



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSTGRADOS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE MAGISTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO
ASISTIDOS POR COMPUTADOR**

**TEMA: “CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL CON
MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER Y REFUERZO CON FIBRA
NATURAL DE TOTORA (*SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS*),
MEDIANTE SIMULACIÓN A PARTIR DE
MICROFOTOGRAFÍA.”**

AUTOR: MEJÍA ECHEVERRÍA COSME DAMIÁN

DIRECTOR: GOYOS LEONARDO PHD.

SANGOLQUÍ

2017



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CENTRO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN DISEÑO Y MANUFACTURA ASISTIDO POR
COMPUTADOR

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL CON MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER Y REFUERZO CON FIBRA NATURAL DE TOTORA (*SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS*), MEDIANTE SIMULACIÓN A PARTIR DE MICROFOTOGRAFÍA.**” Realizado por el señor **COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio; el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo cual me permito acreditar y autorizar al señor **COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 03 de julio de 2017

LEONARDO GOYOS

DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CENTRO DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN DISEÑO Y MANUFACTURA ASISTIDO POR
COMPUTADOR**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA**, con cédula de identidad N° 1002641288 declaro que este trabajo de titulación “**CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL CON MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER Y REFUERZO CON FIBRA NATURAL DE TOTORA (*SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS*), MEDIANTE SIMULACIÓN A PARTIR DE MICROFOTOGRAFÍA.**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 03 de julio de 2017

A handwritten signature in blue ink, reading 'Cosme Mejía Echeverría', written over a horizontal dashed line.

COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA

C.C. 1002641288



CENTRO DE POSGRADO

MAESTRÍA EN DISEÑO Y MANUFACTURA ASISTIDO POR COMPUTADOR

AUTORIZACIÓN

Yo, **COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL CON MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER Y REFUERZO CON FIBRA NATURAL DE TOTORA (*SCHOENOPLECTUS CALIFORNICUS*), MEDIANTE SIMULACIÓN A PARTIR DE MICROFOTOGRAFÍA.”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 03 de julio de 2017

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Cosme Mejía Echeverría', is written over a horizontal dashed line.

COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA

C.C. 1002641288



DEDICATORIA

A Dios, que en cada etapa importante de mi vida me ha enviado a las personas adecuadas para alcanzar mis propósitos.

A mi compañera de lucha, mi amiga y madre de mis hijos Helen que en cada paso de éste objetivo estuvo sosteniéndome hasta alcanzarlo.

A mis hijos luceros de mi vida, por ustedes y para ustedes siempre estará mi esfuerzo, algún día espero verles superando lo enseñado.

A mi madre apoyo constante en cada etapa de mi vida, luchadora hasta el fin, con su ejemplo estoy aquí y con su ejemplo seguiré.

A mi abuela Aida que con sus oraciones cada día hizo que mi camino se ilumine para seguir adelante.

COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA



AGRADECIMIENTO

La gratitud es un valor que desde pequeño me inculcaron; quiero agradecer a mis hermanos Andrés, Gonzalo y Felipe que en todo momento estuvieron atentos de mis pasos y me apoyaron cuando era necesario.

A mi tutor Leonardo que a pesar del poco tiempo que lo conozco, desde la primera conversación supe que me podía apoyar en él, su vasto conocimiento me ayudo a culminar esta meta y no me equivoqué en mi primera impresión.

A mis amigos docentes, en especial a Diego, David, Marco, Gennifer, Víctor, Ivan y Fernando; que cada uno aportó con un granito de arena para que ésta meta llegue a ser una gran montaña.

COSME DAMIÁN MEJÍA ECHEVERRÍA

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA

CERTIFICADO.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN (PUBLICACIÓN BIBLIOTECA VIRTUAL).....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Desarrollo del problema.....	1
1.3 Formulación del problema a resolver.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Objetivos.....	3
1.5.1 General.....	3
1.5.2 Específicos.....	4
1.6 Antecedentes.....	4
1.7 Justificación.....	9
1.8 Alcance.....	10
1.9 Organización del trabajo.....	11
CAPÍTULO 2.....	13
2 MARCO REFERENCIAL.....	13
2.1 Marco Teórico.....	13
2.1.1 Micro mecánica del compuesto.....	13
2.1.2 Macro mecánica de la lámina.....	22
2.2 Estado del Arte.....	24
2.3 Marco Metodológico.....	29
2.3.1 Proceso experimental totora.....	29
2.3.2 Diagrama de Flujo del proceso experimental del material compuesto y resina	
31	

2.3.3	Descripción de normas	33
2.3.4	Microfotografía.....	35
2.3.5	Simulación del material compuesto.....	36
CAPÍTULO 3.....		37
3	METODOLOGÍA.....	37
3.1	Elaboración probetas de totora	37
3.2	Elaboración de moldes para resina y material compuesto.....	39
3.3	Preparación de resina.....	44
3.4	Preparación de probetas de resina y material compuesto.....	46
3.4.1	Probetas de resina	46
3.4.2	Probetas de material compuesto	47
3.5	Ensayos Mecánicos.....	49
3.6	Captura de imágenes micrográficas.....	50
3.7	Construcción de malla computacional.....	53
3.8	Simulación del material	55
3.8.1	Ensayo de tracción.....	55
3.8.2	Ensayo de flexión	56
CAPÍTULO 4.....		58
4	RESULTADOS	58
4.1	Curvas esfuerzo deformación	58
4.1.1	Totora.....	58
4.1.2	Resina	60
4.1.3	Material compuesto	60
4.2	Análisis de simulaciones realizadas.....	61
4.2.1	Ensayo de tracción.....	61
4.2.2	Ensayo de flexión	64
CAPÍTULO 5.....		66
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1	CONCLUSIONES.....	66
5.2	Recomendaciones	67
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Fracciones volumétricas comunes en procesos de fabricación.....	15
Tabla 2	ASTM D4761 - 02a tensión.- Ensayos de tensión de la madera de construcción y del material estructural de base de madera.....	33

Tabla 3	ASTM D4761- 02a flexión. - Ensayos de flexión de la madera de construcción y del material estructural de base de madera.....	33
Tabla 4	ASTM3039-14.- Ensayos de tensión para materiales compuestos con matriz polimérica	34
Tabla 5	ASTM7264-15.- Ensayos de flexión para materiales compuestos con matriz polimérica.	34
Tabla 6	ASTM D638-14.-Ensayos de tensión de plásticos Tipo I	35
Tabla 7	ASTM D790-15-e2-. Ensayos de flexión para plásticos reforzados y no reforzados.....	35
Tabla 8	Valores de resina y aditivos para su preparación para moldeo	44
Tabla 9	Esfuerzos y deformaciones máximas de la totora.....	59
Tabla 10	Comparación de resultados experimentales con simulación en tracción...63	
Tabla 11	Resultados obtenidos de la simulación del ensayo de tracción	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Descripción de Materiales Compuestos	4
Figura 2	Clasificación de los procesos de fabricación de materiales.....	6
Figura 3	a) Aplicación de la carga en dirección longitudinal, b) Análisis de esfuerzo - deformación en compuestos.....	16
Figura 4	a) Carga transversal aplicada a compuesto de fibra larga unidireccional, b) modelo de distribución equivalente de la fibra y matriz en el compuesto.	18
Figura 5	Aplicación de carga a) longitudinal b) transversal c) cortante de un compuesto de fibra larga unidireccional.....	19
Figura 6	Relación Módulo de elasticidad principal y secundario del compuesto y fracción volumétrica de fibra.	21
Figura 7	Esfuerzos en material compuesto Transversalmente isotrópico.....	22
Figura 8	Influencia del ángulo de orientación de la fibra en los coeficientes de influencia mutua.....	23
Figura 9	Curva esfuerzo deformación de la resina poliéster.....	29
Figura 10	Diagrama de flujo del proceso experimental.....	31
Figura 11	Probetas de fibra de totora.....	37
Figura 12	Proceso de presión de fibras	38
Figura 13	a) vista superior b) vista lateral de probetas presionadas	38
Figura 14	Probetas de totora para ensayo de flexión	39
Figura 15	Diagrama del molde hembra para lámina de 15 probetas D3039.	40
Figura 16	Diagrama del molde macho para lámina de 15 probetas D3039.....	40
Figura 17	Diagrama del molde hembra para lámina de 15 probetas D7264	41
Figura 18	Diagrama de molde macho para lámina de 15 probetas D7264.....	41
Figura 19	Diagrama de molde hembra para lámina de 15 probetas D790.....	42
Figura 20	Diagrama molde macho para lámina de 15 probetas D790.....	42
Figura 21	Diagrama de molde hembra para lámina de 15 probetas D638.....	43

Figura 22 Diagrama de molde macho para lámina de 15 probetas D638.....	43
Figura 23 Medición de la proporción de resina en balanza CAMRY.....	45
Figura 24 Mezcla de resina con estireno.....	45
Figura 25 Mezcla de Resina con cobalto.....	46
Figura 26 Temperatura del ambiente de trabajo.....	46
Figura 27 Resina ubicada en molde para su presión.....	46
Figura 28 Prensado de moldes para obtención de probetas.....	47
Figura 29 Vista de la sección transversal de la totora a 100x.....	48
Figura 30 Sujeción y elevación de fibra de totora mediante plastilina.....	48
Figura 31 Máquina de ensayos universal James Heal del laboratorio de textil de la Universidad Técnica del Norte-Ecuador.....	49
Figura 32 Máquina de ensayos marca MTS de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.....	50
Figura 33 Micrografía a 100x de los grupos de diámetro fino, medio, grueso, fibra prensada.....	51
Figura 34 Micrografía a 100x del material compuesto con fibra sin lijar.....	52
Figura 35 Micrografía del material compuesto con fibra sin lijar a: a)200x b) 400x.....	52
Figura 36 Micrografía a 100x del material compuesto con fibra lijada.....	53
Figura 37 Micrografía a 200x del material compuesto con fibra lijada.....	53
Figura 38 Diseño de la totora para malla computacional.....	54
Figura 39 Malla computacional de la totora.....	55
Figura 40 Diseño de la resina para la malla computacional.....	55
Figura 41 Malla computacional de la resina.....	55
Figura 42 Diseño de la probeta con la sujeción para tracción.....	56
Figura 43 Diseño de la probeta con la sujeción para flexión.....	57
Figura 44 Esfuerzo vs Deformación de la fibra de totora diámetro fino.....	58
Figura 45 Esfuerzo vs Deformación de la fibra de totora diámetro medio.....	58
Figura 46 Esfuerzo vs Deformación de la fibra de totora diámetro grueso.....	59
Figura 47 Esfuerzo vs Deformación de Resina Poliester Sintapol 2074.....	60
Figura 48 Curva Esfuerzo deformación unitaria del material compuesto.....	61
Figura 49 Esfuerzo máximo del ensayo de tracción del material compuesto.....	62
Figura 50 Deformación máxima el ensayo de tracción del material compuesto.....	62
Figura 51 Desplazamiento simulado en el ensayo de tracción.....	63
Figura 52 Curva de convergencia de la simulación del ensayo de tracción.....	63
Figura 53 Esfuerzo máximo del ensayo de tracción del material compuesto.....	64
Figura 54 Deformación máxima el ensayo de tracción del material compuesto.....	64
Figura 55 Desplazamiento simulado en el ensayo de tracción.....	65
Figura 56 Curva de convergencia de la simulación del ensayo de flexión.....	65

RESUMEN

La fibra de totora (*schoenoplectus californicus*) ha sido ampliamente aplicada en la fabricación de estructuras, muebles y construcciones; sin embargo, no se ha desarrollado un material compuesto que mejore sus propiedades, ni se ha propuesto formalmente un método de caracterización mecánica. La presente investigación consiste en la elaboración de un material compuesto en base a matriz de resina poliéster reforzada con fibra de totora, y propone un método de caracterización mecánica. A partir de ensayos mecánicos de tracción y flexión, y bajo las normas ASTM D4761-02a para la fibra, D638-14 y D790-15-e2 para la resina, y D3039-14 y D7264-15 para el material compuesto, se han obtenido las curvas de esfuerzo-deformación de los materiales constituyentes y del material compuesto bajo análisis. En la simulación, el material propuesto está conformado por dos mallas computacionales independientes para cada material constituyente, construidas a partir de los datos experimentales y con un enlace matriz-refuerzo del 100%. Los resultados simulados de tracción y flexión convergen a los obtenidos a través de ensayos experimentales, validando el mallado propuesto. El material obtenido posee un esfuerzo máximo a la tracción de $70,942 \pm 1,045$ MPa y una deformación unitaria de $0,0472 \pm 0,0015$ mm/mm, con un módulo de elasticidad de $1503,81 \pm 46,066$ MPa, y un esfuerzo máximo a la flexión de $89,13 \pm 6,16$ MPa. La fibra brinda un gran aporte mecánico a la resina poliéster mejorando su comportamiento a la tracción y flexión; gracias al aporte de la resina, la fibra disminuye sus propiedades intrínsecas de degradación por exposición a condiciones ambientales.

Palabras Claves:

- MATERIAL COMPUESTO
- TOTORA
- RESINA POLIÉSTER
- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA
- SIMULACIÓN

ABSTRACT

The totora fiber (*schoenoplectus californicus*) has been widely applied on structures, furniture and buildings; however, a composite material that improves its properties and its own mechanical characterization method have not been formally proposed in the literature. From tensile and flexural mechanical tests, and according to ASTM D4761-02a for fiber, D638-14 and D790-15-e2 for resin, and D3039-14 and D7264-15 for the composite material, the stress-strain curves for both the constituent materials and the composite material under analysis, have been obtained. In reference to simulations, the proposed material consists of two independent computational meshes for each constituent material, constructed from the experimental data and with a 100% of matrix-reinforcement bond. The results of the simulated tensile and bending tests converge to those obtained through experimental tests, validating the proposed meshing. The composite material obtained has a maximum tensile stress of 70.942 ± 1.045 MPa and a unitary strain of 0.0472 ± 0.0015 mm / mm, with an elasticity modulus of 1503.81 ± 46.066 MPa, and a maximum flexion stress of 89.13 ± 6.16 MPa. One of the relevant results establishes that the fiber provides a great mechanical contribution to the polyester resin, improving its tensile and flexural behavior; it is observed that thanks to the contribution of the resin, the fiber decreases its intrinsic properties of degradation by exposure to adverse environmental conditions.

KEYWORDS:

- **COMPOSITE MATERIAL**
- **TOTORA**
- **POLYESTER RESIN**
- **MECHANIC CHARACTERIZATION**
- **SIMULATION.**

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Objeto de Estudio. Material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (*Schoenoplectus californicus*)

Campo de Acción. Caracterización mediante microfotografía y simulación de ingeniería. Validación propiedades mecánicas.

Caracterización de un material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (*Schoenoplectus californicus*), mediante simulación de ingeniería a partir de microfotografía validado con ensayos experimentales.

La ingeniería asistida por computador de sus siglas en inglés CAE, es una herramienta fundamental que asiste al diseñador en el análisis de esfuerzos al que se someterá cierto prototipo, es muy importante para que la simulación se acerque a la realidad, poseer las características macro y micro mecánicas del material sobre el que se desea ensayar el prototipo. Es por esto, que es necesario plantear la caracterización de un material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (*Schoenoplectus californicus*), mediante simulación a partir de la microfotografía, validarlo mediante ensayos experimentales y plantear sus posibles aplicaciones.

1.2 Desarrollo del problema

En la actualidad existe la tendencia a mejorar los procesos, materiales y productos finales de tal manera que sean amigables con el ambiente. Esto ha llevado a revisar los componentes utilizados en los diferentes procesos, generar nuevos procesos menos contaminantes y sobre todo a reutilizar muchos componentes que en el ambiente tardan en descomponerse o que en gran cantidad generan alta contaminación.

Los residuos de fibras naturales y el exceso de producción de ciertas plantas en diferentes sectores provocan el incremento de la contaminación ambiental en el sector de producción; por esto, se busca utilizar estos excedentes o desperdicios en diferentes procesos que permiten generar energía o conformar nuevos productos, eliminando la contaminación.

En la zona 1, específicamente en la provincia de Imbabura, al estar rodeada de diferentes fuentes hídricas existe una vasta producción de totora. La misma se utiliza para la elaboración de recuerdos y figuras artesanales. Sin embargo, estas aplicaciones artesanales, por su característica manual, no utilizan toda la producción de totora. Siendo la totora silvestre en presencia de la fuente hídrica, la que se convierte en un problema de contaminación para la misma.

Los materiales compuestos tienen la característica de tener dos componentes fundamentales: la matriz que es la base sobre el que se forma el nuevo material que puede ser un polímero como la resina o un cerámico como el cemento, y reforzado con fibras de diferente estructura y forma que permite mejorar las propiedades mecánicas del material matriz. Al desear sustituir materiales contaminantes o no amigables con el ambiente, o que simplemente no existen en el medio por no producirse, es necesario buscar nuevos materiales que se puedan insertar en diferentes aplicaciones industriales.

Para ello es importante poseer los datos de las características mecánicas del material compuesto para poder utilizarlos en simulaciones de ingeniería en la construcción de prototipos y obtener resultados muy similares a lo que sucedería en la realidad.

Una forma de obtener estas características es mediante la simulación del material sobre una malla construida a partir de la microfotografía del material y validada con ensayos experimentales, permitiendo con esto asegurar el proceso de simulación y por lo tanto declararlo válido en cualquier estructura similar.

1.3 Formulación del problema a resolver

El desconocimiento de las propiedades mecánicas de un material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (*Schoenoplectus californicus*), impide realizar los cálculos analíticos de mecánica de sólidos, así como también imposibilita el análisis, mediante elementos finitos, de prototipos a construirse con el material compuesto.

1.4 Hipótesis

Si se logra una adecuada caracterización de las propiedades mecánicas bajo tensión y flexión del material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (*Schoenoplectus californicus*) será posible, validar la convergencia de la simulación de ingeniería, con ensayos experimentales y micrografía, sugerir las opciones de reemplazo y uso del material objeto de estudio y su proceso de simulación en prototipos.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Realizar la caracterización de un material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (*Schoenoplectus californicus*) mediante ensayos experimentales; que valide la simulación de ingeniería apoyado de microfotografía.

