fatiga maderas laminadas duras, ya que un aspecto de gran importancia en las mismas es la adhesión entre láminas. Los autores evaluaron el comportamiento de las uniones en pruebas de fatiga y tracción y concluyeron que el comportamiento de estas es muy similar al de las maderas blandas, la cuales son las más estudiadas y tienen un muy buen desempeño.

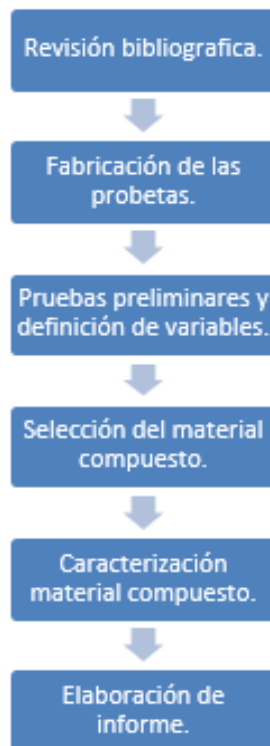
---

<sup>53</sup> HUNGER, Frank; STEPINAC, Mislav y RAJCIC, Vlatka. Pull-compression test on glued-in metric thread rods parallel to grain in glulam and laminated veneer lumber of different timber species En: European Journal of Wood and Wood Products. Enero, 2016.

## 5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL<sup>(\*)</sup>

Para la obtención de las propiedades mecánicas del material compuesto encolado laminado elaborado a partir de la corteza de palma de lata, es necesario realizar una caracterización dinámica y estática del mismo. Para tal fin se planifica y diseña una metodología para la ejecución de los ensayos de tracción correspondientes a cada sollicitación.

Figura 5. Proceso de ejecución del proyecto



---

<sup>(\*)</sup> Las máquinas utilizadas en las diferentes etapas del proceso para llevar a cabo la metodología experimental se presentan en el Anexo A.

## 5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se profundizaron los conocimientos sobre los materiales compuestos. Además, se determinó el tipo de gráficas que se realizarán a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción y fatiga. Finalmente se seleccionaron las normas idóneas para la caracterización del material compuesto encolado laminado elaborado a partir de la corteza de palma de lata (*Bactris Guineensis*).

La norma seleccionada para los ensayos de tracción en condición estática fue la ASTM D 3039/D 3039M – 07<sup>54</sup>, esta norma proporciona el proceso a seguir para la ejecución del ensayo, la obtención de la curva esfuerzo vs. deformación, y el dimensionamiento de las probetas. EL documento nos presenta en la Tabla 1<sup>55</sup> los requerimientos dimensionales de las probetas y los márgenes de error porcentual que pueden presentar estos, y en la Tabla 2<sup>56</sup> proporciona algunas sugerencias para el dimensionamiento de las probetas con base a la orientación de las fibras del material.

Para los ensayos de tracción-tracción en condición dinámica la norma seleccionada fue la ASTM D 3479/D 3479M–12<sup>57</sup>, esta norma proporciona el proceso a seguir para la ejecución del ensayo de fatiga, el número de probetas que se deben fabricar y aclara que las dimensiones geométricas de la probeta

---

<sup>54</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials . Op. cit., p. 1-13

<sup>55</sup> Ibid., p. 5.

<sup>56</sup> Ibid., p. 5.

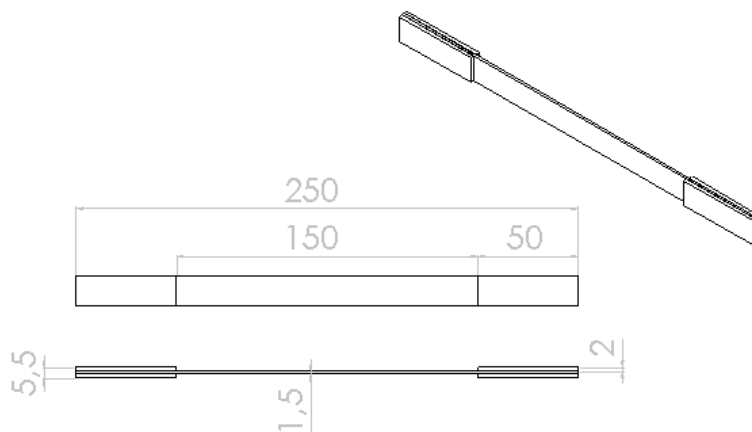
<sup>57</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. Op. cit., p. 1-6.

están dadas en la norma ASTM D 3039/D 3039M – 07<sup>58</sup>. Además, establece el proceso para la obtención de la curva  $\sigma$  vs. N.

## 5.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS<sup>(\*)</sup>

**5.2.1 Dimensionamiento de las probetas.** A continuación se presentan las dimensiones finales en milímetros para la construcción de las probetas de tracción estáticas y dinámicas basadas en la norma ASTM D 3039/D 3039M – 07<sup>59</sup>.

Figura 6. Dimensiones de las probetas



<sup>58</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials . Op. cit., p.5.

<sup>(\*)</sup> Los principales rechazos producidos en las actividades de manufactura de las probetas se presentan en el Anexo B.

<sup>59</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials . Op. cit., p. 1-13

**5.2.2 Materia prima.** El proceso de selección de la materia prima para la elaboración de las probetas se realiza mediante la inspección visual, donde se escogieron los tallos de palma de lata que se encontraban lo más rectos posibles y que presentarán en su sección transversal un espesor de corteza no menor a 5 [mm].

Cabe resaltar que debido a que es un material de origen natural en la selección se desecha aproximadamente el 80 % de los tallos.

Figura 7. Tallo de la palma de lata



**5.2.3 Secado.** La palma inicialmente se encuentra con un porcentaje de humedad superior al 40%, esto implica que el proceso de pegado no se pueda llevar a cabo de forma óptima, por lo tanto se debe reducir el porcentaje de humedad con la ayuda de un horno.

Realizado este proceso se obtuvieron humedades entre el 9,9 % y 13,2 %, con un valor promedio del 11,7 %<sup>(\*)</sup>. Debido a que la disminución de humedad se hace de forma rápida, en un lapso de aproximadamente 48 horas, algunos tallos se flectaron y/o agrietaron, por lo cual se procedió a desecharlos.

---

<sup>(\*)</sup> Las fotografías correspondientes a algunas de las tomas de la humedad se encuentran en el Anexo C.

## 5.2.4 Proceso de cortado.

**5.2.4.1 Primer corte.** Se cortan los tallos de la palma en secciones de 300[mm] de longitud.

Figura 8. Primer corte



**5.2.4.2 Segundo corte.** Se realiza un corte longitudinal, de tal manera que se obtenga una cara plana. Para ello se posiciona el tallo sobre un soporte y se fija en los extremos por medio de puntillas.

Figura 9. Segundo corte



**5.2.4.3 Tercer corte.** Se utiliza como soporte la cara plana obtenida en el segundo corte y se procede a generar un corte longitudinal teniendo en cuenta que de este se obtenga una tira de tallo de 10 [mm] de ancho aproximadamente.

Figura 10. Tercer corte



**5.2.4.4 Cuarto corte.** Se hace un corte longitudinal a través de la pieza obtenida en el corte tres, para así separar las dos caras de la corteza del tallo.

Figura 11. Cuarto corte



**5.2.5 Pegue y prensado.** Inicialmente se agrupan en pares los elementos resultantes del corte cuatro que sean más simétricos entre sí, esto con el objeto de obtener caras de corteza lo más planas posibles. Posteriormente se adiciona una capa de pegamento PVA en las caras laterales de las piezas y se juntan los pares.

Después de que el material se deja secar por aproximadamente 1 hora, se procede a prensar las piezas por las caras laterales exteriores de las mismas y se dejan en este proceso por mínimo 12 horas.

Figura 12. Primer pegue y prensado



**5.2.6 Cepillado.** Con la ayuda de una máquina se cepilla la corteza de la palma logrando de que esta quede plana, posteriormente se cepillan las caras laterales de las probetas hasta que se obtenga un ancho de 15 [mm] en estas.

Figura 13. Cepillado



**5.2.7 Espesor.** Posterior al cepillado se retira por medio de un corte la parte interna de la pieza, es decir, la parte interna del tallo, para así obtener un espesor de 3 [mm], aproximadamente.