1.5.2 Específicos

- Analizar las metodologías de simulación basadas en teorías de constitución de materiales y de falla.
- Diseñar y ejecutar la metodología experimental que permita obtener las características mecánicas de la fibra, resina y material compuesto.
- Obtener la propuesta de malla computacional del material compuesto a partir de la microfotografía y simulación de ingeniería.
- Comparar los resultados obtenidos en la simulación y los ensayos experimentales.

1.6 Antecedentes

La búsqueda de materiales de bajo costo y propiedades mecánicas aceptables, ha llevado a una fuerte línea de investigación en el área de materiales compuestos, los mismos que pueden ser considerados como sintéticos o naturales dependiendo de las fibras que lo refuerzan (Ossa, Cano, Arango, & Montoya, 2007) (Kumar Thakur, Kumari Thakur, & Kumar Gupta, 2014). En la figura 1 se observa la descripción de los materiales compuestos.

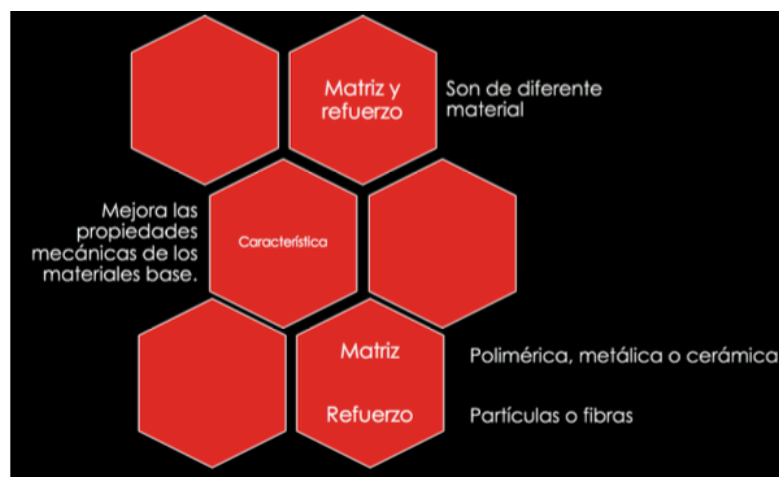


Figura 1. Descripción de Materiales Compuestos

Fuente: (Guerrero, y otros, 2011)

Existen varios estudios enfocados a las fibras sintéticas que muestran unas mejoras sustanciales en las propiedades mecánicas comparados con las correspondientes a las fibras naturales. (Sangthong, 2009) (Bledzki & Sperber, 2007). Sin embargo, el apego a un eco diseño y mantener un proceso amigable con el ambiente, ha generado el uso de fibras naturales, como refuerzo de materiales compuestos, buscando procesos que permitan una buena adhesión en la interface (Tapia, Paredes, Simbaña, & Bermúdez, 2006) (Bledzki & Sperber, 2007) (Cuéllar & Muñoz, 2010) (Kumar Thakur, Kumari Thakur, & Kumar Gupta, 2014)

Dentro del proceso de fabricación de materiales compuestos, se observan varios estudios que utilizan como matriz a polímeros como el polietileno, polipropileno, cloruro poli vinílico o resinas termoestables por sus características de dureza y bajo costo. El más utilizado es la resina Poliéster diluida en monómero estireno con acelerantes de octoato de cobalto y peróxido de metil cetona para su catalización. En esta matriz se insertan refuerzos de fibras naturales con diferentes características, entre las que se puede mencionar las que son obtenidas de residuos agroindustriales como el bagazo de caña, los residuos de piña, banano y coco; pero también se encuentran las obtenidas de recursos renovables de rápida recuperación como es el bambú, thypa, sisal y cabuya.

Cada uno de estos procesos de fabricación tienen una característica especial que los diferencia y está dado por la forma en que la fibra se ubica en la matriz, lo que puede ser de forma aleatoria, en una sola dirección con tejido; en whiskers, retazos de dimensiones similares o fibras completas. (Quesada, Alvarado, Sibaja, & Vega, 2005) (Saira, Ali, & Shafiullah, 2007) (Susheel, B.S., & Inderjeet, 2009) (Sanjuan & Jasso,

2009) (Thiruchitrabalam, Athijayamani, Sathiyamurthy, & Syed Abu Thaheer, 2010) (Ratna , Mohana , & Gupta, 2013) (Rodríguez, Sarache, & Orrego, 2014) (Rodríguez, Valín, Díaz, Muniz, & Sanabio, 2014).

El material compuesto no solo depende de cuáles serán sus componentes en la matriz y en el refuerzo, también hay que tomar en cuenta el proceso de fabricación que según Guerrero y otros 2011. los clasifican como se muestra en la figura 2.

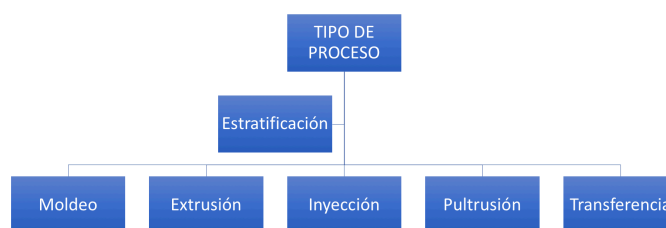


Figura 2. Clasificación de los procesos de fabricación de materiales
Fuente (Guerrero, y otros, 2011)

De estos se puede establecer que los más utilizados por su facilidad de implementación y bajo costo son los de estratificación por pre impregnación, moldeo por aspersión y Estratificación manual; sin embargo, se detalla en el enfoque de Guerrero y otros, que mientras mejor sea el proceso de fabricación mejores resultados se obtendrán en la adhesión en la interface y por ende en las propiedades del material. Por lo que se recomienda los procesos de extrusión, inyección, moldeo por compresión y pultrusión que mejoran las características antes mencionadas, pero a la vez elevan el costo de producción por requerir de máquinas enfocadas a la producción y matricería para la misma. (Pontón & Guerrero, 2010) (Guerrero, y otros, 2011)

La caracterización de los materiales compuestos está en continuo desarrollo, como se analizó en los estudios antes mencionados, el material mejora en menor o mayor medida dependiendo de las características de su matriz, la ubicación de las fibras y el material de refuerzo, por lo que no se puede afirmar que un material con la

misma matriz y refuerzo de fibra natural tenga las mismas propiedades mecánicas en sus diferentes configuraciones; tal como se evidencia en varios estudios de refuerzos de fibras naturales (Bonelli, Elzubair, & Miguez, 2005) (Monteiro, Terrones, Lopes, & M. d'Almeida, 2005) (Balam, Duarte, & Canché, 2006) (Ossa, Cano, Arango, & Montoya, 2007) (Sangthong, 2009) (Ramanaiah, Ratna Prasad, & Hema Chandra Reddy, 2011) (Hidalgo, Muñoz, & Quintana, 2012) (Dedeepya, Dharma Raju, & Jayananda Kumar, 2012) (Ratna , Mohana , & Gupta, 2013) (Barrera, Hidalgo, & Mina, 2012).

El Ecuador está considerado como un país rico en biodiversidad ya que posee el 10% de las especies de plantas en el planeta (INEFAN , 1998), sin embargo, solo genera el 0.1% de fibras naturales, por tal motivo el país es una buena fuente de fibras naturales para aplicaciones industriales. (FAO, 2012)

Estudios demuestran el uso de teorías de falla en materiales compuestos y el uso de teorías de mezclas serie paralelos para obtener una simulación que se asemeja a los ensayos experimentales en materiales compuestos con resinas y fibras sintéticas en su comportamiento lineal y no lineal, (BARBERO, SGAMBITTERRA, ADUMITROAIE, & MARTINEZ, 2011). (Marinez, Oller, Rastellini, & Barbat, 2008)

La utilización de la simulación de ensayos experimentales utilizando teorías de falla y teorías constitutivas de los materiales compuestos son utilizadas en gran medida y validadas con ensayos experimentales, obteniendo resultados muy cercanos a los ensayos experimentales que permiten proporcionar metodologías adecuadas de simulación para futuros prototipos. (Martinez & Oller, 2009) (Paredes, Barbat, & Oller, 2011)

Otros estudios logran a partir de las teorías de laminación del material compuesto obtener simulaciones muy cercanas a los ensayos experimentales y además utilizar estos datos para validar las investigaciones. (Borg, Nilsson, & Simonsson, 2002) (Otero, Martinez, Oller, & Salomon, 2012)

Existen varios estudios de materiales compuestos reforzados con fibras de coco, abacá y cabuya dentro del país y se ha generado la caracterización de los mismos basados ensayos de flexión y tracción de probetas bajo las normas ASTM D 7264 y ASTM D 3039 respectivamente; generando datos importantes en la aplicación de métodos de fabricación y ubicación de fibra sobre la matriz polimérica. En estos estudios se observan comparaciones de las diferentes configuraciones y los resultados experimentales de los mismos, enfocados en ensayos de tracción y flexión en su mayoría. (Pontón & Guerrero, 2010) (Guerrero, y otros, 2011) (Fajardo, Valarezo, López, & Sarmiento, 2013) (Molina, Benavides, Moreno, & Iribarra, 2014)

La totora (*Schoenoplectus californicus*), es una planta perteneciente a la familia de las ciperáceas que tiene su hábitat en humedales de la costa y la sierra ecuatoriana, tiene características que ayudan a la limpieza de los recursos hídricos, de rápido florecimiento y plantación. (USDAARS, 2012)

En estudios realizados por Simbaña, se establece que la totora en la provincia de Imbabura tiene un gran potencial de desarrollo en varias aplicaciones entre las que se analiza el papel de totora por las características resistivas del material. (Simbaña, 2001)

No se han encontrado estudios de caracterización de un material compuesto de fibra de totora con resina poliéster a partir de ensayos experimentales, que validen las simulaciones en software de ingeniería apoyado de la microfotografía del material.

1.7 Justificación

En la actualidad se busca sustituir los materiales catalogados como tradicionales por materiales con mejores prestaciones mecánicas, económicas, ambientales, productivas entre otras, de manera que permita abaratar costos de fabricación, mejorar las características mecánicas del objeto, sea amigable con el ambiente y sobre todo sea de fácil obtención y elaboración. Es por esto que se están realizando varios estudios de elaboración de materiales compuestos con resina poliéster y diferentes fibras de refuerzo, con las que se pueda variar las características mecánicas del material y utilizarlo en diferentes aplicaciones de manufactura.

Dentro de las fibras existe la tendencia de la utilización de fibras naturales o bagazo de las mismas que permita además de reforzar el material descontaminar los sitios de acopio o producción de las fibras y sobre todo proponer una nueva forma de producto terminado a los productores de las fibras.

La caracterización del material es muy importante para obtener datos específicos del mismo en cuanto a la configuración utilizada y sus proporciones, para utilizar los mismos en software de ingeniería y permitir la simulación muy cercana a la realidad de prototipos que se desee construir con estos materiales.

Una forma de obtener estas características es mediante la simulación del material sobre una malla construida a partir de la microfotografía del material y validada con ensayos experimentales, permitiendo con esto asegurar el proceso de simulación y por lo tanto declararlo válido en cualquier estructura similar.

En el Ecuador, se está buscando cambiar la matriz productiva para pasar de simples productores de materia prima a microempresarios que elaboren el producto final o terminado. En la provincia de Imbabura existe la producción de totora, la misma

que es utilizada en artesanías, sin embargo, se observa un potencial bastante alto en la fabricación de material compuesto con totora de planchas del mismo para aplicaciones de manufactura; con esto se apoya al cambio de la matriz productiva presentando diferentes aplicaciones para obtener un producto terminado.

No se han encontrado estudios de caracterización de un material compuesto de fibra de totora con resina poliéster mediante simulaciones en software de ingeniería a partir de la microfotografía del material.

1.8 Alcance

En este trabajo se plantea la caracterización de un material con matriz de resina poliéster y refuerzo con fibra natural de totora (*Schoenoplectus californicus*), mediante ensayos experimentales de tracción y flexión apoyado de la micrigrafía, que validen el mallado adecuado de los materiales constituyentes para su aplicación en simulación de ingeniería de prototipos construidos con el material compuesto.

Esto se logrará planteando el diseño de la metodología experimental que permita obtener las características mecánicas del material compuesto mediante ensayos experimentales. Se procederá a realizar las microfotografías del material objeto de estudio. Apoyado en un software de ingeniería se generará la malla de la matriz de resina y el refuerzo de totora construidas con los datos experimentales y se simulará los ensayos ejecutados en el material compuesto. Una vez obtenido los resultados de los ensayos y de las simulaciones se procederá a la comparación de los mismos para emitir un criterio y recomendaciones para futuras implementaciones con el material objeto de estudio y sus posibles aplicaciones de uso y sustitución de materiales.

1.9 Organización del trabajo

Planteamiento del anteproyecto.

Estudio del Arte previo

Elaboración de documento

Presentación del anteproyecto consejo asesor de la MAESTRÍA

Analizar la macro y micro mecánica de un material compuesto

Estudio de micro mecánica de un material compuesto

Estudio de macro mecánica de una lámina de material compuesto

Diseñar y ejecutar la metodología experimental que permita obtener las características mecánicas de la fibra, resina y material compuesto.

Análisis de Normas de ensayos de flexión y tracción

Propuesta de elaboración del material objeto

Propuesta de ensayos experimentales para flexión y tracción

Propuesta de captura de imágenes micrográficas

Elaboración de moldes de probetas

Elaboración de probetas del material compuesto

Ensayos de tracción y flexión

Muestreo microscópico mediante imágenes de alta resolución

Simular los ensayos de tracción y flexión del material compuesto.

Construcción de la malla computacional

Simulaciones del material compuesto

Comparar los resultados obtenidos en la simulación y los ensayos experimentales.

Recopilación de resultados

Confección de curvas Esfuerzo deformación

Validación de la simulación a partir de los ensayos experimentales.

Elaboración de informe de resultados y redacción del libro de tesis.

CAPÍTULO 2

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco Teórico

Un material compuesto está formado por un componente de fase uniforme continua, llamado matriz. Este puede ser de diferentes composiciones entre estas cerámica, metálica o polimérica.

Las láminas se pueden clasificar en: Compuestos reforzado con partículas, compuesto reforzado con fibras cortas o compuesto reforzado con fibras largas (Mallick, 2007). Para esta investigación se analizan las láminas de compuestos reforzados con fibras largas unidireccionales, donde el material es un caso especial de la orto trópica que se ubica en el grupo de los transversalmente isotrópicos.

Al ser los materiales compuestos más complejos en cuanto a diseño y análisis con respecto a los materiales tradicionales, es necesario realizar un análisis de estos materiales a nivel micro y macro mecánico, que nos permita obtener una aproximación analítica a los mismos.

2.1.1 Micro mecánica del compuesto

La micro mecánica propone analizar al material compuesto mediante análisis de sus materiales constituyentes. Se analiza la interacción entre los componentes del material y sus proporciones dentro del mismo.

Existen modelos propuestos para el modelado micro mecánico, en esta investigación nos basaremos en el modelo más simple e intuitivo, conocido como “regla de las mezclas”.

La regla de las mezclas propone que en un volumen determinado de una lámina existen tres regiones diferentes: fibra (f), matriz (m) y vacíos (v). (Kaw, 2006)

La interacción entre estos tres materiales propone los siguientes enunciados (Kaw, 2006):

$$M_c = M_f + M_m \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

M_c = masa del compuesto

M_f = masa de la fibra

M_m = masa de la matriz

$$V_c = V_f + V_m + V_v \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

V_c = volúmen del compuesto

V_f = volúmen de la fibra

V_m = volúmen de la matriz

V_v = volúmen de los vacíos

Se divide las ecuaciones 1 y 2 para la masa y volumen del compuesto respectivamente, obteniendo las fracciones másicas y volumétricas.

$$1 = m_f + m_m \quad \text{Ecuación 3}$$

$$1 = v_f + v_m + v_v \quad \text{Ecuación 4}$$

Cuando la fracción volumétrica de vacíos es despreciable la ecuación 4 se la representa así:

$$v_m = 1 - v_f \quad \text{Ecuación 5}$$

La fracción de la fibra satisface la relación $0 < v_f < 1$, que según el proceso de fabricación del material se encuentra en los valores de la tabla 1, en la siguiente página.

Tabla 1*Fracciones volumétricas comunes en procesos de fabricación*

Proceso de Moldeo	Fracción volumétrica de fibra
Moldeo por contacto	30%
Moldeo por presión	40-60%
Devanado por filamentos	60-85%
Moldeo por vacío	50 – 80%

Fuente: (Gay, Hoa , & Tsai, 2003)

Tomando en cuenta las densidades de los constituyentes en la ecuación q se obtiene (Kaw, 2006):

$$M_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad \text{Ecuación 6}$$

A partir de esta ecuación se procede a obtener la densidad del compuesto

$$\rho_c = \frac{M_c}{V_c} = \frac{\rho_f V_f + \rho_m V_m}{V_c} = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad \text{Ecuación 7}$$

Con la ecuación 7 se puede obtener una relación entre la fracción volumétrica y la fracción másica.

$$v_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot m_f \quad \text{Ecuación 8}$$

$$v_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot m_m \quad \text{Ecuación 9}$$

Una vez conocido las proporciones másicas y volumétricas es necesario obtener los módulos de elasticidad longitudinal, transversal y a cizalladura de un material compuesto con fibras unidireccionales paralelas al eje longitudinal.

Mallick propone que: en un material compuesto con fibra larga unidireccional, con una carga aplicada en el sentido de la fibra, como se muestra en la figura 3a, se asume un acoplamiento perfecto entre la fibra y la matriz por lo que se asume que las

deformaciones en el compuesto son las mismas que en la matriz y la fibra, como se observa en la figura 3b. (Mallick, 2007)

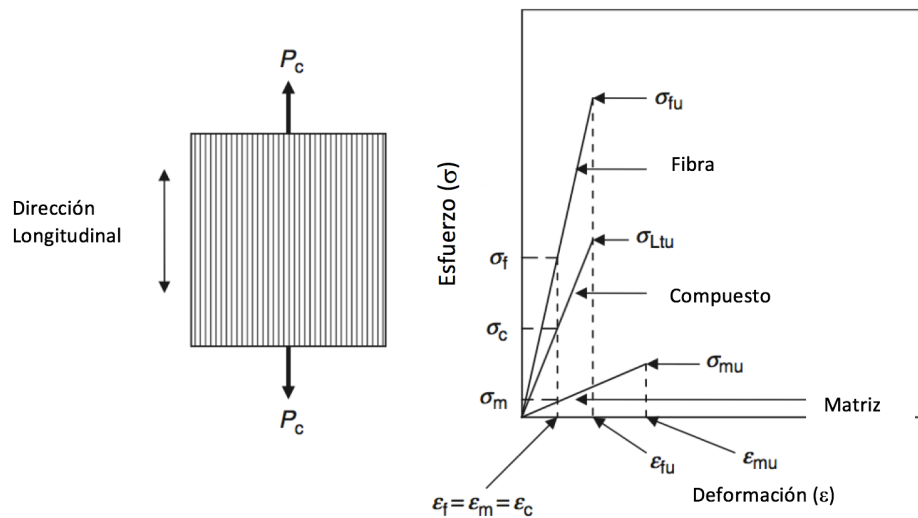


Figura 3 a) Aplicación de la carga en dirección longitudinal, b) Análisis de esfuerzo - deformación en compuestos

Fuente: (Mallick, 2007)

A partir de esta igualdad $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$ se procede a obtener el módulo de elasticidad longitudinal para un compuesto con fibra larga unidireccional.

Tanto la fibra como la matriz son elásticas por lo que se propone que (Mallick, 2007)

$$\sigma_f = E_f \cdot \epsilon_f = E_f \cdot \epsilon_c \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \epsilon_m = E_m \cdot \epsilon_c \quad \text{Ecuación 11}$$

Como $E_f > E_m$, se concluye que el esfuerzo de tensión de la fibra siempre será mayor al esfuerzo de tensión de la matriz.

La fuerza P_c de tensión aplicada al compuesto se reparte a la fibra y a la matriz.

$$P_c = P_m + P_f \quad \text{Ecuación 12}$$

Dado que Fuerza es igual al esfuerzo por el área obtenemos la siguiente relación (Mallick, 2007)

$$\sigma_c = \sigma_f \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \frac{A_m}{A_c} \quad \text{Ecuación 13}$$

Tomando en cuenta que el área del compuesto es igual a la suma del área de la fibra con el área de la matriz.

Como se propone un material con fibra unidireccional larga, y las deformaciones de los dos son las mismas, se puede decir que en una porción de volumen de material compuesto las longitudes de los componentes son las mismas por lo que se puede asumir la siguiente relación. (Mallick, 2007)

$$v_f = \frac{A_f}{A_c} \quad \text{y} \quad v_m = \frac{A_m}{A_c} = (1 - v_f) \quad \text{Ecuación 14}$$

Sustituyendo 14 en 13 se obtiene la relación:

$$\sigma_c = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m = \sigma_f v_f + \sigma_m (1 - v_f) \quad \text{Ecuación 15}$$

Si se divide los dos lados de la ecuación 15 para la ϵ_c y se utiliza las ecuaciones 10 y 11 se obtiene el módulo de elasticidad longitudinal del compuesto. (Mallick, 2007)

$$E_1 = E_f v_f + E_m v_m = E_f v_f + E_m (1 - v_f) = E_m + v_f (E_f - E_m) \quad \text{Ecuación 16}$$

Al analizar esta ecuación se observa que el módulo de elasticidad longitudinal incrementa directamente proporcional al incremento de la fracción volumétrica de la fibra, ya que el módulo de elasticidad de la fibra siempre es mayor al módulo de elasticidad de la matriz.

Ahora se procede a desarrollar el cálculo del módulo de elasticidad transversal según lo propone Mallick, para esto se asume que el esfuerzo transversal del compuesto es igual al esfuerzo transversal de la fibra y este es igual al esfuerzo transversal de la matriz $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$. (Mallick, 2007)

Además, se propone que la deformación transversal total (W_c) es igual a la suma de las deformaciones de la fibra y la matriz.

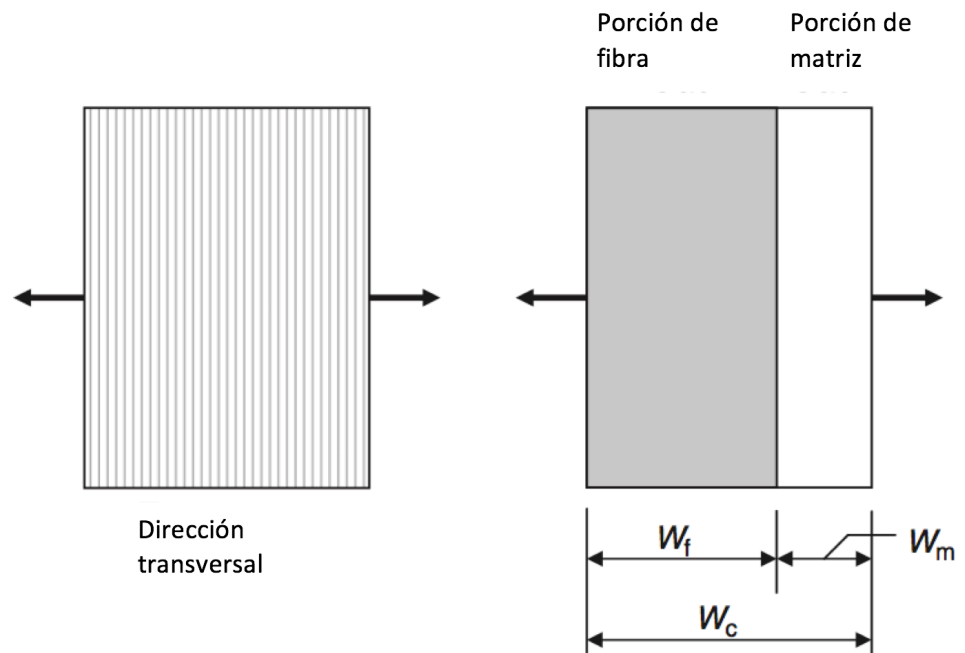


Figura 4 a) Carga transversal aplicada a compuesto de fibra larga unidireccional, b) modelo de distribución equivalente de la fibra y matriz en el compuesto.

Fuente: (Mallick, 2007)

$$\Delta W_c = \Delta W_f + \Delta W_m \quad \text{Ecuación 17}$$

Como $\varepsilon_c = \frac{\Delta W_c}{W_c}$, $\varepsilon_f = \frac{\Delta W_f}{W_f}$ y $\varepsilon_m = \frac{\Delta W_m}{W_m}$, la ecuación 17 queda (Mallick, 2007).

$$\varepsilon_c W_c = \varepsilon_f W_f + \varepsilon_m W_m \quad \text{Ecuación 18}$$

Sabiendo que $v_f = \frac{W_f}{W_c}$ y $v_m = \frac{W_m}{W_c}$, dividiendo para W_c la ecuación 18 queda:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f v_f + \varepsilon_m v_m \quad \text{Ecuación 19}$$

Aplicando la ley de Hooke la ecuación 19 se expresa de la siguiente manera:

(Mallick, 2007)

$$\frac{\sigma_c}{E_2} = \frac{\sigma_f}{E_f} v_f + \frac{\sigma_m}{E_m} v_m \quad \text{Ecuación 20}$$

Despejando la ecuación 20 y sabiendo que los esfuerzos en el compuesto, fibra y matriz son los mismos se obtiene el módulo transversal para un compuesto de fibra larga unidireccional. (Mallick, 2007)

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f v_m + E_m v_f} = \frac{E_f E_m}{E_f - v_f (E_f - E_m)} \quad \text{Ecuación 21}$$

Finalmente se analiza el cálculo del módulo de cizallamiento del compuesto (Mallick, 2007) .

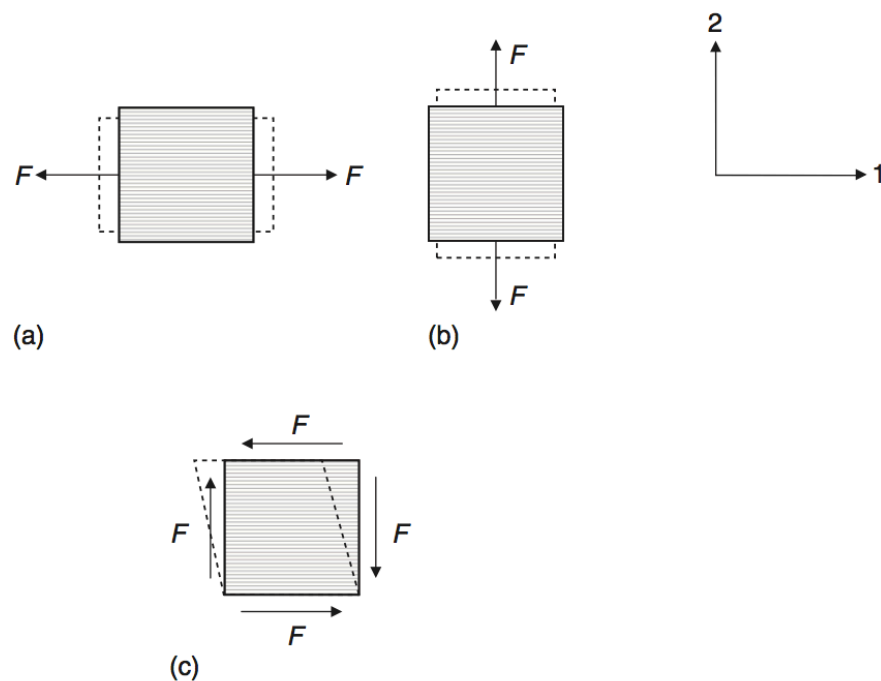


Figura 5 Aplicación de carga a) longitudinal b) transversal c) cortante de un compuesto de fibra larga unidireccional.

Fuente: (Mallick, 2007)

El módulo a la cizalladura está definido por $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ donde el coeficiente de Poisson está relacionado al módulo de cizalladura.

En un material orto trópico es necesario conocer 9 variables independientes, que son los módulos de Young en las tres direcciones, los módulos de cizalladura en las tres áreas, y los tres coeficientes de Poisson. (Mallick, 2007)

Para un compuesto de fibras largas unidireccionales, al ser considerado un caso especial de los materiales orto trópicos (transversalmente isotrópico) es necesario solo conocer cinco de estas nueve variables ($E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{23}$). (Mallick, 2007)

En vista de que las propiedades elásticas son iguales en los planos 2 y 3 se establece que el módulo de elasticidad $E_2 = E_3$, el coeficiente de Poisson $\nu_{12} = \nu_{13}$ y el módulo de cizalladura $G_{12} = G_{13}$, se propone que el módulo de cizalladura del plano 2-3 se exprese: (Mallick, 2007)

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{23})} \quad \text{Ecuación 22}$$

Hay que tomar en cuenta que $\nu_{21} = \nu_{31}$, pero $\nu_{12} \neq \nu_{21}$, $\nu_{13} \neq \nu_{31}$, lo que permite obtener el coeficiente de Poisson no independiente. (Mallick, 2007)

Christensen propone a partir de ensayos experimentales, para los materiales compuestos transversalmente isotrópicos con fibra unidireccional larga, el coeficiente de Poisson para las direcciones 2-3 en función de los coeficientes de las direcciones 1-2 por lo que las variables independientes se reducen de 5 a 4. (Christensen, 1998)

$$\nu_{23} = \nu_{32} = \nu_{12} \frac{(1-\nu_{21})}{(1-\nu_{12})} \quad \text{Ecuación 23}$$

A partir de estos datos se procede a obtener las relaciones que permitan obtener las variables restantes en función de los datos de los constituyentes del material compuesto. (Mallick, 2007)

El coeficiente de Poisson mayor, parte de la ecuación 24.

$$\nu_{12} = \nu_f \nu_f + \nu_m \nu_m \quad \text{Ecuación 24}$$

El coeficiente de Poisson menor, parte de la relación presentada en la ecuación 25.

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \nu_{12} \quad \text{Ecuación 25}$$

Mallick establece el módulo a la cizalladura en la ecuación 26. (Mallick, 2007)

$$G_{12} = G_{21} = \frac{G_f G_m}{G_f v_m + G_m v_f} \quad \text{Ecuación 26}$$

En la figura 6 se puede observar la relación entre el volumen de fibra y los módulos de elasticidad principal y secundario del material compuesto con fibra unidireccional larga.

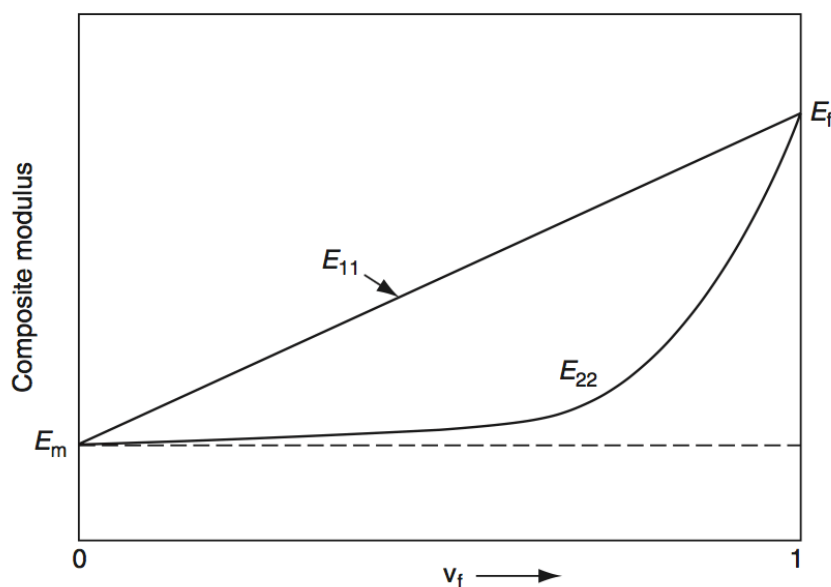


Figura 6 Relación Módulo de elasticidad principal y secundario del compuesto y fracción volumétrica de fibra.
Fuentes: (Mallick, 2007)

El análisis micromecánico propuesto hasta este momento es exclusivo para materiales compuestos reforzados con fibra larga unidireccional considerado transversalmente isotrópico, en donde se cumple que el módulo de elasticidad longitudinal es mucho mayor que el módulo de elasticidad transversal.

Donde las fibras contribuyen más al desarrollo del módulo de elasticidad longitudinal y la matriz contribuye más al desarrollo del módulo de elasticidad transversal; sin embargo, existen otros elementos que permiten mejorar las

características del material, entre ellas se analiza la adherencia y longitud crítica de la fibra. (Mallick, 2007)

La adherencia de la matriz en la fibra es muy importante en el funcionamiento correcto de un material compuesto mientras menor adherencia se detecte, menor transmisión de propiedades existe. (Mallick, 2007)

2.1.2 Macro mecánica de la lámina

En esta sección se desarrollará el análisis de un material compuesto, como un sólo componente, a nivel macro mecánico se considera a la lámina como un material homogéneo donde las propiedades de los componentes generan un aporte aparente promedio del material.

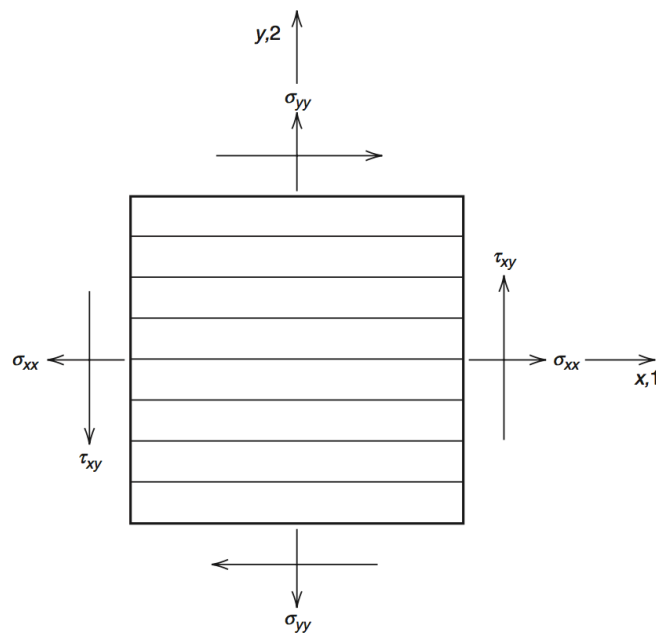
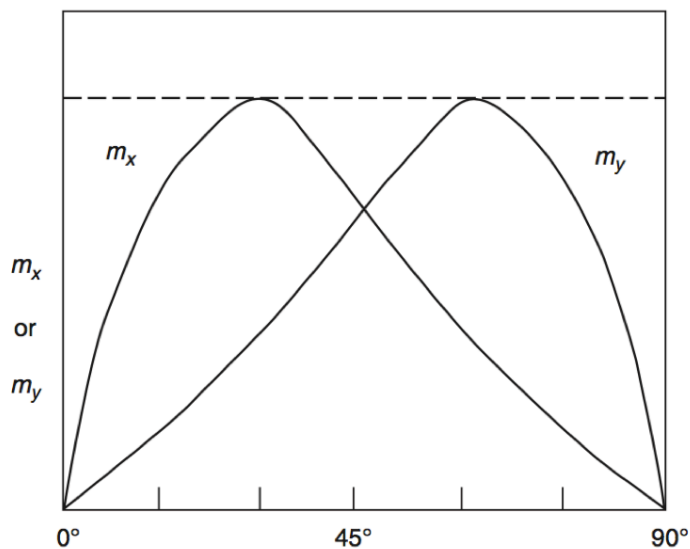


Figura 7 Esfuerzos en material compuesto Transversalmente isotrópico.
Fuente: (Mallick, 2007)

Un material transversalmente isotrópico es un caso especial de material ortotrópico en donde las fibras continuas se disponen en una sola dirección paralela a uno de los ejes de aplicación de la carga, por lo que la configuración puede ser a 0° o 90° . (Mallick, 2007)

Se estudia la configuración a 0° , donde los coeficientes de influencia mutua del material valen 0. (Mallick, 2007)



Angulo θ , orientación de la fibra.

Figura 8 Influencia del ángulo de orientación de la fibra en los coeficientes de influencia mutua.