A continuación, usando una máquina lijadora con un montaje especial, se le da un espesor final de 1,5 [mm] a la probeta, con lo cual se eliminan también algunos concentradores de esfuerzos generados durante el corte previo.

Figura 14. Espesor final de la probeta



**5.2.8 Lengüetas.** Para la protección de la probeta de los efectos del agarre de la máquina de ensayos, como puede ser el aplastamiento, se adhieren lengüetas en la zona de agarre de la probeta, según como lo indica y recomienda la norma.

**5.2.8.1 Dimensionamiento.** Las lengüetas se realizan cortando una lámina de MDF. El ancho final es de 15 [mm] y el largo de 50 [mm], obteniendo así una pieza rectangular.

**5.2.8.2 Pegue y prensado.** Para la adhesión del cuerpo principal de las probetas con las lengüetas se agrega una capa de pegamento PVA y se ponen en contacto, sin aplicar mayor presión. El pegamento se deja fraguar por 1 hora y posteriormente se procede a prensar durante 12 horas. Durante este proceso es importante tener en cuenta el dejar una zona de ensayo de 150 [mm] entre lengüetas de la misma cara de la probeta.

Figura 15. Prensado de las lengüetas



**5.2.9 Corte final.** En este paso se remueven los sobrantes de lámina de la corteza de palma de lata obteniendo como resultado final una probeta de 250 [mm] de longitud.

Figura 16. Probeta terminada



**5.2.10 Lijado.** Utilizando lijas de calibre número 320, 600, 1200 y 1500 se procede a pulir las diferentes caras de las probetas atenuando de esta forma los concentradores de esfuerzos generados por las herramientas de corte implementadas en el proceso de fabricación de la probeta.

### 5.3 PRUEBAS PRELIMINARES Y DEFINICIÓN DE VARIABLES

Para esta etapa se llevaron a cabo siete ensayos estáticos de tracción con probetas que presentaban diferentes composiciones, es decir, algunas eran en su gran mayoría compuestas por la corteza del tallo y otras contenían fibras de la interface entre la corteza y la parte central del tallo, o incluso de esta última. Como se mencionó anteriormente, el tallo está constituido en su parte central por células leñosas, blandas y de color claro.

Para efectos de entendimiento y simplificación de los términos se identificarán las fibras de la corteza como de color café, de la interface entre la corteza y el interior del tallo como de color blanco y de la parte central como de color amarillo, los cuales son los tonos reales a los que corresponden estas fibras.

Figura 17. Secciones del área transversal del tallo según el tipo de fibras que las componen



Además, de las variables en la composición de las probetas, se seleccionaron algunas que presentaban defectos como nudos o fibras que cambian de orientación a lo largo de la probeta, esto con el fin de analizar el efecto de estos defectos en la resistencia del material compuesto.

Figura 18. Probetas con defectos



## 5.4 SELECCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las pruebas preliminares se procede a seleccionar las probetas, las cuales deberán presentar una predominancia de fibras de la corteza del tallo, es decir, que presenten una tonalidad café cuasi-uniforme en su superficie. Además, se desecharán las probetas que presenten cambios abruptos en la orientación de sus fibras o que tengan nudos.

## 5.5 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

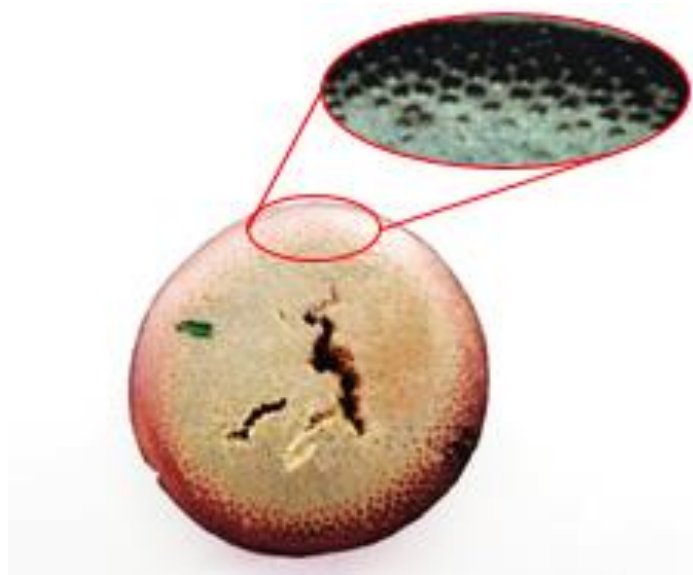
**5.5.1 Ensayo de dureza Vickers.** Antes de realizar la ejecución del ensayo de microdureza es de vital importancia realizar un acondicionamiento de la muestra a ensayar, con la finalidad de facilitar la medición de la huella dejada por el dispositivo y que el resultado sea confiable.

Debido a la topografía irregular del material y a su color opaco es necesario pulir y recubrir la superficie.

**5.5.1.1 Pulido.** La muestra se extrae de un tallo de palma de lata del cual se cortara un disco con un espesor de 5 [mm] (ver Figura 19), dicha muestra se pulirá con lijas de calibre 100, 320, 600, 1200, 1500 y 2000. Este proceso se realiza en una sola dirección y cada vez que se cambia de lija, la nueva dirección de lijado formará noventa grados con la anterior.

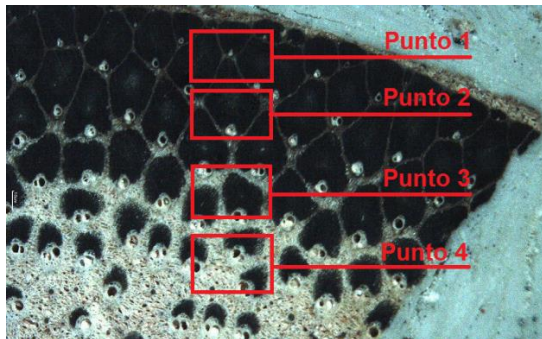
**5.5.1.2 Recubrimiento.** Posteriormente al pulido se realiza el recubrimiento de la superficie con oro, el cual tiene un espesor de 20 [nm]. El equipo utilizado para dicho proceso se encuentra en el laboratorio de microscopía del Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 19. Probeta recubierta para el ensayo de microdureza



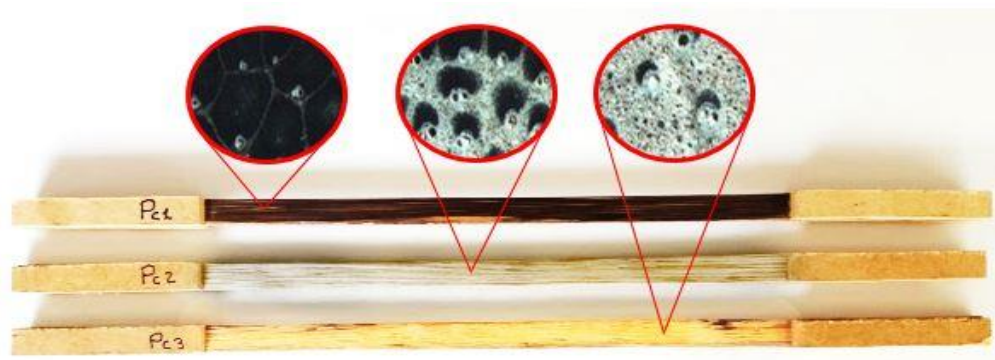
**5.5.1.3 Ejecución del ensayo.** El ensayo se lleva a cabo con la máquina de microdureza INNOVATEST serie 400 perteneciente a la escuela de metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander. Los datos registrados de microdureza corresponden a diferentes zonas o puntos de la muestra, como se muestra en la Figura 20. Además, la carga implementada para el ensayo fue de 100 [gf].

Figura 20. Puntos del tallo donde se tomaron las muestras de dureza



**5.5.2 Ensayo de tracción por tipo de fibra.** Los ensayos de tracción estática se llevaron a cabo según la norma ASTM D 3039/D 3039M – 07<sup>60</sup>. Las probetas se elaboraron teniendo en cuenta las diferentes concentraciones de fibras que componen el tallo de la palma de lata, dichos ensayos se realizaron a una velocidad de avance del dispositivo de sujeción de 1 [mm/min], en la máquina universal de ensayos MTS-Bionix.

Figura 21. Probetas por tipo de fibra



<sup>60</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials . Op. cit., p.