Fuente: (Mallick, 2007)

Para este tipo de material se propone la siguiente relación de esfuerzo - deformación. (Mallick, 2007)

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 = \frac{\sigma_x}{E_1} - \nu_{12} \frac{\sigma_y}{E_2} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_2 = -\nu_{12} \frac{\sigma_x}{E_1} + \frac{\sigma_y}{E_2} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \gamma_{12} = \gamma_{21} = \frac{\tau_{xy}}{G_{12}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Se asume para el análisis que se tiene una lámina de una sola capa de fibra distribuida longitudinalmente por el material compuesto.

Mallick propone para la construcción de la matriz de flexibilidad S, a partir de la relación deformación-esfuerzo de la expresión de la ecuación 30 para un material transversalmente isotrópico. (Mallick, 2007)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\text{donde } s_1 = \frac{1}{E_1}, s_2 = \frac{1}{E_2}, s_{12} = s_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \text{ y } s_6 = \frac{1}{G_{12}}.$$

Invirtiendo la ecuación 30, como se observa en la ecuación 31, se obtiene la expresión de la matriz de rigidez Q. (Mallick, 2007)

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\text{Donde } [Q] = [S]^{-1}, \text{ es decir; } Q_1 = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, Q_2 = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \text{ y } s_6 = G_{12}.$$

2.2 Estado del Arte

En la actualidad existe gran cantidad de estudios de fibras naturales sobre matrices poliméricas, todos enfocadas a analizar las propiedades mecánicas del material compuesto.

Estos estudios varían por la configuración de fibra utilizada y el tipo de matriz polimérica aplicada. En todos se concluye que los materiales reforzados con fibras naturales mejoran las propiedades de la matriz sin refuerzo.

La utilización de fibras tejidas es la más común de las configuraciones de materiales compuestos con fibra natural, aunque existen también estudios de fibras unidireccionales como refuerzo de material compuesto.

Se detallan algunos estudios que demuestran la mejora de las propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzándolos con fibras naturales.

Lee y otros estudian un bio-compuesto de polipropileno(PP) reforzado con fibras naturales de Kenaf y yute, largas y discontinuas. El efecto de la fracción

volumétrica de fibra sobre las propiedades mecánicas de los bio-compuestos se examinó realizando ensayos de tracción y flexión y observando la interface entre la fibra y la matriz. (Lee, Kim, & Yu, 2009)

Se concluye que los compuestos de PP reforzados con fibra de kenaf tienen una fracción de fibra nominal óptima de 30%, en la que el módulo de tracción y flexión es el más alto, mientras que la reducción de la resistencia es mínima. Para los materiales compuestos reforzados con fibra de yute, una fracción de fibra nominal del 40% parece ser el valor óptimo.

Portella y otros en su estudio analizan la posibilidad de reemplazar parcialmente la fibra de vidrio tradicional por el algodón residual obtenido de la industria textil, en compuestos con poliéster insaturado. Los laminados híbridos exhiben propiedades mecánicas intermedias entre las de los laminados puros. La resistencia a la flexión aumenta con el contenido de vidrio, especialmente para los laminados que contienen vidrio en los extremos. Se encontró que la resistencia a la tracción dependía en gran medida del contenido relativo de cada uno de ellos. (Portella, Romanzini, Angrizani, Campos , & Zattera, 2016)

Se pueden utilizar materiales compuestos que contengan algodón residual adaptando la arquitectura híbrida con mayor porcentaje de vidrio, lo que permite que una cantidad limitada de algodón produzca resultados similares a los laminados de vidrio puro.

(Luo & Netravali, 1999) ensaya un material verde biodegradable compuesto de fibras de manzana de pino y resina de PHBV. La resistencia a la tracción y flexión de los materiales compuestos es significativamente más alta que la de la resina virgen, mientras que su tensión a la falla en el modo de tracción y la deformación por flexión

en la producción disminuyen. La deformación por fractura de ambas composiciones con un contenido de fibra de 20 y 30% es casi la misma que la de las fibras de piña.

Los compuestos "verde" de piña / PHBV muestran propiedades prometedoras que se utilizarán en aplicaciones no críticas de volumen de masa. Como en el caso de la mayoría de los materiales compuestos, sus propiedades mecánicas pueden diseñarse teniendo en cuenta una aplicación específica.

Pontón y Guerrero en su estudio utilizan fibras de abacá unidireccionales continuas y fibras cortas distribuidas sobre matriz poliéster, obteniendo que la resistencia y el módulo a tracción de este material fueron aproximadamente 270% y 124% mayores que en la matriz y la resistencia y el módulo de elasticidad a flexión mejoraron alrededor de 82% y 226% en comparación con el poliéster. La elongación a la ruptura fue la misma tanto para la matriz como para el compuesto unidireccional. (Pontón & Guerrero, 2010)

La utilización de software de ingeniería con un modelo adecuado, permite obtener valores aproximados al funcionamiento real de un material compuesto.

El análisis con elementos finitos de la micro y macro mecánica de un material compuesto a partir de micrografías del material se hace más común en los estudios recientes. Algunos generan el modelo computacional a partir del esquema en dos dimensiones de la fotografía tomada. Otros estudios obtienen un modelo computacional a partir de las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales constituyentes. Todos comparan sus modelos con ensayos experimentales, obteniendo valores muy cercanos a la realidad.

A continuación, se detallan algunos estudios donde se experimentan y simulan materiales.

Shoji y otros en su estudio proponen un método de correlación de las características micro estructurales del acero bifásico con respecto a la resistencia al crecimiento de la grieta dúctil. Propone un análisis mesoscópico a partir de la microestructura, obteniendo resultados muy cercanos a los experimentos realizados. (Shoji, Ohata, & Minami, 2015)

Kruyt y otros en su estudio analizan la relación cercana entre los ensayos experimentales y las simulaciones mediante DEM de una prueba biaxial (donde la rotación media es igual a cero) y una prueba de cizallamiento (donde la rotación media no es igual a cero) de materiales granulados tomando en cuenta la microestructura clara de granos y contactos intergranulares. Se basa en un mosaico del conjunto granular en bucles cerrados, a lo largo de cuyo límite el campo de desplazamiento se define en términos de desplazamientos y rotaciones del grano (rotación media es igual a cero) y una prueba de cizallamiento (donde la rotación media no es igual a cero). (Kruyt, Millet, & Nicot, 2014)

Se investiga la mecánica de un material compuesto reforzado con malla de alambre tejido. Se utilizan experimentos mecánicos y un modelo de elementos finitos 3D para estudiar el comportamiento mecánico en condiciones de tensión uniaxial a escala macro y meso de la malla de alambre tejido. Se demuestra que la respuesta del modelo en las principales orientaciones materiales sigue de cerca la respuesta a la macroescala, lo que indica que no es necesario considerar el comportamiento de escala de alambre cuando se hacen consideraciones de diseño a escala macro. Además, demuestra que el comportamiento de la fractura de la malla macro-escala se relaciona con el daño del alambre meso-escala. (Kraft & Gordon, 2011)

Basado en los hallazgos de esta investigación los autores proponen que, el modelado a escala macro es un método justificable para capturar el comportamiento mecánico de este material de malla de alambre tejido. El comportamiento material está en buen acuerdo con el modelado elástico, la Analogía de Hill, y con el endurecimiento de Voce. (Kraft & Gordon, 2011)

En el estudio de Zhu y otros se investiga la influencia de los parámetros de la microestructura (sección transversal, fracción volumétrica y orientación de la fibra) y la velocidad de deformación sobre un modelo constitutivo viscoplástico. Se ha utilizado un método micromecánico basado en un modelo de células que representen el volumen representativo de los materiales compuestos. (Zhu, y otros, 2014)

Los resultados de la investigación muestran que las curvas tensión-deformación son sensibles a la velocidad de deformación en donde los parámetros micromecánicos juegan un papel fundamental en el proceso del material compuesto, obteniendo valores aceptables con respecto a los experimentales.

Dau y otros en su investigación demuestran las capacidades del DEM para analizar materiales compuestos a escalas micro y macroscópicas. Se demuestran resultados cualitativos y cuantitativos. Indica que se encuentra desarrollando estudios sobre materiales con comportamientos viscosos y plásticos. (Dau, Girardot, & Le, 2016)

Estos estudios a nivel micro mecánico son llevados al análisis macro, para simular una o varias láminas de material y obtener un comportamiento similar al de los ensayos experimentales.

En estas investigaciones no se ha encontrado un análisis de elementos finitos a partir de la micro mecánica de materiales compuestos reforzados con fibras naturales,

sin embargo, se encuentra que el desarrollo de materiales compuestos y su estudio mediante elementos finitos es una metodología muy aplicada actualmente.

En la investigación de Villacis se utiliza la resina poliéster insaturada tipo ortoftálica marca SINTAPOL, para la elaboración de materiales compuestos con fibras naturales y sintéticas. (Villacis, 2011)

De esta investigación se obtienen los valores de resistencia a la tracción de 42MPa con una deformación de 4,5% y un coeficiente de elasticidad de 1051 MPa, a partir de la curva esfuerzo deformación que se presenta en la figura 9.

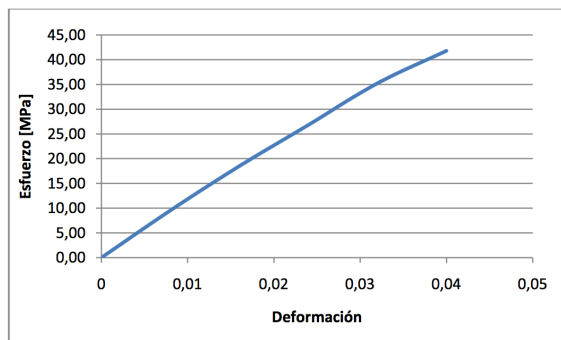


Figura 9 Curva esfuerzo deformación de la resina poliéster.
Fuente: (Villacis, 2011)

2.3 Marco Metodológico

2.3.1 Proceso experimental totora

Se procederá a la adquisición de la totora (*schoenoplectus californicus*) cosechada por los moradores de San Rafael del Lago, ubicado a 2760 m.s.n.m. en la provincia de Imbabura, que fue recolectada de las orillas del Lago San Pablo, y entró a un proceso de secado al sol durante 15 días.

De los paquetes almacenados de totora seca, se procederá a seleccionar muestras aleatorias de totora que no presenten deformaciones o daños en su estructura apreciables visualmente.

Debido a que en la estructura interna de la totora existen cámaras de aire, se procederá a presionar la totora hasta eliminar las cámaras y no dañar la fibra en su exterior, para realizar la medición de la sección transversal.

En vista de que la totora posee estructura muy similar al bambú, se elaborarán probetas de fibra completa para realizar los ensayos de tracción y flexión adaptado a la norma ASTM D4761-02a, para ejecutar los ensayos destructivos y obtener las curvas características de la fibra completa.

2.3.2 Diagrama de Flujo del proceso experimental del material compuesto y resina

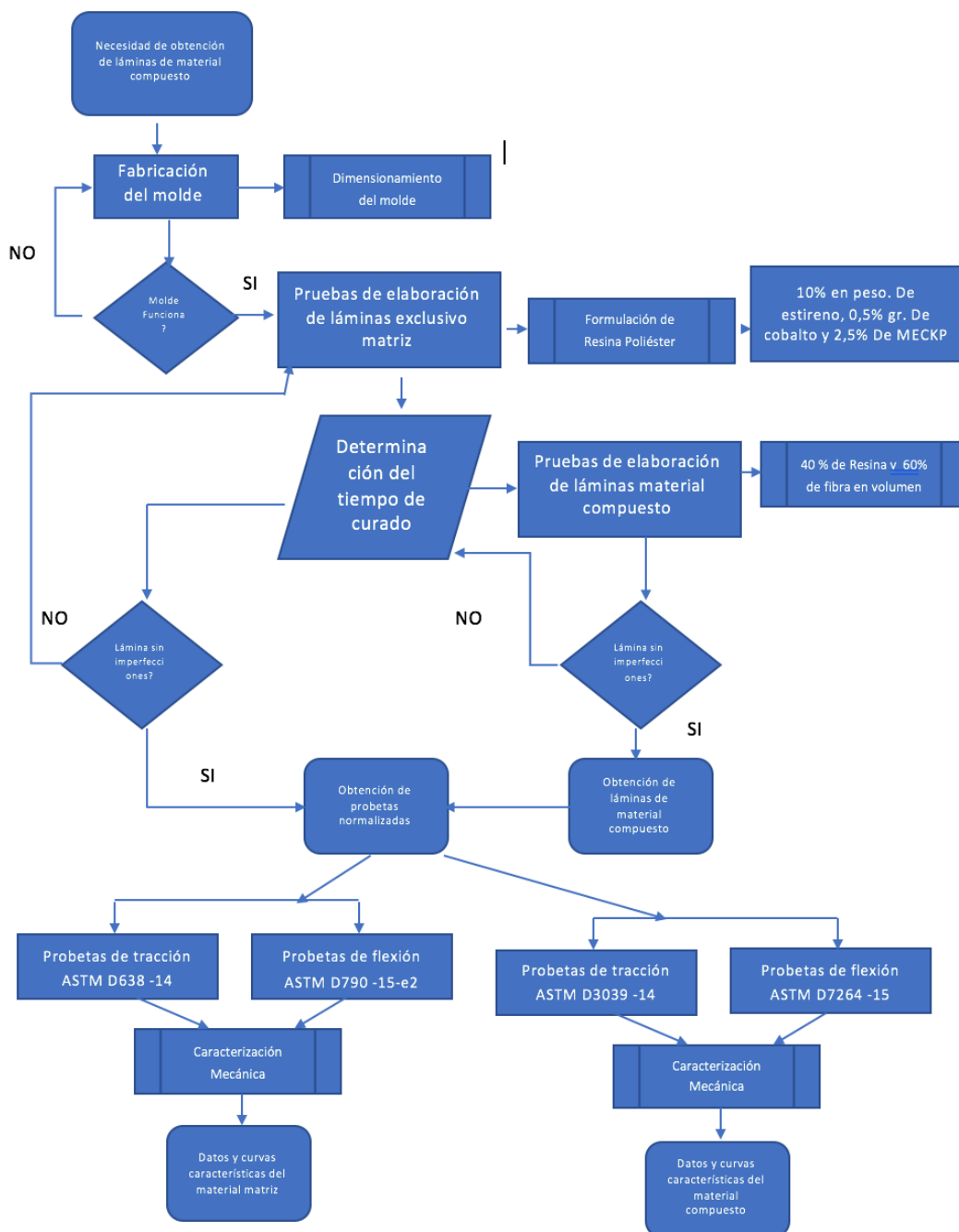


Figura 10 Diagrama de flujo del proceso experimental

En primera instancia se procederá a la construcción del molde para la obtención de las láminas de material compuesto y matriz; el que estará elaborado con madera con protección vinílica en la base y la tapa para mejorar el desmolde; y sin protección en las paredes para asegurar la salida del aire al momento del moldeo.

A continuación, se realizarán pruebas preliminares de la obtención de la lámina de compuesto y matriz con los parámetros de resina y fibra de totora.

La resina a utilizar es una resina poliéster insaturada ortoftálica SINTAPOL 2074, que en su hoja técnica el fabricante recomienda las siguientes proporciones de mezcla para resina, diluyente, acelerante y catalizador. (10% en peso. De estireno, 0,5% gr. De cobalto y 2,5% De MEK).

La fibra con la que se trabajará es de la especie *Schoenoplectus californicus* (totora) del sector de San Pablo del Lago, Imbabura-Ecuador, la misma que está distribuida por la comuna de San Rafael, en una presentación de fibras largas aplastadas al 60%, que tuvieron el proceso de cosecha y secado al sol durante 15 días, pasando por el proceso de aplastamiento para obtener fibras de forma regular.

Se realizará el material compuesto mediante el proceso de presión manual durante un tiempo determinado, ya que los moldes tendrán las medidas de espesor adecuadas para fabricar las probetas de los ensayos de tracción y flexión. En este proceso se determinará el tiempo necesario para obtener una lámina en buenas condiciones de material compuesto con un porcentaje de 60% volumen de fibra y 40% de volumen de resina.

El producto obtenido sin defectos se utilizará en la elaboración de las probetas para los dos ensayos descritos tanto para el material compuesto como el matriz, cortando con sierra metálica las mismas basado en las normas ASTM D3039-14 y ASTM D7264-15 para el compuesto, y ASTM D638-14 y ASTM D790-15-e2 para la matriz.

Con las probetas elaboradas se procederá a los ensayos mecánicos de acuerdo a las normas antes mencionadas y a la obtención de los datos y curvas características; conforme a las tablas 2,3; y las tablas 4,5,6 y 7 de las páginas 34 y 35.

2.3.3 Descripción de normas

Tabla 2

ASTM D4761-02a tensión. - Ensayos de tensión de la madera de construcción y del material estructural de base de madera

Unidades	SI
Probetas tracción	5 evaluadas en condiciones favorables
Ancho	< L/10
Longitud	150mm
Espesor	<A/10
Velocidad del ensayo	75mm/min

Tabla 3

ASTM D4761-02a flexión. - Ensayos de flexión de la madera de construcción y del material estructural de base de madera

Unidades	SI
Probetas flexión	5 evaluadas en condiciones favorables
Ancho	< L/5
Longitud	80mm
Espesor	<A/10
Velocidad del ensayo	75mm/min

Tabla 4

ASTM3039-14.- Ensayos de tensión para materiales compuestos con matriz polimérica

Unidades	SI
Probetas	5 evaluadas en condiciones favorables
Ancho	15mm
Longitud	250mm
Espesor	3.2mm
Velocidad del ensayo	2mm/min

Tabla 5

ASTM7264-15.- Ensayos de flexión para materiales compuestos con matriz polimérica.

Unidades	SI
Probetas	5 evaluadas en condiciones favorables
Ancho	13mm
Longitud	32:1 con respecto al espesor.
Espesor	4mm
Velocidad del ensayo	1mm/min

Tabla 6*ASTM D638-14.-Ensayos de tensión de plásticos Tipo I*

Unidades	SI
Probetas	5 evaluadas en condiciones favorables
Ancho	15mm
Longitud sección delgada	57mm
Longitud Total	165mm
Espesor	3.2mm
Distancia entre sujeciones	115mm
Velocidad del ensayo	5mm/min

Tabla 7*ASTM D790-15-e2-. Ensayos de flexión para plásticos reforzados y no reforzados.*

Unidades	SI
Probetas	5 evaluadas en condiciones favorables
Ancho	12.7mm
Longitud	127mm
Espesor	3.2mm
Velocidad del ensayo	2mm/min

2.3.4 Microfotografía

Se realizarán tomas micrográficas a partir de la sección transversal; se determinará el espesor mínimo de las muestras, de las que se analizará a la resolución

necesaria la distribución de fibra y resina, tanto en probetas ensayadas como en material sin ensayar.