**5.5.3 Ensayo de tracción del material compuesto.** Las pruebas de tracción estática del material compuesto encolado laminado se llevaron a cabo bajo la norma ASTM D 3039/D 3039M – 07<sup>61</sup>. La ejecución se realizó a una velocidad de avance del dispositivo de sujeción de 1,5 [mm/min]. En la máquina universal de ensayos MTS-Bionix.

Figura 22. Probetas para ensayos de tracción estática



<sup>61</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials . Op. cit., p. 7.

**5.5.4 Ensayo de fatiga del material compuesto.** Con base a los resultados obtenidos del ensayo de tracción en condición estática se realiza un protocolo para la realización del ensayo de tracción-tracción en condición dinámica según la norma ASTM D3479/D3479M-12<sup>62</sup>, la finalidad de este ensayo es generar la curva esfuerzo vs. número de ciclos ( $\sigma$ -N). Dicho protocolo consiste en ensayar las probetas con un esfuerzo máximo correspondiente a distintos porcentajes del esfuerzo último de tracción obtenido, los cuales serán del 90, 85, 80 y 70 %. Por otra parte, los esfuerzos mínimos se calcularán de tal manera que el esfuerzo medio se mantenga constante en un valor de 131 [MPa] para todos los ensayos.

El número de probetas a ensayar por punto es de 5, por ende se ensayarán un total de 20 probetas; todas bajo una frecuencia de ensayo de 20 Hz. Una vez obtenidos los resultados se implementará el método estadístico de Weibull para la obtención de la curva  $\sigma$ -N.

**5.5.5 Análisis de la fractura.** Para llevar a cabo el análisis fractográfico del material compuesto encolado laminado se captaron imágenes macroscópicas y microscópicas de la zona de falla, en donde se analizaron las probetas ensayadas a tracción estática y dinámica.

---

<sup>62</sup> ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. Op. cit., p. 1-6.

## 6. RESULTADOS Y SU RESPECTIVO ANÁLISIS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas del proceso metodológico, y se realiza su respectivo análisis.

### 6.1 PRUEBAS PRELIMINARES<sup>(\*)</sup>

Posterior a la realización de los ensayos y las gráficas de esfuerzo vs. deformación, se observó que las probetas que presentaban nudos o cambios en la orientación de sus fibras fallaron en la ubicación de dichos defectos, es decir, estos actuaban como concentradores de esfuerzos y por consiguiente estas probetas presentaron una menor resistencia a la tracción en comparación con una probeta sin defectos.

Se evidenció una desviación estándar de 49,5 [MPa] en el esfuerzo último de resistencia a la tracción entre las probetas sin y con defectos, donde las últimas fallaron en un rango de entre los 178 y 187 [MPa].

Fue posible analizar también que entre las probetas sin defectos se presentó una desviación estándar de 23,5 [MPa] y una mediana de 270 [MPa]. Además, la probeta más resistente falló a los 294 [MPa]. Sin embargo, no se pudo relacionar el o los factores que generan dicho valor de desviación estándar con una característica que se pueda captar a simple vista en las probetas.

---

<sup>(\*)</sup> Las gráficas correspondientes a los resultados obtenidos y las fotografías de las probetas ensayadas se presentan en el Anexo D.

Comparando con los resultados de los ensayos de tracción estática realizados por los autores Gil y Prada<sup>63</sup> en 2008 a la corteza de la palma de lata, en donde ellos encontraron que el esfuerzo último de resistencia a la tracción fue de 305 [MPa]; se observa que el promedio de los resultados obtenidos en el presente trabajo en las probetas sin defectos, el cual es de 270 [MPa], es un 11,5 % menor. Sin embargo, debido a las afirmaciones de los autores que realizaron el estudio en 2008, donde expresan que los resultados que obtuvieron se encontraban con un desfase inicial debido a problemas técnicos y sí se tiene en cuenta que las probetas eran hechas de una sola pieza, se pueden equiparar los resultados obtenidos en ese entonces y en el presente trabajo.

## **6.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO**

**6.2.1 Ensayo de dureza Vickers.** (\*) El ensayo se realizó en distintos puntos de la probeta, iniciando desde el exterior del tallo y continuando en dirección radial. Se realizaron pruebas en cuatro secciones diferentes, tomándose cuatro muestras en cada una de ellas. En los resultados se obtuvo que la mayor dureza es la registrada en la zona de la corteza de la palma y disminuye a medida que se toman más hacia el centro. En la Figura 20, se precisan las zonas donde se realizaron las pruebas, en las cuales los puntos 1, 2, 3 y 4 tienen a una dureza promedio del 27,5; 25,5; 21,2 y 14,1 [HV], respectivamente.

Dado a que no existen datos registrados de dureza de la palma de lata (*Bactris Guineensis*), se procede a realizar una comparación con otro tipo de material natural como lo es el bambú (*Guadua angustifolia*). Fue posible observar que estos dos materiales presentan el mismo comportamiento en cuanto a que

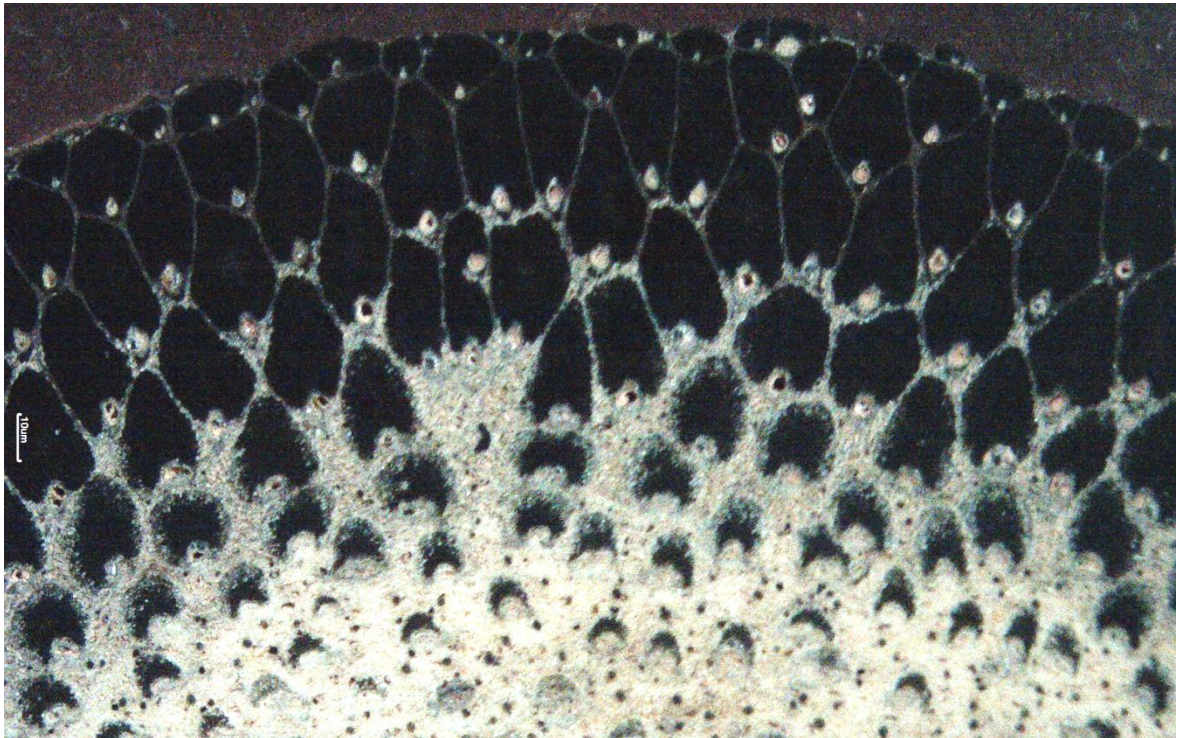
---

<sup>63</sup> GIL Y PRADA. Op. cit., p. 130.

(\*) Las fotografías de los resultados obtenidos se presentan en el Anexo E.

registran valores de dureza más altos en la zona perimetral del tallo dado que en esta zona se registra mayor densidad de fibras y disminuyen a medida que se acercan al centro de este (ver Figura 23), como lo muestra Montoya, González y Bedoya<sup>64</sup> en su estudio realizado en 2007.

Figura 23. Estereoscopia del área transversal del tallo

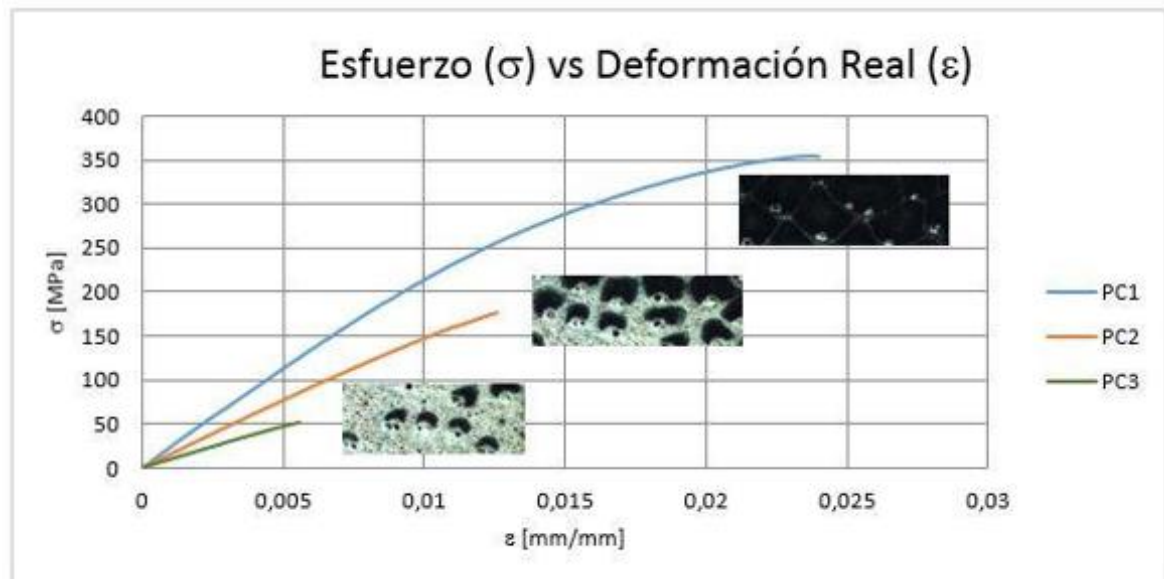


---

<sup>64</sup> Montoya Arango, Jorge, González B., Héctor, Y Bedoya Sánchez, Jose. Dureza brinell y la influencia de la humedad relativa del ambiente, de la edad y la altura a lo largo del tramo en la especie de bambú *guadua angustifolia kunth*. En: *Scientia Et Technica*, Mayo. 2007. vol. 1, n. 34, p. 619-624. ISSN 0122-1701.

**6.2.2 Ensayo de tracción según el tipo de fibra.** (\*) En la Figura 24, la cual muestra las curvas promedio de los resultados obtenidos en las pruebas de tracción por tipo de fibra, se puede evidenciar que para las probetas que contenía fibras únicamente de la corteza o color café, tomándolo desde un punto de vista macroscópico, se obtuvo un esfuerzo último de resistencia a la tracción promedio de 354 [MPa]; para las fibras blancas, las cuales corresponden a la interfaz entre la corteza y el interior del tallo, el esfuerzo último promedio sólo fue la mitad del mencionado anteriormente, es decir, alrededor de 177 [MPa] y finalmente las fibras de color amarillo, las cuales son las de la parte interna del tallo presentaron un esfuerzo último promedio de resistencia a la tracción de 51 [MPa].

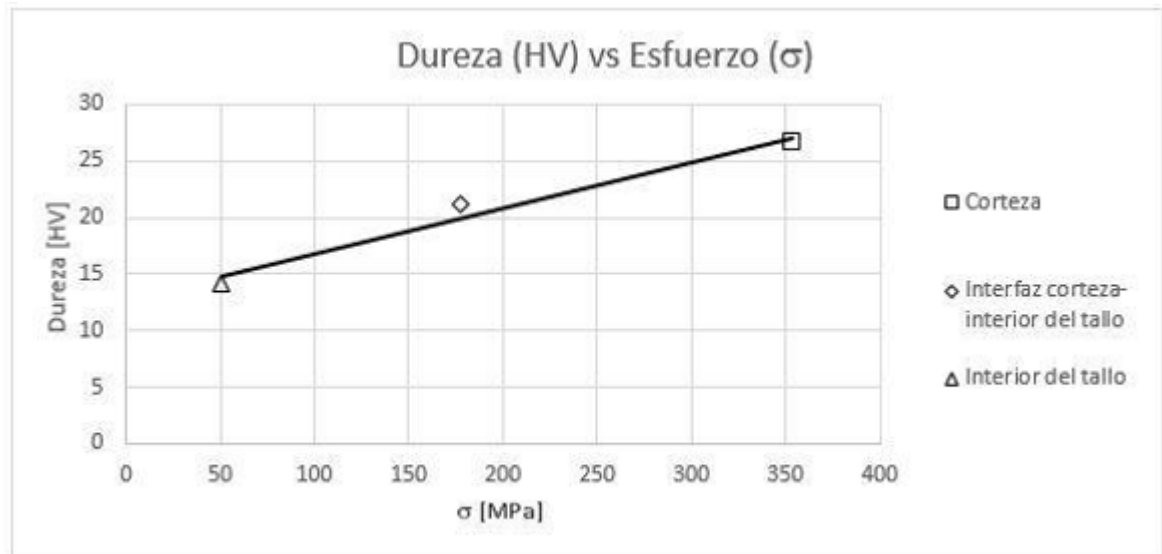
Figura 24. Ensayo de tracción según tipo de fibra



(\*) Las gráficas correspondientes a los resultados obtenidos y las fotografías de las probetas ensayadas se presentan en el Anexo F.

En la Figura 25, se relacionan el valor promedio de los resultados obtenidos en los ensayos de dureza tipo Vickers en cada una de las zonas medidas y el valor promedio del esfuerzo último de resistencia a la tracción para cada grupo de probetas discriminadas según el tipo de fibras. Con base a los resultados se puede observar que existe una relación entre el tipo de fibra del tallo, la dureza de las mismas y la resistencia de estas a los esfuerzos de tracción; pues se evidenció que las fibras de la corteza del tallo presentan una mayor dureza y una mayor resistencia a la tracción; y mientras se alcanzan fibras de una parte más interior del tallo estas propiedades se ven degradadas, obteniéndose valores menores de dureza y resistencia.

Figura 25. Relación entre la dureza y el esfuerzo según tipo de fibra



**6.2.3 Ensayo de tracción del material compuesto.<sup>(\*)</sup>** En la Figura 26, se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizados a la palma de lata. En estos se observan valores de esfuerzo último de resistencia a la tracción los cuales tienen una desviación estándar de 12,55 [MPa]. El valor promedio obtenido de dichos valores fue de 247 [MPa].

Figura 26. Resultados obtenidos de los ensayos de tracción estáticos



Debido a la inexistencia un estudio similar realizado a un material compuesto hecho a partir de esta palma, se proceden a comparar estos resultados con los obtenidos con otros materiales compuestos. Procediendo con este paralelo fue

<sup>(\*)</sup> Las fotografías de las probetas ensayadas se presentan en el Anexo G.

posible observar que el esfuerzo último de resistencia a la tracción del material elaborado con palma de lata es mucho mayor al registrado en los estudios realizados a materiales compuestos hechos con fibras naturales, siendo un 466% más resistente que el cáñamo<sup>65</sup>, el cual era el material que mejor comportamiento presentaba. En cuanto a otras maderas laminadas, se puede observar que el material que más se acerca a la resistencia última a la tracción de la palma de lata es el bambú<sup>66-67</sup>, sin embargo este alcanza, en promedio, tan sólo 120 [MPa], el cual es un valor cercano al 50% de la resistencia de la primera.

En cuanto al comportamiento de las probetas durante los ensayos, fue posible observar que a pesar de que los primeros módulos de elasticidad de las probetas preliminares presentan altos grados de variación, una vez mejorados los procesos de manufactura y la selección de las piezas finales, el comportamiento elástico de estas fue muy similar, obteniéndose un aparente primer módulo de elasticidad promedio de 20,4 [GPa]. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la influencia de la máquina sobre el resultado obtenido, puesto que esta también se deforma bajo la acción de las fuerzas, por lo tanto se recalculó este módulo y se obtuvo un valor real para esta propiedad de 22,7 [Gpa]. Dicho módulo corresponde a la zona previa al primer cambio de pendiente en la curva esfuerzo vs. deformación (ver Figura 26), el cual se puede atribuir a una posible ruptura de las fibras más débiles del material en estudio.