2.3.5 Simulación del material compuesto

Se construirá un modelo en tres dimensiones del material compuesto bajo estudio. Tomando en cuenta que existirán dos tipos de mallas computacionales, una que representará a las propiedades de la fibra longitudinal y otra las propiedades de la matriz.

Se buscará la convergencia de las simulaciones del material, hasta obtener resultados aproximados a los obtenidos en los ensayos experimentales.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA

3.1 Elaboración probetas de totora

Se procede a revisar 10 muestras aleatorias tomadas del paquete seco de totora, que no posean alteraciones en su superficie o deformaciones que puedan modificar los resultados.

Se evidencia tres variaciones de diámetro significativas en la fibra, por lo que se procede a realizar tres grupos uno de 7 a 13 mm, otro de 14 a 18 mm y finalmente uno de 19 a 25mm de diámetro.

De cada uno de los grupos diametrales y mediante el uso de un vernier y cuchilla se corta las fibras en base a la tabla 2 obteniendo 10 probetas por diámetro de su parte central, que se etiquetan con la siguiente codificación: “Nº de probeta (0-10) - Ensayo (T) - Tipo de diámetro (P/M/G)” como se muestra en la figura 11.



Figura 11 Probetas de fibra de totora.

Una vez etiquetadas se procede a presionarlas durante 8 horas mediante el uso de dos retazos de madera y pinzas mecánicas, hasta lograr la eliminación de los orificios internos sin dañar la superficie de la fibra como se muestra en la figura 12, quedando como se muestra en la figura 13 a y b.



Figura 12 Proceso de presión de fibras



Figura 13 a) vista superior b) vista lateral de probetas presionadas

De una muestra aleatoria de fibras completas se selecciona cinco de diámetros entre 14 y 18mm, para en base a la tabla 3 y con el uso de un vernier y cuchilla obtener las probetas de flexión.

Estas probetas como no necesitan ser sujetadas por pinzas para su ensayo, no es necesario presionarlas, se etiquetan con la siguiente codificación: “Nº de probeta (0-10) - Ensayo (F) - Tipo de diámetro (M)”, como se observa en la figura 14, en la siguiente página.



Figura 14 Probetas de totora para ensayo de flexión

3.2 Elaboración de moldes para resina y material compuesto

A partir de las normas mencionadas en el numeral 2.3.3, se procede a diseñar los moldes para realizar las láminas de material compuesto y resina para la obtención de probetas para los ensayos de tracción y flexión.

Estos moldes se los fabrica con tablero de partículas aglomeradas con recubrimiento melamínico, que en la base y en la tapa permitirá un fácil desmolde, en las paredes internas al ser un aglomerado sin presencia de melamínico permite la expulsión de aire generado en el proceso de curado de la resina.

Estos moldes permiten obtener en un solo proceso 10 probetas para luego ser mecanizadas para eliminar fallas en la superficie y cortados a las medidas establecidas, en las figuras 15 a la 22, en las páginas 40 a 43, se muestran los bosquejos de los moldes elaborados.

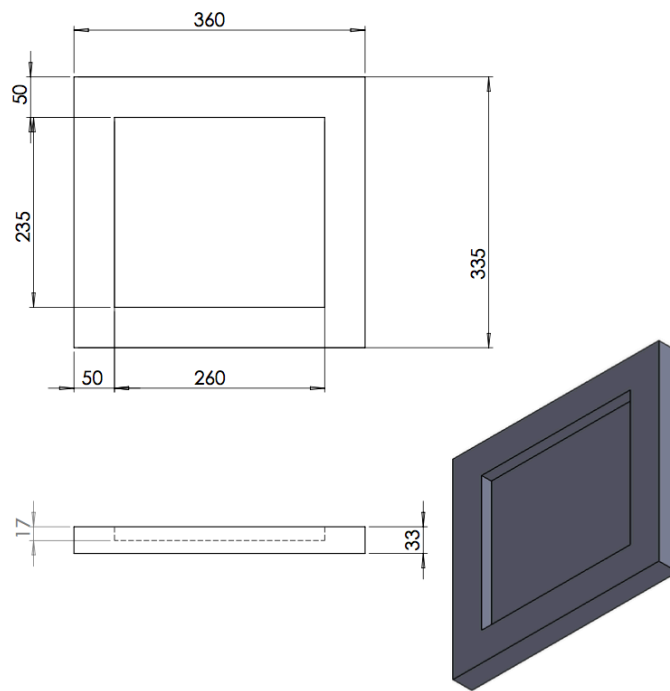


Figura 15 Diagrama del molde hembra para lámina de 15 probetas D3039.

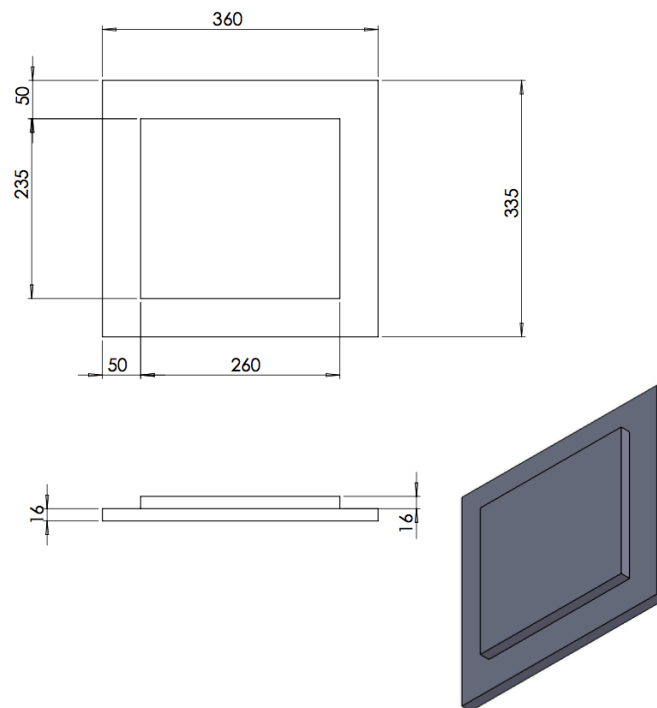


Figura 16 Diagrama del molde macho para lámina de 15 probetas D3039.

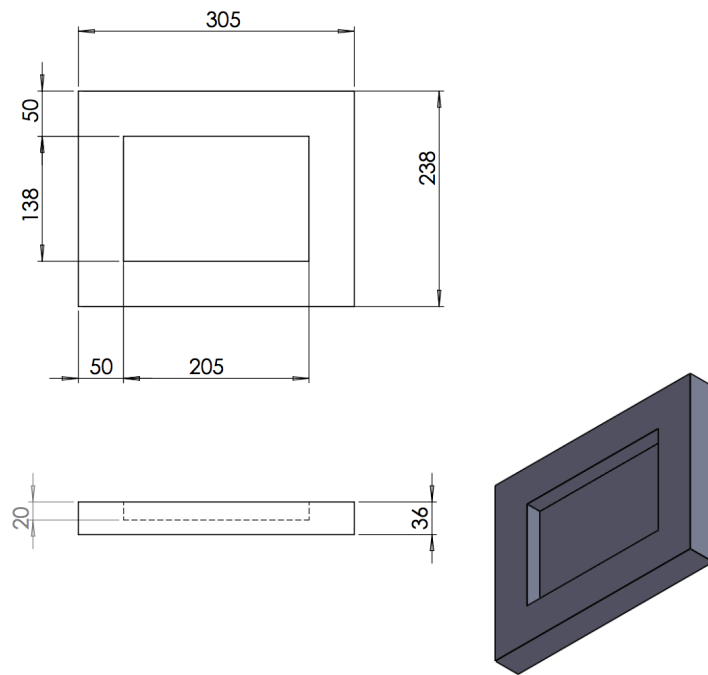


Figura 17 Diagrama del molde hembra para lámina de 15 probetas D7264

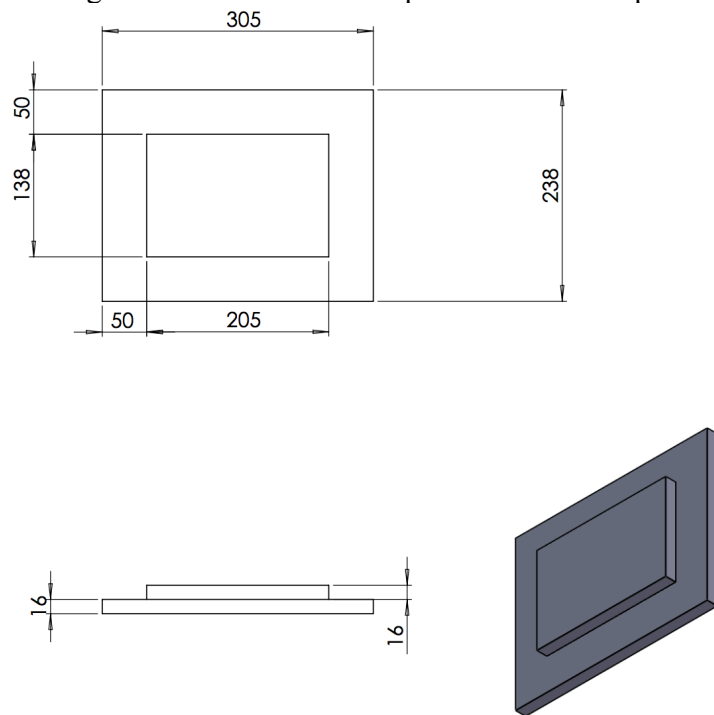


Figura 18 Diagrama de molde macho para lámina de 15 probetas D7264.

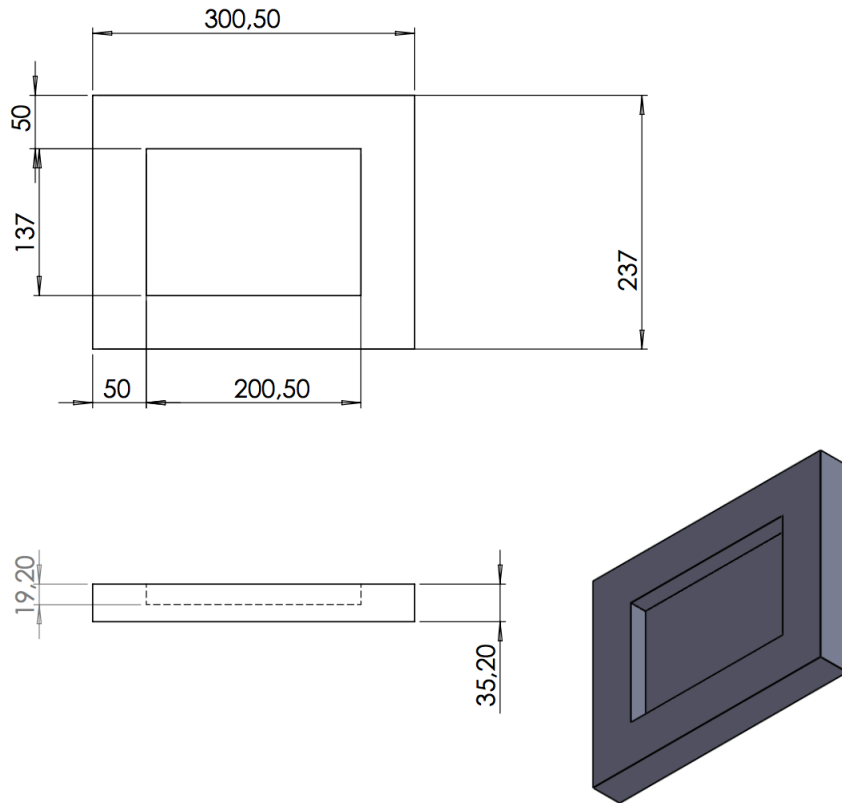


Figura 19 Diagrama de molde hembra para lámina de 15 probetas D790

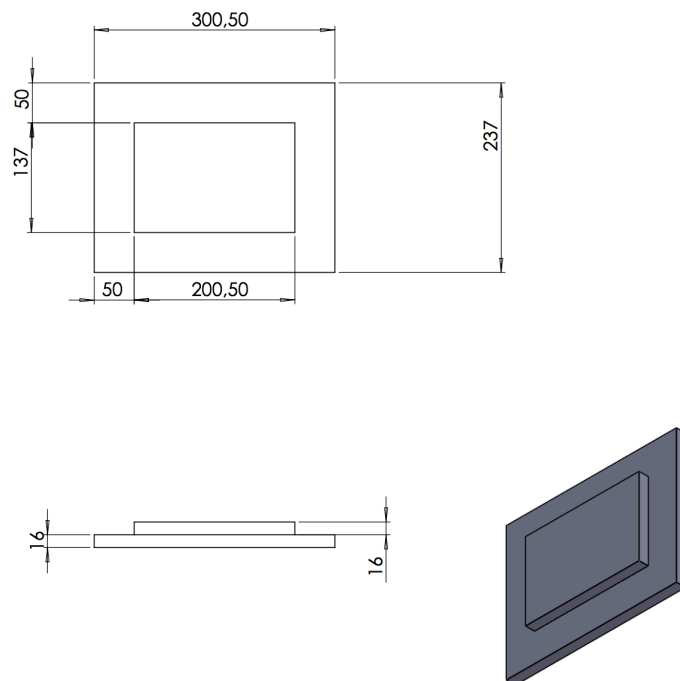


Figura 20 Diagrama molde macho para lámina de 15 probetas D790

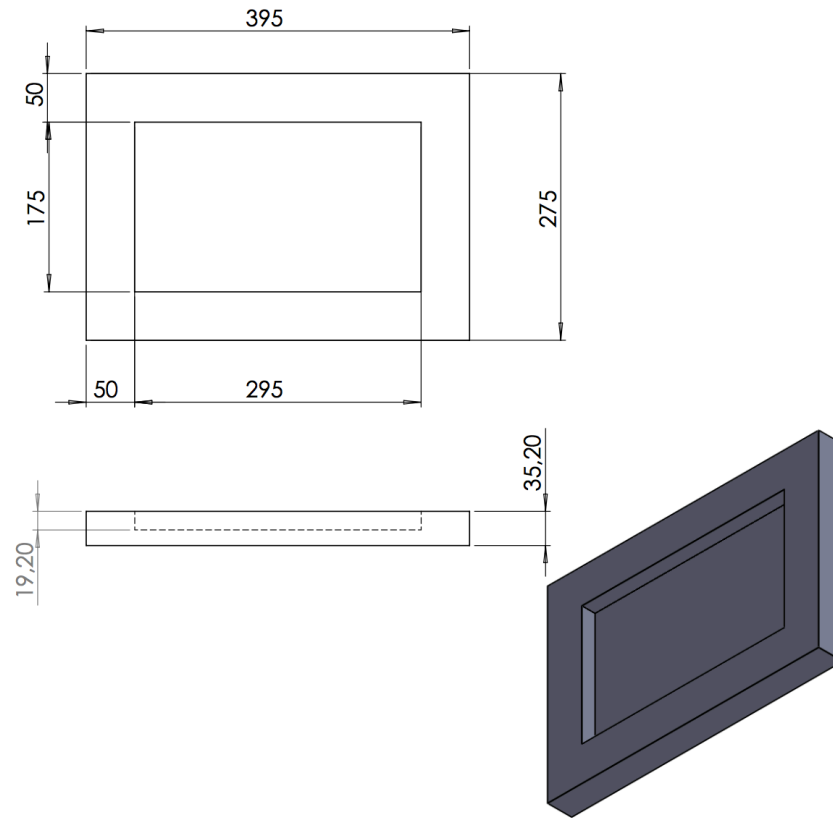


Figura 21 Diagrama de molde hembra para lámina de 15 probetas D638

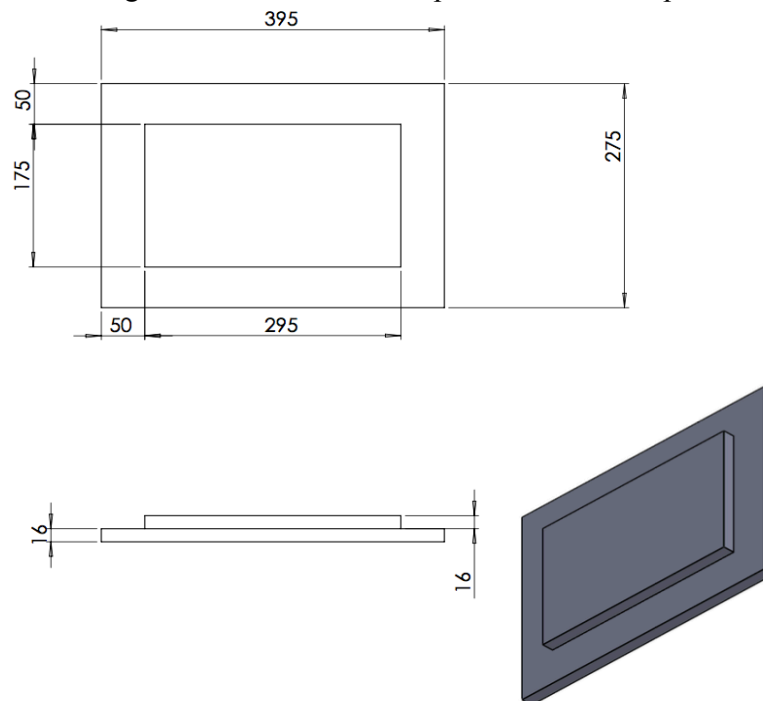


Figura 22 Diagrama de molde macho para lámina de 15 probetas D638.

3.3 Preparación de resina

La resina se utiliza para realizar las probetas de tracción y flexión tanto de resina pura como de material compuesto, en base a lo expuesto en el numeral 2.3.2, se calcula el volumen de resina para cada molde y las respectivas proporciones en peso de los aditivos para el proceso de curado.

En la tabla 8 se muestra las proporciones en volumen de resina para cada molde y a continuación los valores en peso de los aditivos.