---

<sup>65</sup> WAMBUA; IVENS y VERPOEST. Op. cit., p.1261.

<sup>66</sup> TAKEUCHI. Op. cit., p. 63.

<sup>67</sup> MARTÍNEZ GARCÍA. Op. cit., p.14.

**6.2.4 Ensayo de fatiga del material compuesto.<sup>(\*)</sup>** Posterior a la realización de los ensayos de fatiga y tratar sus respectivos resultados utilizando la distribución estadística propuesta por Weibull, se encontró que para un 90% del esfuerzo último de resistencia a la tracción el material se fractura a una mediana de Weibull de 338 ciclos, aproximadamente. Para un 85% el material falla en un valor de una mediana de Weibull aproximado a los 1775 ciclos y bajo un esfuerzo de fluencia aparente del 80% y 70 % se obtuvo un promedio de falla a una mediana de Weibull de 5583 ciclos y a los 19592 ciclos, respectivamente.

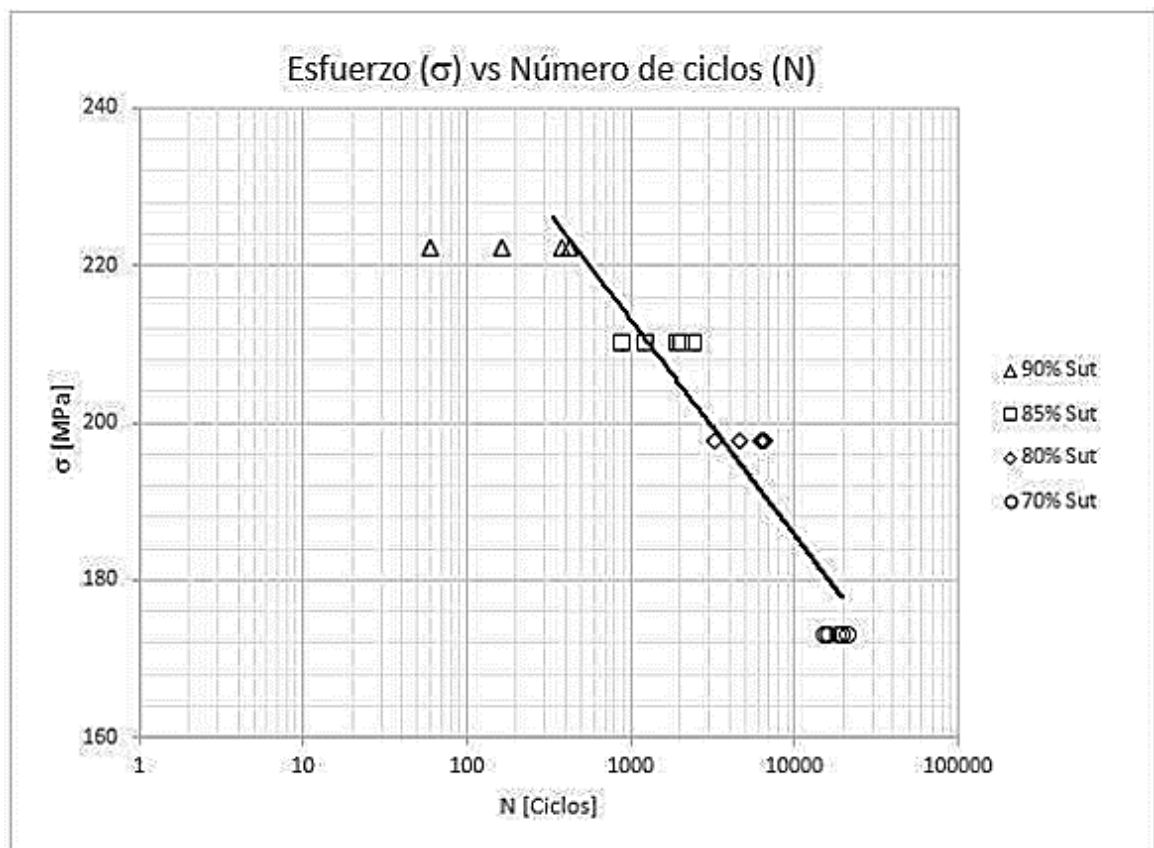
Tabla 1. Resultados de ensayos de fatiga en tracción-tracción

N° de Probeta	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos de falla [N]	N° de Probeta	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos de falla [N]
1	222	59	1	210	909
2		161	2		1247
3		379	3		1981
4		421	4		2104
5		427	5		2476
10% Probabilidad de falla (Weibull)		156	10% Probabilidad de falla (Weibull)		1115
50% Probabilidad de falla (Weibull)		338	50% Probabilidad de falla (Weibull)		1775
90% Probabilidad de falla (Weibull)		375	90% Probabilidad de falla (Weibull)		2453
Desviación estandar		168,7	Desviación estandar		645,3
N° de Probeta	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos de falla [N]	N° de Probeta	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos de falla [N]
1	198	3206	1	173	15902
2		4675	2		16755
3		6263	3		19014
4		6401	4		20147
5		6598	5		21833
10% Probabilidad de falla (Weibull)		4000	10% Probabilidad de falla (Weibull)		17417
50% Probabilidad de falla (Weibull)		5583	50% Probabilidad de falla (Weibull)		19592
90% Probabilidad de falla (Weibull)		7167	90% Probabilidad de falla (Weibull)		21599
Desviación estandar		1459,2	Desviación estandar		2429,8

<sup>(\*)</sup> Las fotografías de las probetas ensayadas se presentan en el Anexo H.

En la Figura 27, es posible analizar que el material compuesto objeto de estudio presenta una pequeña dispersión en los ciclos ruptura ante la presencia de cargas cercanas a su esfuerzo de último de resistencia a la tracción. Sin embargo, esta dispersión presenta un incremento a medida que la carga aplicada disminuye. Esto se evidencia en el hecho de que la desviación estándar en los ciclos de ruptura del primer punto es de 168,6; mientras que para el último es de 2429,92.

Figura 27. Diagrama de Wöhler  $\sigma$  vs. N



La ecuación que describe la curva de esfuerzo vs. número de ciclos según Basquin es  $\sigma = A(N)^b$ , en donde  $A$  y  $b$  son constantes. Estas constantes han sido calculadas y se obtuvo que  $A = 322$  y  $b = -0,0601$ .

Debido a la no existencia de estudios previos sobre el material en estudio y con base en los resultado obtenidos en los ensayos de fatiga de tracción-tracción, se procede a comparar estos con los obtenidos en estudios realizados a materiales compuestos elaborados de diferentes tipos de fibras como lo son el Kenaf<sup>68</sup>, la fibra del racimo de fruta de la palma de aceite (OPFBF)<sup>69</sup> y la fibra de carbono (CF)<sup>70</sup>, donde las dos primeras también son de origen natural. Se evidencia que el material compuesto encolado laminado elaborado a partir de corteza de palma de lata es más frágil con respecto a los materiales compuestos por Kenaf, CF y OPFBF, esto se corrobora en el hecho de que la pendiente de la recta de la palma de lata, observada en la Figura 28, es mayor que la de los otros materiales analizados, lo cual es un patrón natural de los materiales frágiles. Además, se observa que para un valor de  $10^3$  ciclos el material en estudio presenta una resistencia a la tracción levemente mayor que el material compuesto CF y un 290 y 780 % mayor que el material compuesto de Kenaf y OPFBF, respectivamente.

---

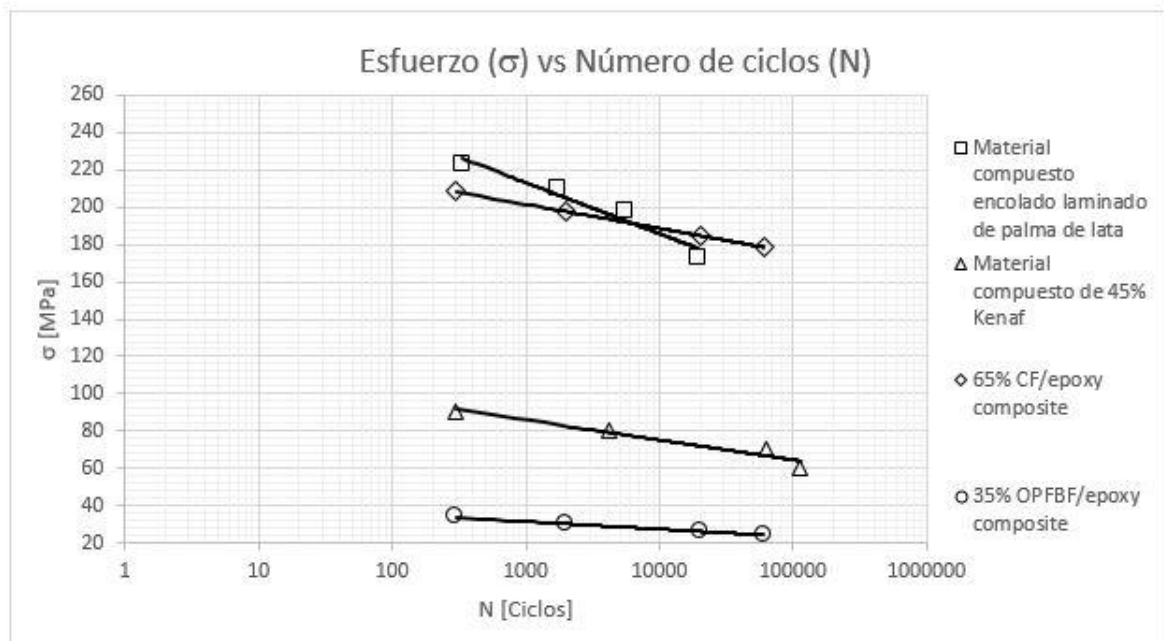
<sup>68</sup> ABDULLAH, Abdul Hakim et al. Fatigue Behavior of Kenaf Fibre Reinforced Epoxy Composites. Engineering Journal, [S.l.], v. 16, n. 5, p. 105-114, June 2012. ISSN 0125-8281. Disponible en internet:

<<http://engj.org/index.php/ej/article/view/292/252>>.

<sup>69</sup> KALAM, SAHARI, KHALID Y WONG. Op. Cit., p.40.

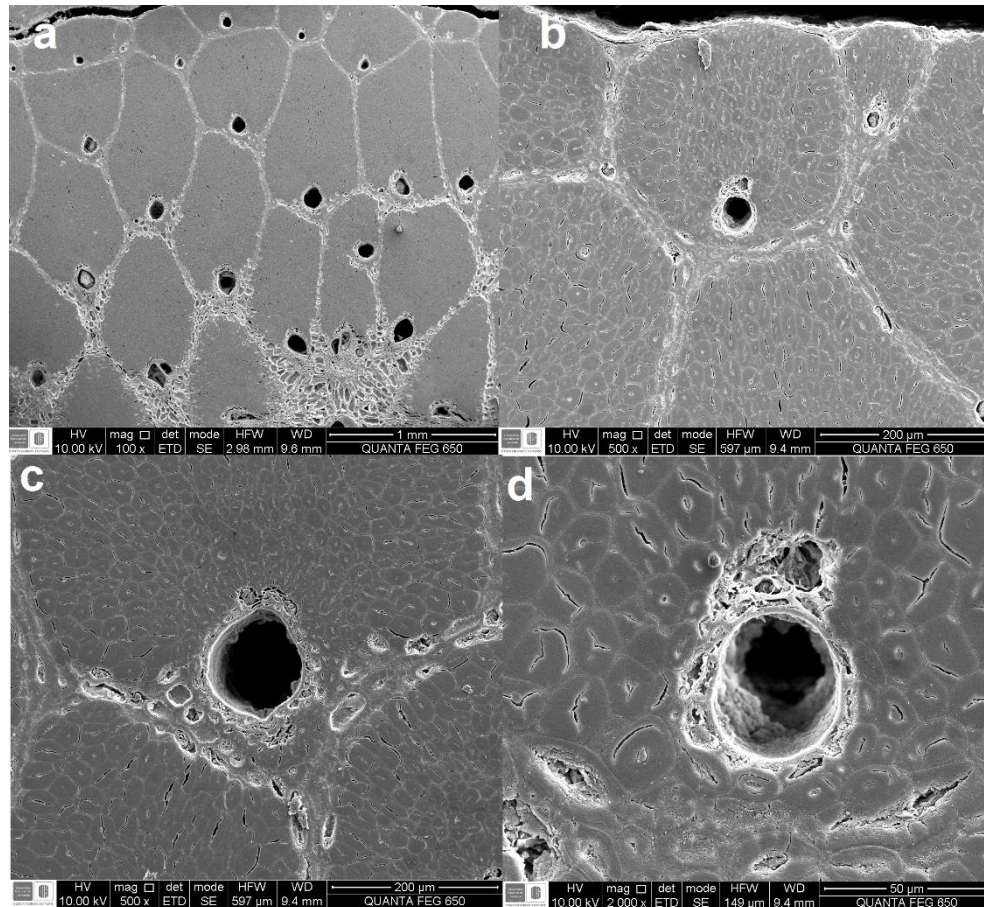
<sup>70</sup> KALAM, SAHARI, KHALID Y WONG. Op. Cit., p.40.

Figura 28. Gráfico comparativo de esfuerzo vs. número de ciclos



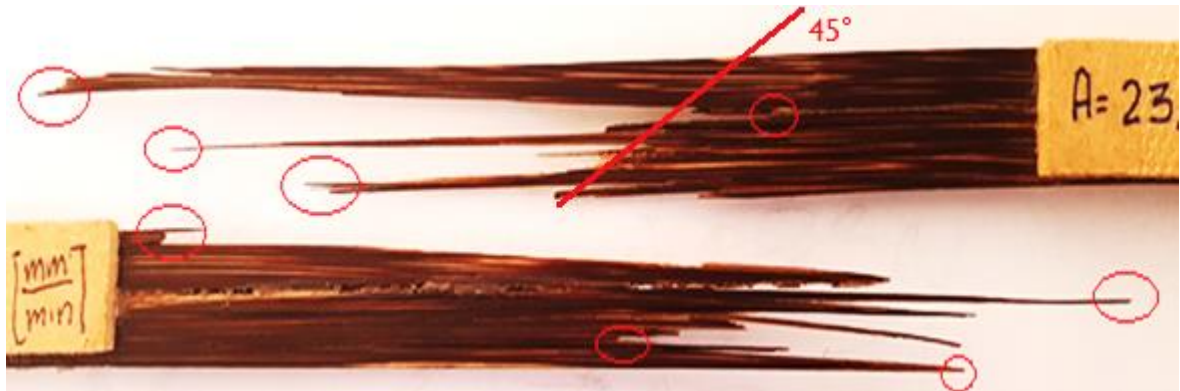
**6.2.5 Análisis de la fractura.** Para llevar a cabo el análisis de fractura es necesario conocer cómo está constituida la corteza de la palma de lata. Se observa que esta se constituye de macro fibras, las cuales presentan en su estructura un orificio (ver Figura 29 b), el cual actúa como un posible concentrador de esfuerzos. Además, estas fibras se componen de microfibras, las cuales presentan microgrietas en su estructura (ver Figura 29 c).

Figura 29. Microscopía electrónica de corteza de palma de lata



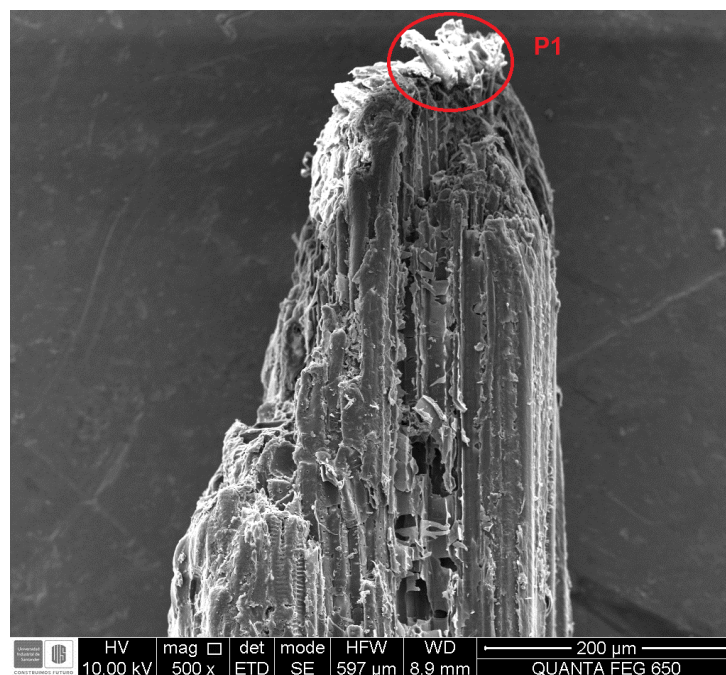
**6.2.5.1 Análisis estático.** En la Figura 30, se muestra la fractura de una probeta del material compuesto encolado laminado ensayada a tracción, en esta se observa que la palma de lata (*Bactris Guineensis*) presenta las características de un material completamente frágil. Esto se evidencia en el hecho de que no se observa ningún encuellamiento en las probetas ensayadas, lo cual es una característica típica en los resultados de los ensayos de tracción de este tipo de materiales.