Tabla 8

Valores de resina y aditivos para su preparación para moldeo

DATOS MOLDES	D3039	D7264	D638	D790
Volumen total del molde (mm ³)	195520,000	113160,000	165200,000	81899,200
Volumen de resina preparada(mm3)	78208,000	45264,000	165200,000	81899,200
Volumen de Totora (mm3)	117312,000	67896,000	0,000	0,000
Masa de Resina preparada (gr)	94,553	54,724	199,726	106,270
Masa de fibra de totora (gr)	21,116	12,221	0,000	0,000
Masa de Resina poliéster (gr)	83,675	48,428	176,749	94,044
Masa de Estireno (gr)	8,367	4,842	17,674	9,404
Masa de MEK (gr)	2,091	1,210	4,418	2,351
Masa de Cobalto (gr)	0,418	0,242	0,883	0,470

En base a la tabla 8 se procede mediante una balanza electrónica de precisión a preparar la resina para cada uno de los moldes, tomando en cuenta que esta preparación se realiza por separado y una vez el molde esté listo para recibir la resina, ya que ésta tarda solo 15 minutos en solidificar.

En todos los casos sobre un recipiente plástico se vierte el peso de resina y el estireno, para mezclar continuamente hasta tener una solución uniforme. Se adiciona el cobalto y se mezcla nuevamente hasta obtener una solución de color rojizo.

Al final se adiciona el MEK peróxido que al mezclarlo genera un color verdoso en la preparación y a partir de ese momento se tiene aproximadamente 15 minutos para trabajar con la resina antes de que la reacción química surta efecto y empiece a calentarse y por ende a gelificar.

El proceso descrito se puede observar en las figuras 23 a la 25 que deja a la resina lista para verter sobre uno de los moldes, tomando en cuenta que en todo momento se controla la temperatura ambiente que se encuentre entre 18 y 25° C, según especificaciones del fabricante.

Esta temperatura se midió en el ambiente de trabajo durante todo el proceso mediante un multímetro digital como se observa en la figura 26, en la página siguiente.

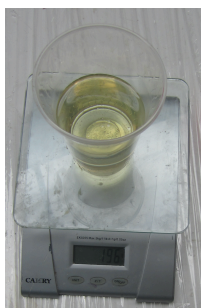


Figura 23 Medición de la proporción de resina en balanza CAMRY

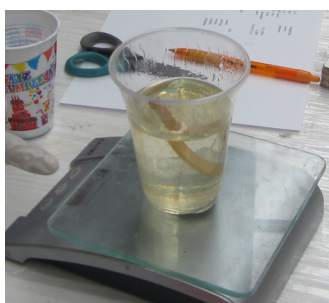


Figura 24 Mezcla de resina con estireno



Figura 25 Mezcla de Resina con cobalto.



Figura 26 Temperatura del ambiente de trabajo.

3.4 Preparación de probetas de resina y material compuesto

3.4.1 Probetas de resina

Una vez preparada la resina esta se vierte sobre los moldes como se observa en la figura 27, para luego ser presionada con el molde macho para adquirir el espesor necesario como se observa en la figura 28, en la página siguiente.

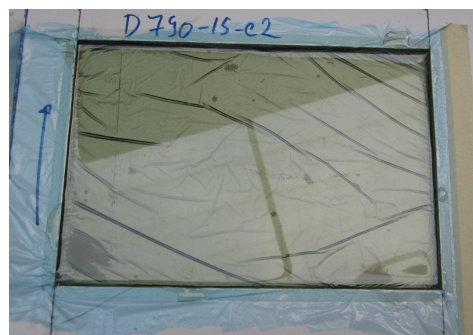


Figura 27 Resina ubicada en molde para su presión.



Figura 28 Prensado de moldes para obtención de probetas.

Culminado el proceso de cura y enfriamiento del molde se procede a desmoldar una placa de resina, que pasa al proceso de secado y post cura de la resina a temperatura ambiente durante 15 días.

Una vez terminado el proceso de secado de la lámina se procede a realizar un proceso de careado y corte de las probetas según las medidas establecidas en una fresadora CNC marca Roland MDX-40a.

3.4.2 Probetas de material compuesto

Se procedió a ubicar fibra de totora de diámetro medio a nivel longitudinal en cada uno de los moldes bajo las medidas establecidas en la tabla 3 y 4 de la página 33, dos fibras juntas para las de tracción y una para las de flexión.

Se generó un inconveniente al momento de verter la resina sobre el molde, ya que al ser más densa que la totora, las fibras flotan sobre ella, evitando que estas se ubiquen en el centro del espesor del molde.

Se intentó, previamente macerar las fibras de totora en resina, para que pueda absorberla y no flote al momento del moldeo; sin embargo, la totora posee membranas en cada uno de los orificios internos que impiden el paso del fluido, ver figura 29, en la página siguiente, por lo que después de 24 horas, no absorbió resina.

Se probó macerando las fibras en una solución de 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de peso de estireno; sin embargo solo en la solución 50-50 se logra, después de 24 horas, absorber el fluido en toda la fibra.

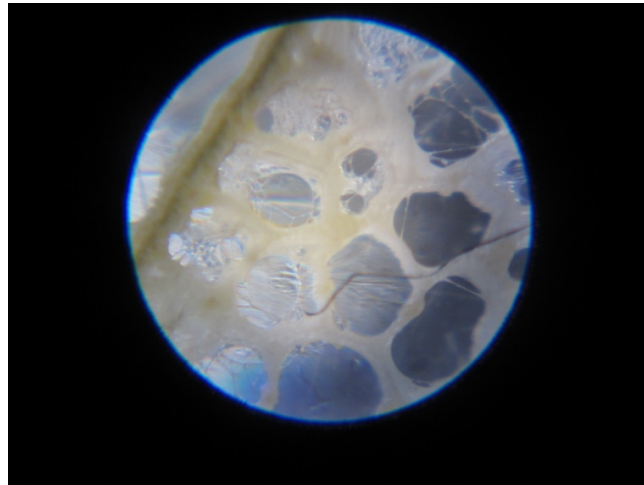


Figura 29 Vista de la sección transversal de la totora a 100x

Con la fibra macerada se procedió a realizar los moldes, observando después del curado, que el alto porcentaje de estireno, no permite que la resina se cure totalmente y no se acopla el material.

Mediante plastilina ubicada a los extremos del molde, se procedió a elevar y sujetar las fibras sin macerar en la posición adecuada; para luego verter la resina en los moldes como se muestra en la figura 30.



Figura 30 Sujeción y elevación de fibra de totora mediante plastilina.

Después de varias pruebas se observa que la mejor propuesta de elaboración de los moldes para las probetas de material compuesto es la que se genera a partir de la fibra presionada durante 24 horas previas. Esta fibra al no ser macerada en resina tiende a flotar, por lo que se sujeta en los extremos con plastilina ubicada en la parte inferior y superior para mantener la ubicación en el momento de verter la resina. Por último, se procede presionar los moldes y se deja secar al ambiente durante 1 semana.

Este método generó buenos resultados, por lo que se procedió a mecanizar las placas obtenidas para obtener las medidas establecidas en la norma.

3.5 Ensayos Mecánicos

Para la ejecución de los ensayos mecánicos de la fibra natural se utilizó la máquina de ensayos universal de la marca James Heal modelo Titan 5 de 5000 N específicamente para aplicaciones de fibras tejidas y no tejidas basada en la norma ASTM D4761-02a que se observa en la figura 31



Figura 31 Máquina de ensayos universal James Heal del laboratorio de textil de la Universidad Técnica del Norte-Ecuador

La máquina de ensayos universal marca MTS con una galga marca QUANTRON certificada por INEN de 5000N del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE que se muestra en la figura

32, se utilizó para los ensayos de tracción y flexión de la resina y el material compuesto.



Figura 32 Máquina de ensayos marca MTS de la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE.

3.6 Captura de imágenes micrográficas

En vista que la fibra utilizada en relación a otras fibras naturales tiene una superficie bastante grande, no existe un método definido para la obtención de las micrografías para este material compuesto. Por lo tanto, se propone ensayar varias magnificaciones de las micrografías para seleccionar la más adecuada. Se ensaya micrografías a 100x, 200x y 400x para probetas de la sección transversal de la fibra de totora y del material compuesto.

Se observa que la resolución a 100x provee de la información necesaria de la estructura interna de la fibra de totora sin prensar y prensada.

En la figura 33, en la página siguiente, se observa la totora a 100x en sus diferentes grupos de diámetro; se identifica que mientras mayor sea el diámetro los orificios internos poseen una abertura mayor y sus capas tienden a ser más finas.

Además, se observa que la membrana de los orificios desaparece en el grupo de diámetro superior.

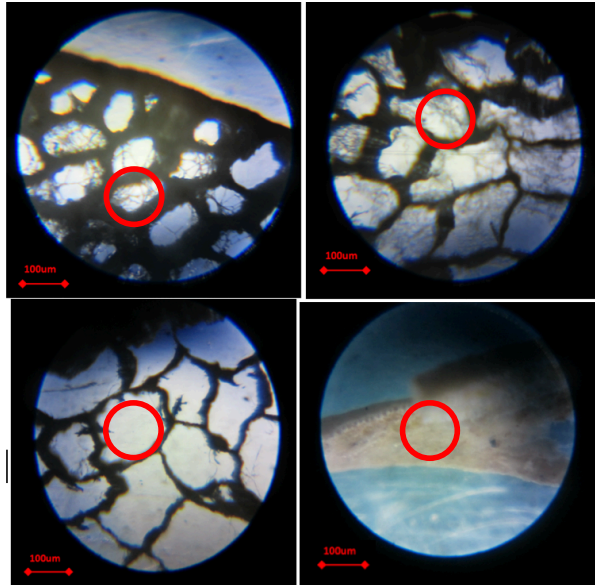


Figura 33 Micrografía a 100x de los grupos de diámetro a) fino, b) medio, c) grueso, d) fibra prensada.

Se procede a realizar las fotografías de la sección transversal del material compuesto observando a una magnificación de 100x que en la sección de la interface existe el paso de luz, lo que denota una mala relación entre la totora y la resina; como se observa en la figura 34, en la página siguiente.

Se procede a realizar tomas a 200x y 400x de la sección con presencia de luz y en las que se identifica que la interface entre la fibra de totora y la resina no tiene ninguna relación de contacto como se observa en la 35, en la página siguiente, factor que afectaría al comportamiento del material.

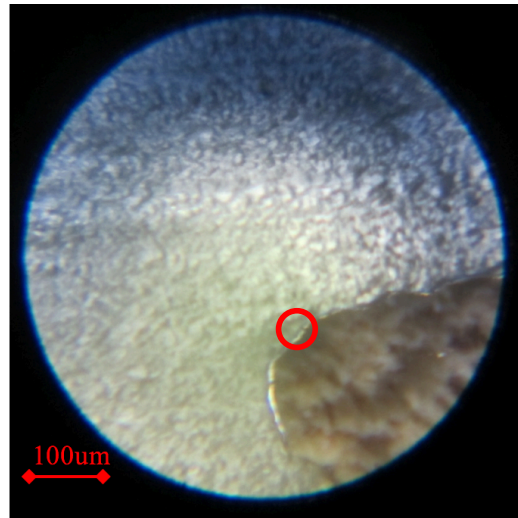


Figura 34 Micrografía a 100x del material compuesto con fibra sin lijar.

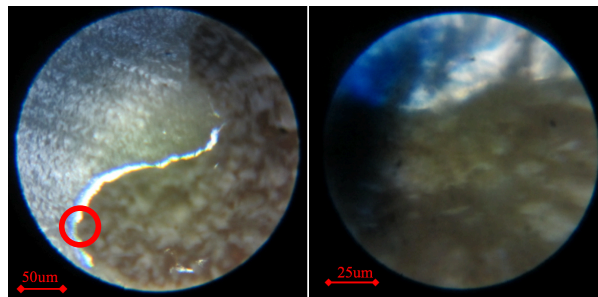


Figura 35 Micrografía del material compuesto con fibra sin lijar a: a)200x b) 400x.

A partir de las micrografías se determina que la fibra posee una superficie que repele a la resina y ésta no logra impregnarse en la misma; por lo que se procede a lijar la superficie de las fibras para elaborar nuevamente las probetas a ensayar bajo el procedimiento detallado en 3.4.

Una vez elaboradas las probetas se procede a realizar nuevamente los ensayos mecánicos y se realizan las tomas micrográficas en donde se observa que la interfaz entre la fibra y la resina mantiene un buen aspecto de unión entre las dos.

Considerando que en un material compuesto debe existir una correcta adhesión entre los elementos para que las propiedades mecánicas individuales aporten al material, evitando una unión de elemento independientes en comportamiento, se

determina que la fibra bajo estas condiciones si aportaría a la matriz para mejorar las propiedades mecánicas.

En la figura 36 y 37 se observa la toma del material compuesto con la fibra previamente lijada en donde la interfaz fibra resina es despreciable.

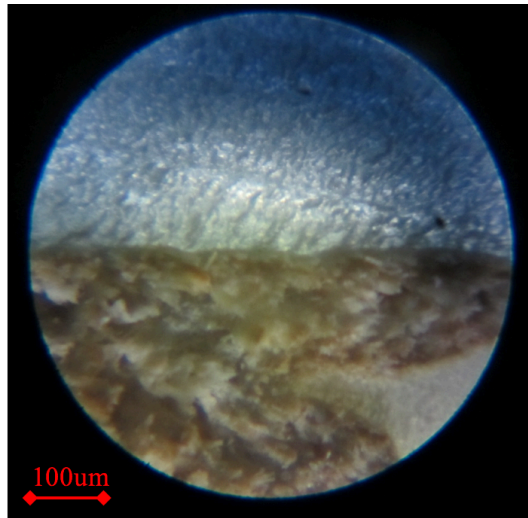


Figura 36 Micrografía a 100x del material compuesto con fibra lijada

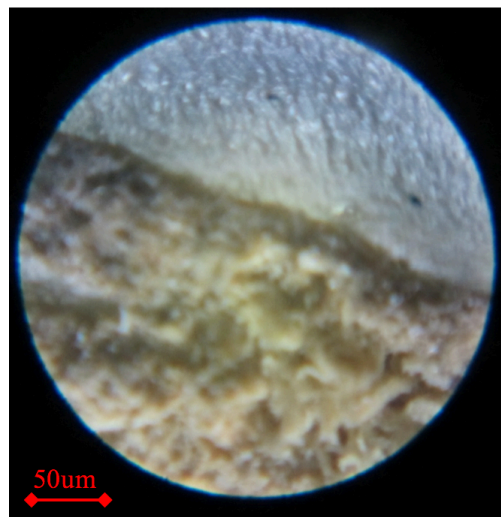


Figura 37 Micrografía a 200x del material compuesto con fibra lijada

3.7 Construcción de malla computacional

La totora utilizada en la elaboración del compuesto luego de la presión aplicada tiende a formar una figura regular cuya sección transversal es un rectángulo; al

moldearla en base a la norma, la probeta del material compuesto tiene una sección transversal rectangular; por lo que se procede a modelar en un software de ingeniería los sólidos que representan a la totora y a la resina para luego unirlos como material compuesto.

Se procede a ejecutar un mallado general de cada una de los componentes por separado con el mismo tamaño de elemento finito. Esto se ejecutó tanto en la probeta de tracción como de flexión. Una vez ejecutada la malla computacional sobre los materiales por separado, en un software de ingeniería se procede a evaluarlos estáticamente uniendo las dos mallas, simulando que entre las superficies de los materiales la unión sea representada con la operación de pegado.

Para la ejecución de la malla se insertan para cada material los resultados obtenidos a nivel experimental, tanto los valores de la curva de esfuerzo deformación, como también los valores calculados a partir de la misma. Con esto se tendrá un comportamiento de los modelos muy apegado a la realidad.

En la figura 38 se observa el diseño de la totora a ser simulado y en la figura 39 se observa la malla generada sobre este material. En la figura 40 se observa el diseño de la resina a ser simulada y en la figura 41 la malla computacional generada.

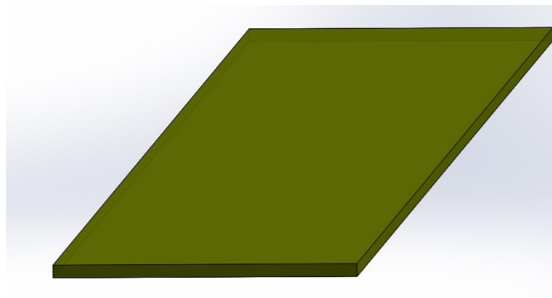


Figura 38 Diseño de la totora para malla computacional

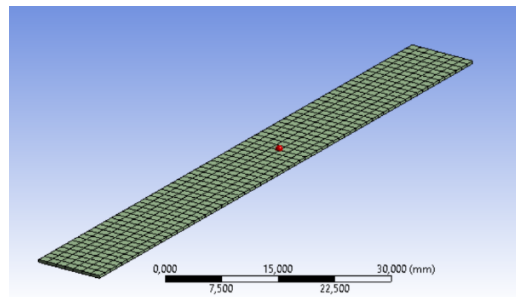


Figura 39 Malla computacional de la totora

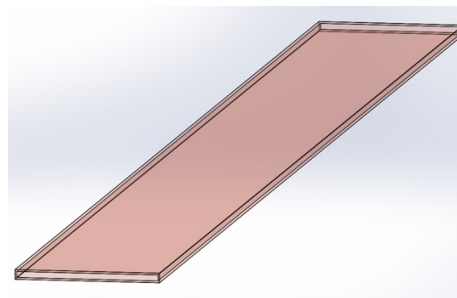


Figura 40 Diseño de la resina para la malla computacional

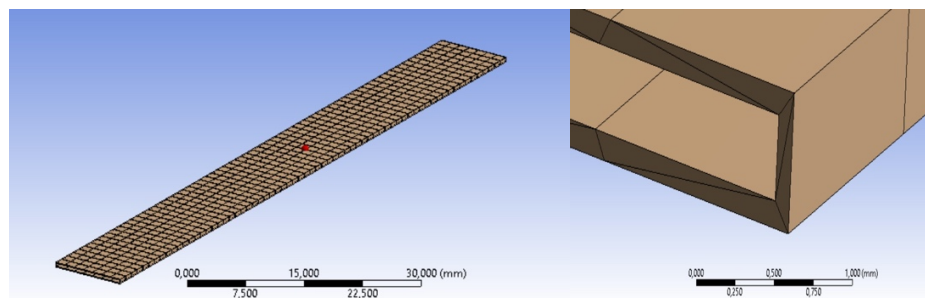


Figura 41 Malla computacional de la resina

3.8 Simulación del material

3.8.1 Ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción se procede a simular las sujeciones de la probeta estableciendo las siguientes condiciones: la sujeción de un extremo tiene fijación de traslación y rotación en todos los ejes; mientras que la del otro extremo se programa un desplazamiento en el sentido de la fibra. Con esto se logra simular el ensayo de

tracción obteniendo la curva característica y los valores límites del material compuesto.

En la figura 42 se puede observar el diseño del material compuesto con los elementos de sujeción, de los que se parte para la simulación sobre un software de ingeniería.

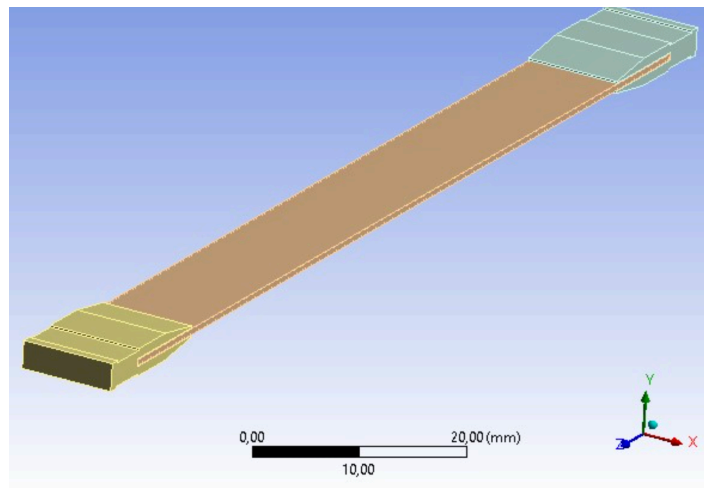


Figura 42 Diseño de la probeta con la sujeción para tracción.

Se programa el software para que arroje los resultados de esfuerzo máximo, desplazamiento máximo y la curva de esfuerzo deformación.

3.8.2 Ensayo de flexión

Para el ensayo de flexión se procede a simular los puntos de apoyo y el punto de presión de la probeta estableciendo las siguientes condiciones: los elementos de apoyo con fijación en traslación y rotación de todos los ejes y el dado de presión con traslación programada en el eje transversal a la dirección de la fibra; con esto se logra simular el ensayo de flexión obteniendo la curva característica y los valores límites del material compuesto.

En la figura 43 se puede observar el diseño del material compuesto con los elementos de sujeción, de los que se parte para la simulación sobre un software de ingeniería.

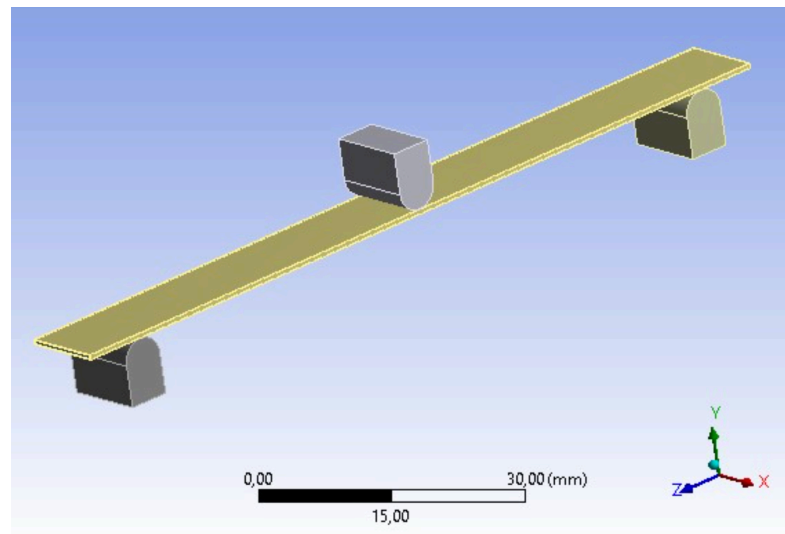


Figura 43 Diseño de la probeta con la sujeción para flexión.

Se programa el software para que arroje los resultados de esfuerzo máximo, desplazamiento máximo y la curva de esfuerzo deformación.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

4.1 Curvas esfuerzo deformación

4.1.1 Totora

A partir de los ensayos realizados se obtuvo los datos de 5 probetas, se eliminaron los resultados extremos, para cada grupo de diámetro y se obtuvo la curva promedio, y los resultados promedio que se observan en la tabla 9 en la página siguiente.

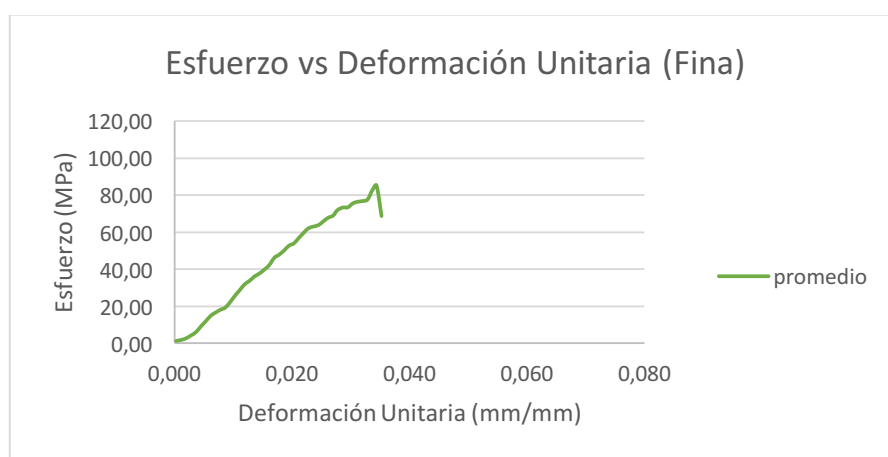


Figura 44 Esfuerzo vs Deformación de la fibra de totora diámetro fino

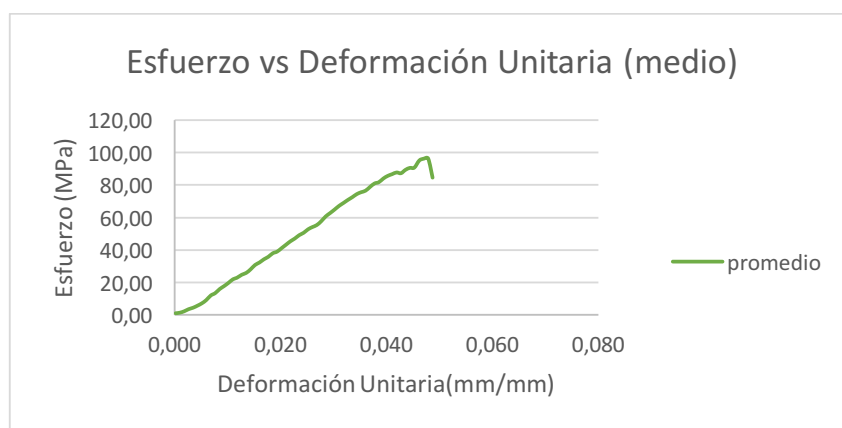


Figura 45 Esfuerzo vs Deformación de la fibra de totora diámetro medio

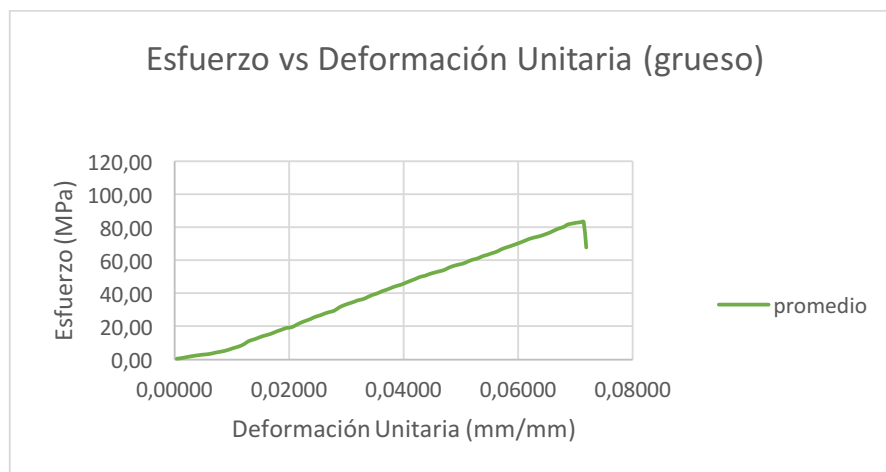


Figura 46 Esfuerzo vs Deformación de la fibra de totora diámetro grueso

Tabla 9

Esfuerzos y deformaciones máximas de la totora.

GRUPO DE DIÁMETROS	ESFUERZO PROMEDIO MÁXIMO (MPa)	DESVIACIÓN TÍPICA	DEFORMACIÓN PROMEDIO AL ESFUERZO MÁXIMO (mm/mm)	DESVIACIÓN TÍPICA
Fino (7-12mm)	85,068	7,667	0,03118	0,00432
Medio (13-18mm)	98,125	7,506	0,05184	0,00775
Grueso (19-25mm)	82,312	5,601	0,07096	0,00624
PROMEDIO	88,501	6,9246	0,05132	0,00610

De estos resultados se observa que los tres tipos de diámetros están dentro de un mismo rango de esfuerzo máximo, por lo que se selecciona el diámetro medio para la elaboración del material compuesto.

Al observar que la totora es un material frágil de comportamiento lineal se procede a obtener el coeficiente elástico, mediante la ley de Hooke, obteniendo un valor promedio de 1832.0185 (MPa).

Del ensayo de flexión se obtiene el esfuerzo máximo a flexión de 85,904 MPa con una desviación de 2,693 y una deformación unitaria de 0,0486 mm/mm con una desviación de 0,0001.

4.1.2 Resina

A partir de los ensayos realizados se obtuvo los datos de 5 probetas, se eliminó los resultados de los extremos, obteniendo la gráfica que se presenta a continuación.



Figura 47 Esfuerzo vs Deformación de Resina Poliester Sintapol 2074

Se obtiene un valor de esfuerzo máximo de 42,937 Mpa, una deformación máxima de 4,15% con un coeficiente de elasticidad de 1035,6Mpa; datos muy similares a la investigación de Villacis (2011), por lo que se consideran válidos.

Además del ensayo de flexión se obtiene el esfuerzo máximo a flexión de 65,797 MPa con una desviación de 7,212 y una deformación unitaria de 0,0607 mm/mm con una desviación de 0,0012.

4.1.3 Material compuesto

A partir del ensayo de tracción del material compuesto se obtiene la curva de Esfuerzo vs deformación unitaria promedio que se observa en la figura 48.

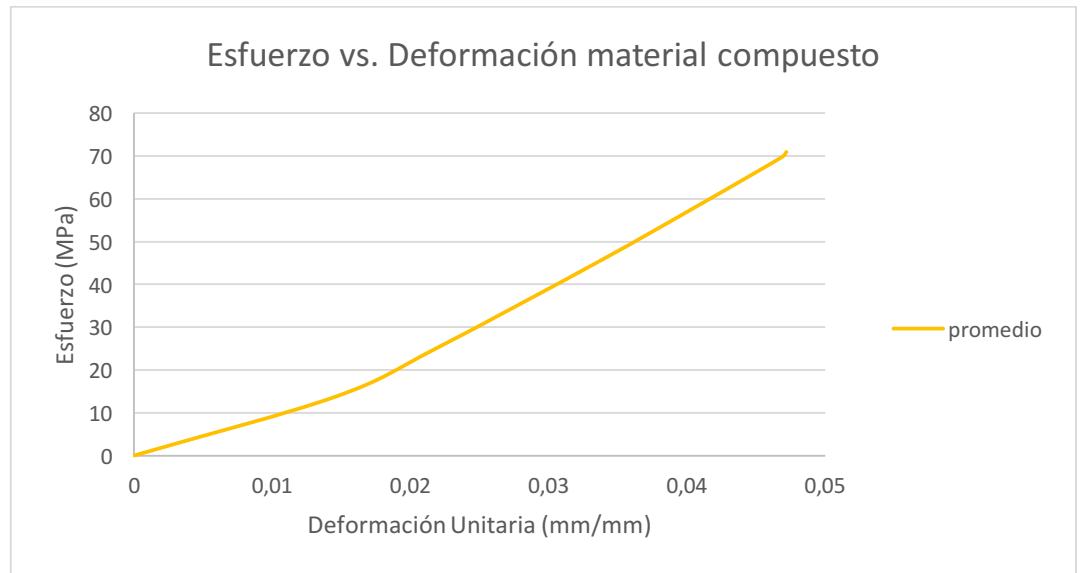


Figura 48 Curva Esfuerzo deformación unitaria del material compuesto

Teniendo como resultado un esfuerzo máximo de 70,942 MPa con una desviación de 1,045, una deformación unitaria de 0,0472 mm/mm con una desviación de 0,0015 y un módulo de elasticidad de 1503,81 MPa con una desviación de 46,066.

Del ensayo de flexión se obtiene el esfuerzo máximo a flexión de 89,13 MPa con una desviación de 6,16, con una deformación de 0,0541 mm/mm, con una desviación de 0,0016.

4.2 Análisis de simulaciones realizadas

4.2.1 Ensayo de tracción

Se procede a simular el material variando el tamaño de los elementos finitos, obteniendo convergencia desde un valor de 4000 elementos finitos hacia arriba, por lo que se puede establecer los resultados a partir de este valor como válidos para la simulación.

En la figura 49, 50 y 51, en la página siguiente, se muestra los resultados obtenidos del ensayo de tracción de donde se obtiene los resultados mostrados en la tabla 10, en la página 63.

En la figura 52, en la página siguiente, se observa la curva de convergencia de las simulaciones realizadas para el ensayo de tracción.

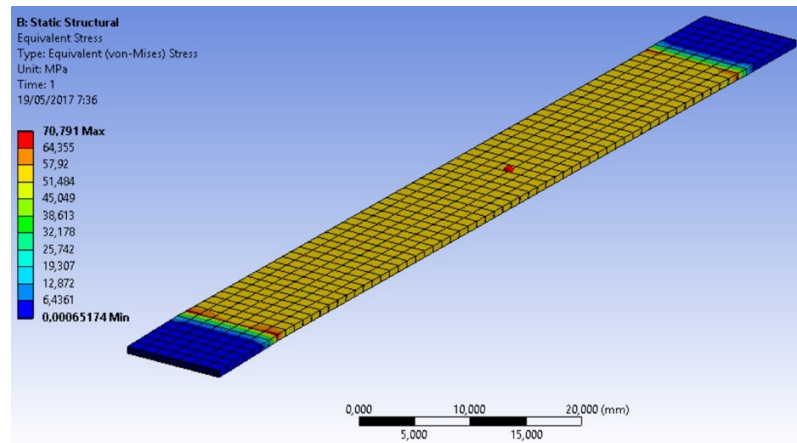


Figura 49 Esfuerzo máximo del ensayo de tracción del material compuesto

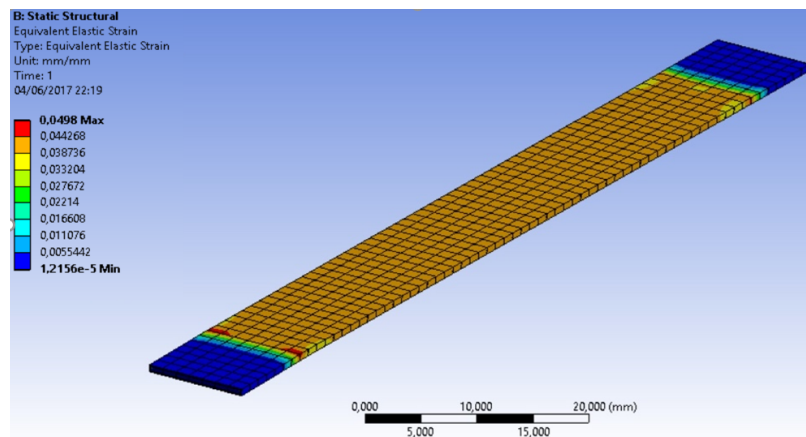


Figura 50 Deformación máxima el ensayo de tracción del material compuesto

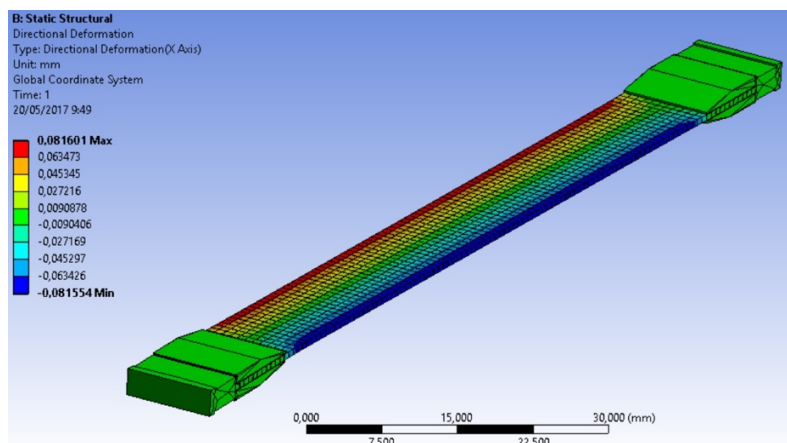


Figura 51 Desplazamiento simulado en el ensayo de tracción

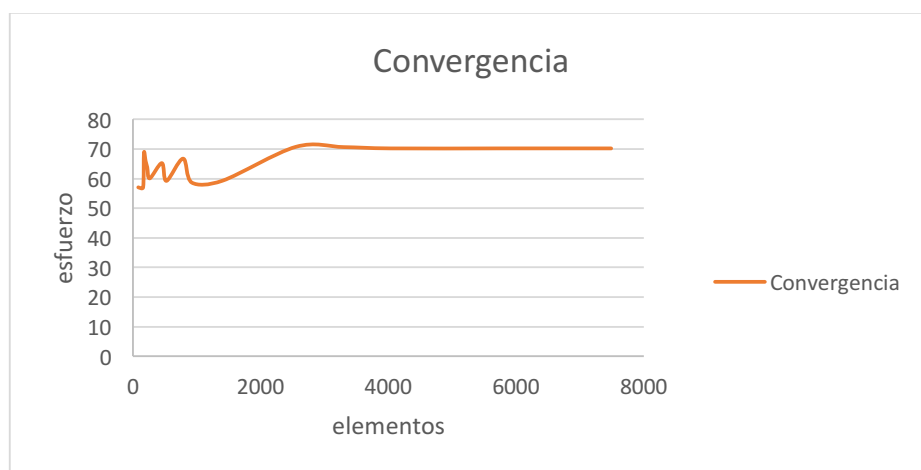


Figura 52 Curva de convergencia de la simulación del ensayo de tracción

Tabla 10

Comparación de resultados experimentales con simulación en tracción

ENSAYO DE TRACCIÓN	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN UNITARIA
EXPERIMENTAL	70,942 MPa.	0,0472 mm/mm
SIMULACIÓN	70,171 MPa.	0,0427 mm/mm
ERROR	1,086%	9,53%

Como se observa los resultados de la simulación se aproximan a los obtenidos en la fase experimental con un porcentaje de error de 1,086% con respecto al esfuerzo máximo y un 9,53% con respecto a la deformación unitaria.