Figura 30. Fractura de ensayo de tracción



Se observa en las Figuras 30 y 31, que la propagación de la grieta se da en un ángulo aparente de 45 grados, tanto a nivel macroscópico como microscópico, lo cual es característico de un material frágil. Además, en la Figura 31, se aprecia una fractura final ocasionada por sobrecarga (Punto P1).





















Figura 31. Microscopía electrónica de muestra ensayada a tracción



Contrario a lo que se puede apreciar en la curva esfuerzo vs. deformación (ver Figura 26) en donde existe un aparente esfuerzo de fluencia a 150 [MPa] y esfuerzo último de resistencia a la tracción de aproximadamente 247 [MPa], no se constata en la fractura dicha fluencia. Este fenómeno puede ser atribuido a un posible rompimiento de las primeras fibras ocasionando un cambio de pendiente de la curva y no un comportamiento de plasticidad como aparenta ser.

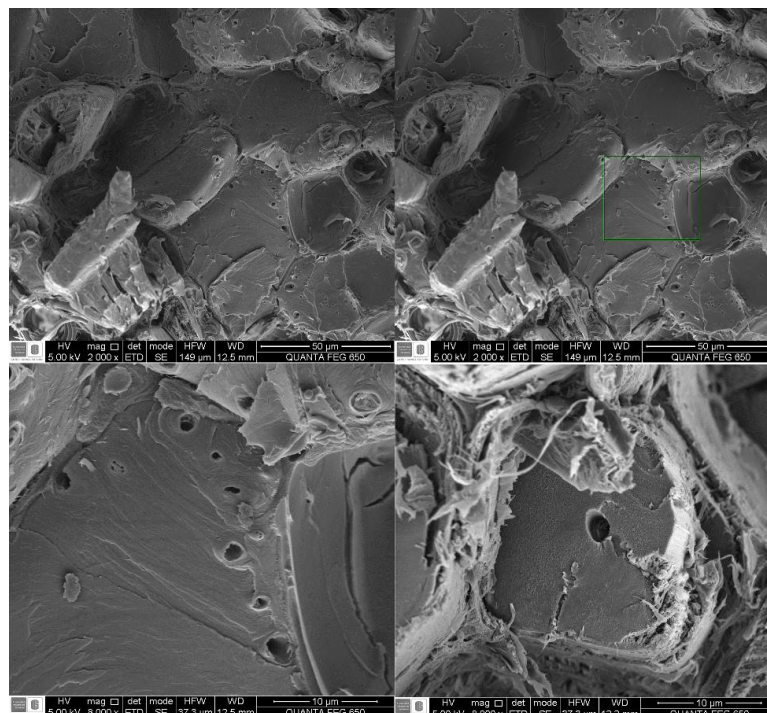
**6.2.5.2 Análisis de fatiga.** Como se puede apreciar en la Tabla 2, la totalidad de las muestras presentan una fractura típica de un material con un comportamiento frágil debido a que no se observa ningún ecuellamiento en las mismas, aun cuando el mismo ha sido solicitado de forma dinámica. Sin embargo, no se observa una orientación a 45° en las fracturas, lo cual dificulta la posibilidad de detectar el inicio de la grieta y su propagación.

Tabla 2. Resultado de los ensayos de fatiga

Punto N° 1			Punto N° 2		
Probetas	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos de falla [N]	Probetas	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos de falla [N]
	222	59		210	909
		161			1247
		379			1981
		421			2104
		427			2476
Punto N° 3			Punto N° 4		
Probetas	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos de falla [N]	Probetas	Esfuerzo [Mpa]	Ciclos de falla [N]
	198	3206		173	15902
		4675			16755
		6263			19014
		6401			20147
		6598			21833

En la Figura 32, se evidencia la fractura generada en los ensayos de fatiga realizados al material compuesto de palma de lata. En ellas se puede observar una fractura la cual no presenta ningún tipo de cizallamiento; por el contrario la superficie es totalmente plana, lo cual denota características de fragilidad en el material.

Figura 32. Microscopía electrónica en probetas de fatiga.



El comportamiento que se predice con la fractografía está bastante correlacionado con lo que muestra la curva esfuerzo vs. número de ciclos de Wöhler (ver Figura 27) en donde se observa una pendiente moderada característica de un material fibroso y frágil. Además, es difícil interpretar la posible existencia de un límite de fatiga puesto que el ciclaje máximo alcanzado en las pruebas se encuentra en un orden de tan sólo  $10^4$  ciclos.

## 7. CONCLUSIONES

- Se evidencia que las principales secciones o zonas que componen el tallo de la palma de lata (*Bactris Guineensis*) presentan las siguientes características: la zona de la corteza (café) presenta una dureza de 26,5 [HV] y un esfuerzo último de resistencia a la tracción de 354 [Mpa], la zona de la interfaz (blanca) presenta una dureza de 21,2 [HV] y un esfuerzo último de resistencia a la tracción de 177 [Mpa] y finalmente la zona central del tallo (amarilla) presenta una dureza de 14,1 [HV] y un esfuerzo último de resistencia a la tracción de 51 [Mpa].
- A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción se puede constatar que con una previa selección de materia prima y métodos de manufactura depurados se puede obtener un esfuerzo último de tracción de 247 [MPa] con una desviación estándar de 12,55 [MPa] en las probetas. El módulo de elasticidad promedio calculado fue de 22,7 [GPa].
- Los resultados obtenidos en las pruebas de tracción sugieren que el material propuesto reúne condiciones óptimas para ser considerado como una alternativa viable en la fabricación de materiales compuestos encolados laminados, utilizando fibras de origen orgánico.
- Con base en el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga, se puede deducir que la ecuación de la curva  $\sigma$  [MPa] vs. N [Ciclos] según Basquin es:  $\sigma = A(N)^b$ , donde:  $A=322$  y  $b=-0,0601$ .
- Cotejando los resultados obtenidos de los ensayos de tracción y fatiga con el tipo de fractura generada por estos en las probetas se puede deducir que la corteza de palma de lata es un material frágil.

## 8. RECOMENDACIONES

- Con base en los resultados obtenidos y a los cambios observados en las propiedades de las probetas conforme se depuraba el proceso de fabricación, se recomienda que se analicen procesos de fabricación de las probetas alternativos al presentado en el presente trabajo de grado. Es importante contar con una gran cantidad de materia prima, puesto que tan sólo alrededor del 10 % de esta termina siendo una probeta ideal. También es necesario contar con las máquinas y herramientas ideales para el manejo de este tipo de madera, puesto que debido a su dureza genera un desgaste excesivo en el filo de las mismas.
- Se recomienda que se realicen nuevos ensayos para la caracterización estática de este material, donde se relacione de manera concluyente los tipos de fibras que se encuentran en él, sus respectivas durezas, módulos de elasticidad y resistencia a la tracción. Esto con el fin de corroborar los resultados obtenidos en el presente trabajo y generar una base de datos más extensa del material que le brinde mayor confiabilidad a los resultados obtenidos. También es importante analizar la influencia de factores superficiales como los nudos, cambios en la orientación de las fibras y concentradores de esfuerzos producidos durante la manufactura, además del efecto de la variación de la humedad en las probetas.
- Para futuros ensayos de fatiga de un material compuesto encolado laminado hecho a partir de la corteza de la palma de lata, se recomienda que se analicen nuevas variables que puedan afectar el desempeño de las probetas, como lo son la frecuencia de los ensayos, la razón de esfuerzos (R) y el esfuerzo medio aplicado.

- Para efectos de obtener probetas finales más homogéneas se recomienda crear un método de análisis que permita conocer la proporción aproximada de fibras cafés, blancas y amarillas que se encuentran en estas.

## BIBLIOGRAFÍA

6° CONGRESO NACIONAL DE MATERIALES COMPUESTOS. (3: 27-29, junio, 2005: Valencia, España). Actas. Asociación española de materiales compuestos, 2005. 1126 p.

ABDULLAH, Abdul Hakim et al. Fatigue Behavior of Kenaf Fibre Reinforced Epoxy Composites. Engineering Journal, [S.l.], v. 16, n. 5, p. 105-114, June 2012. ISSN 0125-8281. Disponible en internet: <<http://engj.org/index.php/ej/article/view/292/252>>.

ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM D 3039/D 3039M – 07. Montgomery: ASTM, 2007. p. 0-13.

ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM D3479/D3479M–12. Montgomery: ASTM, 2012. p. 0-6.

BAÑO, V.; ARGÜELLES-BUSTILLO, R.; REGUEIRA, R. y GUAITA, M. Determination of the stress-strain curve in specimens of Scots pine for numerical simulation of defect free beams. En: Revista Materiales de Construcción. 2012. vol. 62, p. 269-284. ISSN: 0465-2746.

BOND, I.P. y ANSELL, M.P. Fatigue properties of jointed wood composites: Part I Statistical analysis, fatigue master curves and constant life diagrams. En: Journal of materials science. 1998. vol. 33, p. 2751-2762.

CHAPLAIN, Myriam; NAFA, Zahreddine y GUENFOUD, Mohamed. Damage of Glulam Beams Under Cyclic Torsion: Experiments and Modelling. En: Revista Springer science.

BUDYNAS, Richard y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. 8 ed. México: Instituto Politécnico Nacional Esime Azcapotzalco, 2008. 109 p. México: McGraw-Hill, 2008. 1092 p. ISBN-13: 978-0-07-312193-2.

D' ALMEIDA, J.R.M.; AQUINO, R.C.M.P. y MONTEIRO, S.N. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers. En: Revista Composites: Part A. 2006. vol. 37, p. 1473-1479.

DE ANDRADE SILVA, Flavio; CHAWLA, Nikhilesh y DE TOLEDO FILHO, Romildo. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. En: Revista Composites Science and Technology. Octubre, 2008. vol. 68, p. 3438-3443.

El alarmante informe sobre el cambio climático [en línea]. Colombia: Revista Semana, 31 de marzo de 2014- [citado 20 de abril de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.semana.com/mundo/articulo/informe-de-onu-sobre-cambio-climatico-en-el-mundo/382145-3>>.

ESTEVEZ CIMADEVILA, J; OTERO CHANS, D; MARTIN GUTIERREZ, E y VAZQUEZ RODRIGUEZ, J. Análisis experimental de las barras de madera laminada con sección tubular utilizadas en la construcción de una malla espacial. *Maderas, Cienc. tecnol.* [online]. 2013, vol.15, n.2 [citado 2016-09-19], pp.153-170. Disponible en: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2013000200003&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2013000200003&lng=es&nrm=iso)>.

FOTOUH, Ahmed; WOLODKO, John y LIPSETT, Michael. Fatigue of natural fiber thermoplastic composites. En: *Revista Composites: Part B*. 2014. vol. 62, p. 175-182.

GIL GONZÁLES, Ivonne Johana y PRADA GARZÓN, Ronny Germán. Análisis y caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de la palma de lata. Bucaramanga, 2008. Trabajo de grado (Ingenieros Civiles). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 203 p.

HACKER, C.L y ANSELL, M.P. Fatigue damage and hysteresis in wood-epoxy laminates. En: *Journal of materials science*. 2001. vol. 36, p 609-621.

HUNGER, Frank; STEPINAC, Mislav y RAJCIC, Vlatka. Pull-compression test on glued-in metric thread rods parallel to grain in glulam and laminated veneer lumber

of different timber species En: European Journal of Wood and Wood Products. Enero, 2016.

Introducción a los materiales compuestos [en línea]. Madrid (España): Universidad Carlos III, 2008- [citado 21 de abril de 2016]. Disponible en internet: <<http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo1.pdf>>.

IPOHORSKI, Miguel y ACUÑA, R.J. Fractografía: Aplicaciones al análisis de fallas [en línea]. Buenos Aires (Argentina): Comisión nacional de energía atómica, 1988. [citado 18 de junio de 2016]. Disponible en internet: <<http://www2.cnea.gov.ar/cac/ci/CICACInformes/cicacInformeCNEA490.pdf>>.

JOSHI, S.V.; DRZAL, L.T.; MOHANTY, A.K. y ARORA, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. En: Revista Composites: Part A. 2004.vol. 35, p. 371-376.

KALAM, A.; SAHARI, B.B.; KHALID, Y. A. y WONG, S. V.; Fatigue behaviour of oil palm fruit bunch fibre/epoxy and carbon fibre/epoxy composites. En: Journal of Composite Structures, 2005. vol. 71, no. 1, pp. 34-44.

Los adhesivos y el encolado de la madera [en línea]. Disponible en internet: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:PMVXAUSQXucJ:infom>

adepa.net/uploads/productos/informacion\_general\_6\_adhesivos.pdf+&cd=1&hl=es &ct=clnk&gl=mx>.

Las fibras naturales en los materiales plásticos compuestos [en línea]. [citado 21 de abril de 2016]. Disponible en internet: < <http://www.plastico.com/temas/Las-fibras-naturales-en-los-materiales-plasticos-compuestos+3057872>>.

MAJÓ, Mayugo y ANDREU, Joan. Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a cargas cíclicas. Cataluña, 2003. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de resistencia de materiales y estructuras.

MARTÍNEZ GARCÍA, Samuel. Bambú como material estructural: Generalidades, aplicaciones y modelización de una estructura tipo. Valencia, 2015. Trabajo de grado (Ingeniero Agrónomo y del medio ambiente). Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Medio Ambiente. 46 p.

Materiales compuestos [en línea]. Málaga (España): Universidad Malacitana, 2004- [citado 21 de abril de 2016]. Disponible en internet: < [http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc\\_docencia/Tema7\\_CM.pdf](http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema7_CM.pdf)>.

Monitoreo y seguimiento al fenómeno de la deforestación en Colombia [en línea]. Colombia: Ideam, [citado 21 de abril de 2016]. Disponible en internet: < <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/deforestacion-colombia>>.

Montoya Arango, Jorge, González B., Héctor, Y Bedoya Sánchez, Jose. Dureza brinell y la influencia de la humedad relativa del ambiente, de la edad y la altura a lo largo del tramo en la especie de bambú guadua angustifolia kunth. En: *Scientia Et Technica*, Mayo. 2007. vol. 1, n. 34, p. 619-624. ISSN 0122-1701.

ORTÚZAR, Raúl. Revista de Marina. Mecánica de fractura en estructuras navales [en línea], [citado 18 de junio de 2016]. Disponible en internet: <<http://revistamarina.cl/revistas/2000/1/ortuzar.pdf>>.

RUIZ, María. Modelos Aleatorios Aplicados [en línea]. Granada (España): Universidad de Granada, 2004- [citado 18 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <[http://www.ugr.es/~mruiz/temas/Resumen\\_T3.pdf](http://www.ugr.es/~mruiz/temas/Resumen_T3.pdf)>.

SHAH, Darshil; SCHUBEL, Peter; CLIFFORD, Mike y LICENCE, Peter. Fatigue life evaluation of aligned plant fibre composites through S-N curves and constant-life diagrams. En: Revista Composites Science and Technology. Enero, 2013.vol. 74, p. 139-149.

TAKEUCHI, Caori Patricia. Caracterización mecánica del bambú guadua laminado para uso estructural. Bogotá, 2014. Tesis (Doctor en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

VERGARA, Camacho y MARTINEZ, Norma. Apuntes de Ciencia de los Materiales II. México: Instituto Politécnico Nacional Esime Azcapotzalco, 2008. 109 p.

WAMBUA, Paul; IVENS, Jan y VERPOEST, Ignaas. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?. En: Revista Composites Science and Technology. 2003. vol. 63, p. 1259-1264.