4.2.2 Ensayo de flexión

Se procede a simular el material variando el tamaño de los elementos finitos, obteniendo convergencia a un valor aproximado de 4000 elementos finitos hacia arriba, por lo que se puede establecer los resultados a partir de este valor como válidos para la simulación.

En la figura 53, 54 y 55 se muestra los resultados obtenidos del ensayo de tracción de donde se obtiene los resultados mostrados en la tabla 11 en la página 65.

En la figura 56 en la página siguiente, se observa la curva de convergencia de las simulaciones realizadas para el ensayo de flexión.

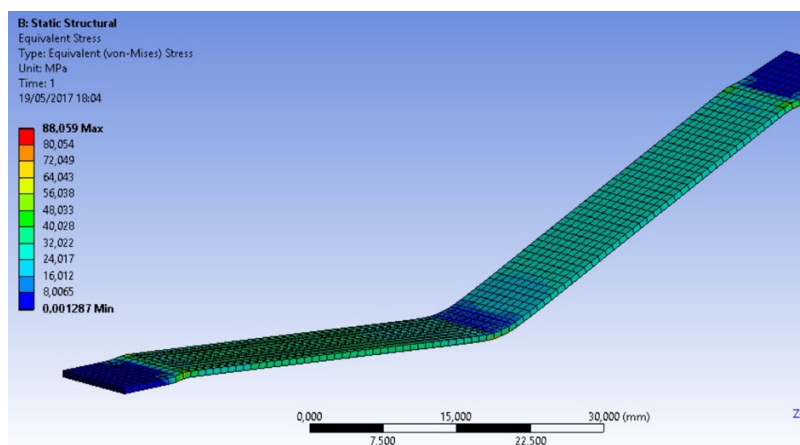


Figura 53 Esfuerzo máximo del ensayo de tracción del material compuesto

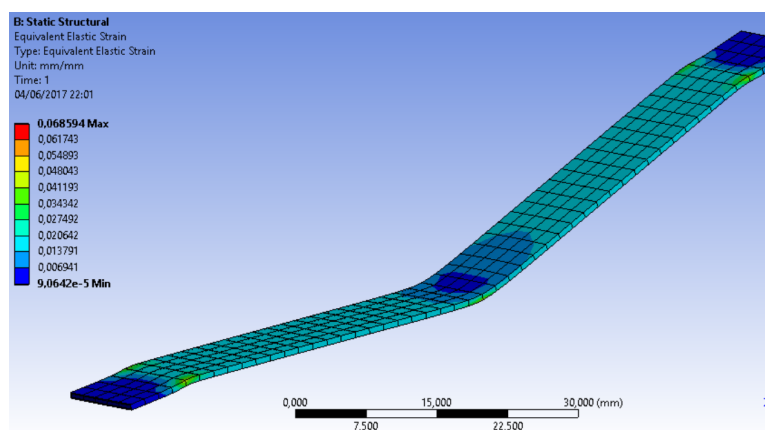


Figura 54 Deformación máxima el ensayo de tracción del material compuesto

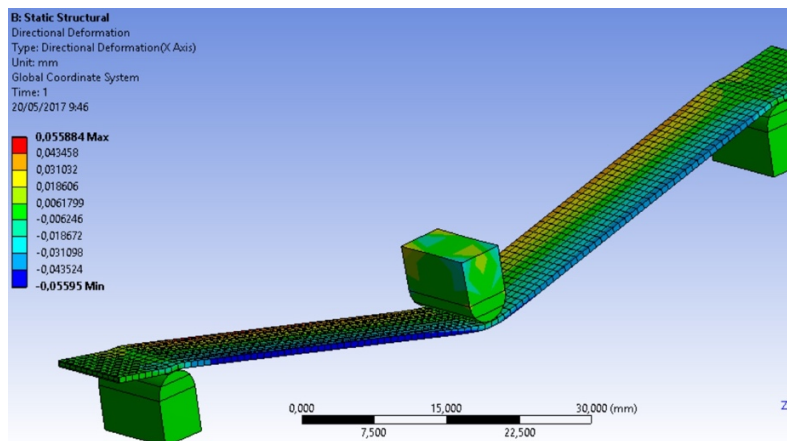


Figura 55 Desplazamiento simulado en el ensayo de tracción

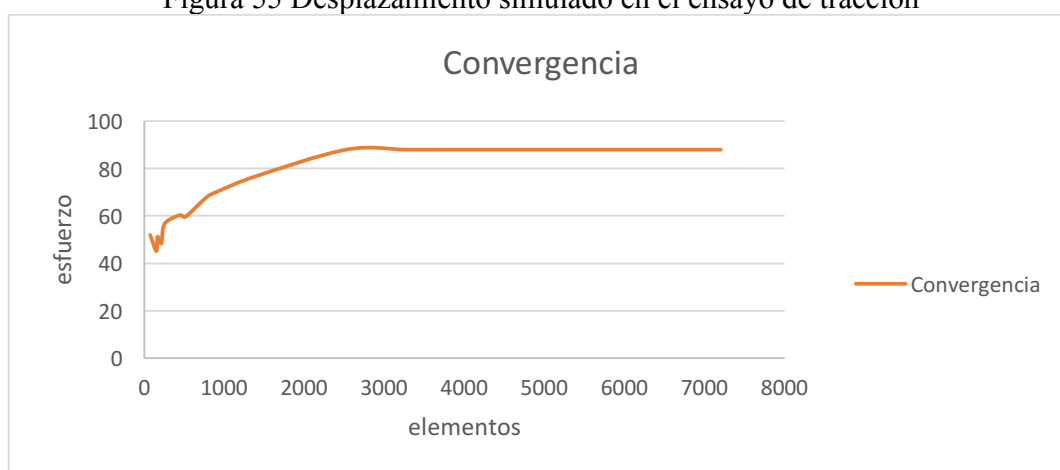


Figura 56 Curva de convergencia de la simulación del ensayo de flexión

Tabla 11

Resultados obtenidos de la simulación del ensayo de tracción

ENSAYO DE FLEXIÓN	ESFUERZO MÁXIMO	DEFORMACIÓN UNITARIA
EXPERIMENTAL	89,13 MPa.	0,0541 mm/mm
SIMULACIÓN	88,07 MPa.	0,0612 mm/mm
ERROR	1,189%	13,15%

Como se observa los resultados de la simulación se aproximan a los obtenidos en la fase experimental con un porcentaje de error de 1,189% con respecto al esfuerzo máximo y un 13,15% con respecto a la deformación unitaria.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El estudio realizado presenta la existencia de varias metodologías de simulación para materiales compuestos; entre las que destacan la malla computacional de una probeta con las propiedades mecánicas tomadas a partir del ensayo del material compuesto que optimiza el tiempo de simulación y la cantidad de elementos finitos utilizados ya que se considera todo como un solo cuerpo, y otra en la que existe una malla para cada uno de los componentes del material compuesto con sus respectivas propiedades mecánicas que brinda una mejor aproximación al resultado pero necesita un mayor tiempo computacional; ésta se utilizó en la investigación, ya que las probetas no tienen formas complejas, obteniendo resultados muy cercanos a los valores experimentales con un error promedio del 1,1% .
- La metodología experimental desarrollada mostró que la fibra de totora por su estructura interna no permite el paso de fluidos viscosos por lo que fue necesario presionar previamente la fibra para poder eliminar los orificios internos; además la micrografía del material compuesto demostró que el enlace fibra-resina es muy pobre ya que la superficie de la fibra de totora presenta cierto grado de repelencia a la resina por lo que fue necesario modificar la metodología experimental e incluir el proceso de lijado de la fibra para lograr una buena adherencia de la fibra a la resina el que se comprobó fue satisfactorio con las tomas micrográficas.

- La micrografía, una vez modificada el procedimiento experimental del material compuesto, mostró que el enlace de la fibra con la resina es bastante alto, por lo que permitió ejecutar una malla computacional del material compuesto con la condición “pegado” entre la fibra y la resina para los dos ensayos simulados, los que convergieron a los resultados esperados con mallas superiores a los 4000 elementos finitos en un volumen de 2760mm^3 .
- Los resultados obtenidos en la simulación de ingeniería de los ensayos de tracción y flexión presentaron valores muy cercanos a los esfuerzos máximos del material compuesto a tensión y flexión con un error de 1,086% y 1,1189% respectivamente con respecto a los ensayos experimentales ejecutados; mostrando la validez del método de simulación seleccionado y la posibilidad de asumir la interface entre la resina y la totora como 100% pegado.

5.2 Recomendaciones

- Es importante a futuro realizar pruebas del material compuesto con la fibra de totora eliminando la estructura interna; para analizar el cambio en el comportamiento mecánico; ya que en esta configuración se puede ejecutar varias láminas del material.
- Se sugiere realizar la simulación del material a partir de una malla computacional única del material compuesto sobre la que estén montados los datos de la fase experimental del material compuesto; para analizar el comportamiento de la simulación y poder ejecutar simulaciones de estructuras con mayor facilidad.

- Un estudio de la fibra tejida sin su estructura interna permitirá analizar el compuesto laminado en varias capas y observar su comportamiento.
- Ensayar el material compuesto en el sentido transversal a la fibra para obtener propiedades adicionales.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balam, J., Duarte, S., & Canché, G. (2006). OBTENTION AND CHARACTERIZATION OF COMPOSITES OF HENEQUEN “PINEAPPLE” FIBERS AND POLYPROPYLENE. *REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA QUÍMICA*, 5(2), 39-44.
- BARBERO, E., SGAMBITTERRA, G., ADUMITROAIE, A., & MARTINEZ, X. (2011). A discrete constitutive model for transverse and shear damage of symmetric laminates with arbitrary stacking sequence. . *Composite Structures*, 93(2), 1021-1030.
- Barrera, M., Hidalgo, M., & Mina, J. (2012). Compuestos Laminados De Matriz Polimérica Reforzados Con Fibras Naturales: Comportamiento Mecánico. *Scientia et Technica*, 17(51), 51-59.
- Bledzki, A., & Sperber, V. (2007). Comportamientos Recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra Natural. *8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica* (págs. 440-448). Cusco: P.U. Católica del Peru /Federación Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.
- Bonelli, C., Elzubair, A., & Miguez, J. (2005). Comportamento Térmico, Mecânico e Morfológico de Compósitos de Polietileno de Alta Densidade Reciclado com Fibra de Piaçava. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 15(4), 256-260.
- Borg, R., Nilsson, L., & Simonsson, K. (2002). Modeling of delamination using a discretized cohesive zone and damage formulation. . *Composites and Science Technology*, 62(10-11), 1299–1314.

- Christensen, R. (1998). The numbers of elastic properties and failure parameters for fiber composites. *J. Eng. Mater. Technol*, 110-120.
- Cuéllar, A., & Muñoz, I. (2010). BAMBOO FIBER REINFORCEMENT FOR POLYMER MATRIX. *Dyna*, 77(162), 137-142.
- Dau, F., Girardot, J., & Le, B. (2016). A promising way to model damage in composite and dry fabrics using a Discrete Element Method (DEM). *Applied Mechanics and Materials*, 828, 119-136.
- Dedeepya, M., Dharma Raju, T., & Jayananda Kumar, T. (2012). Effect of Alkaline Treatment on Mechanical and Thermal Properties Oftypha Angustifolia Fiber Reinforced Composites. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1(4), 12-14.
- Fajardo, J., Valarezo, L., López, L., & Sarmiento, A. (2013). Experiencias in obtaining polymeric composites reinforced with natural fiber from Ecuador. *Ingenius*, 9(1), 28-35.
- FAO. (2012). *Fibras naturales: Tejidos antiguos, geotex-tiles modernos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Quito: Tech. Rep.
- Gay, D., Hoa , S., & Tsai, S. (2003). *COMPOSITE MATERIALS DESIGN AND APPLICATIONS*. Paris: CRC.
- Guerrero, V., Dávila, J., Galeas, S., Pontón, P., Rosas, N., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). *NUEVOS MATERIALES: APLICACIONES ESTRUCTURALES E INDUSTRIALES* (Primera ed.). (P. Víctor Hugo Guerrero, Ed.) Quito, Ecuador: edifepp.

- Hidalgo, M., Muñoz, M., & Quintana, K. (2012). ANÁLISIS MECÁNICO DEL COMPUESTO POLIETILENO ALUMINIO REFORZADO CON FIBRAS CORTAS DE FIQUE EN DISPOSICIÓN BIDIMENSIONAL. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, 32(1), 89-95.
- INEFAN . (1998). *Informe interino a la secretaria del convenio de diversidad biológica, sobre la aplicación del artículo 6*. Instituto Ecuatoriano Forestal y de áreas naturales y de vida silvestre. Quito: Tech. Rep.
- Kaw, A. (2006). *MECHANICS OF Composite Materials*. Boca Raton: CRC.
- Kraft, S., & Gordon, A. (2011). Characterization of the tensile behavior of a metallic fiber woven structure. *Textil Research Jorunal*, 1249-1272.
- Kruyt, N., Millet, O., & Nicot, F. (2014). Macroscopic strains in granular materials accounting for grain rotations. *Granular Matter*, 933-944.
- Kumar Thakur, V., Kumari Thakur, M., & Kumar Gupta, R. (2014). Review: Raw Natural Fiber–Based Polymer Composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 19(3), 256-271.
- Lee, B.-H., Kim, H.-J., & Yu, W.-R. (2009). Fabrication of Long and Discontinuous Natural Fiber Reinforced Polypropylene Biocomposites and Their Mechanical Properties. *Fibers and Polymers*, 10, 83-90.
- Luo, S., & Netravali, N. (1999). Interfacial and mechanical properties of environment-friendly “green” composites made from pineapple fibers and poly(hydroxybutyrate-co-valerate) resin. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, 34, 3709-3719.

- Mallick, P. (2007). *FIBER- REINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Design*. Boca Ratón: CRC.
- Martinez, X., & Oller, S. (2009). Numerical simulation of matrix reinforced composite materials subjected to compression loads. . *Computational Methods in Engineering*, 16(4), 357–397.
- Marinez, X., Oller, S., Rastellini, F., & Barbat, A. (2008). A numerical procedure simulating RC structures reinforced with FRP using the serial/parallel mixing theory. . *Computers and Structures*, 85(15-16), 1604–1618.
- Molina, J., Benavides, S., Moreno, G., & Irribarra, E. (2014). Composite Material Based on a Matrix of Resin Polyester Reinforced With Cabuya and Paja Toquilla Fibers. *Journal of Materials Science Research*, 3(4), 53-57.
- Monteiro, S., Terrones, L., Lopes, F., & M. d'Almeida, J. (2005). Mechanical Strength of Polyester Matrix Composites Reinforced with Coconut Fiber Wastes. *Revista Matéria*, 10(4), 571-576.
- Ossa, A., Cano, F., Arango, J., & Montoya, C. (2007). Comparative study of the mechanical properties of glass and keratin fibers. *Scientia et Technica*, 13(36), 407-412.
- Otero, F., Martinez, X., Oller, S., & Salomon, O. (2012). Study and prediction of the mechanical performance of a nanotube reinforced composite. . *Composite Structures*, 94(9), 2920–2930.
- Paredes, J., Barbat, A., & Oller, S. (2011). A compression-tension concrete damage model, applied to a wind turbine reinforced concrete tower. . *Engineering Structures*, 32(12), 3559– 3569.

- Pontón, P., & Guerrero, V. (2010). Obtención de Materiales Compuestos de Matriz Poliéster reforzados con Fibra de Abacá mediante Estratificación manual. *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, 23(3), 47-54.
- Portella, E., Romanzini, D., Angrizani, C., Campos, S., & Zattera, A. (2016). Influence of Stacking Sequence on the Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Cotton/Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *Materials Research*, 542-547.
- Quesada, K., Alvarado, P., Sibaja, R., & Vega, J. (2005). UTILIZACIÓN DE LAS FIBRAS DEL RASTROJO DE PIÑA (*Ananas comusus*, variedad champaka) COMO MATERIAL DE REFUERZO EN RESINAS DE POLIÉSTER. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 6(2), 157-179.
- Ramanaiah, K., Ratna Prasad, A., & Hema Chandra Reddy, K. (2011). Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Typha angustifolia Natural Fiber-Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 16(7), 496-503.
- Ratna, A., Mohana, R., & Gupta, A. (2013). Experimental Investigation of Mechanical Properties of Golden Cane Fiber-Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 18(1), 30-39.
- Rodríguez, A., Valín, J., Díaz, D., Muniz, V., & Sanabio, L. (2014). Development of Composite with Henequen's fibres and termofix matrix. *Ingeniería Mecánica*, 17(3), 264-272.
- Rodríguez, L., Sarache, W., & Orrego, C. (2014). Compuestos de Poliéster Reforzados con Fibra de Plátano/Banano (*Musa paradisiaca*) Modificada Químicamente.

- Comparación con Fibra de Vidrio y Fique (*Furcraea andina*). *Información Tecnológica*, 25(5), 27-34.
- Saira, T., Ali, M., & Shafiullah, K. (2007). NATURAL FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES. *Proc. Pakistan Acad. Sci*, 44(2), 129-144.
- Sangthong, S. (2009). Mechanical property improvement of unsaturated polyester composite reinforced with admicellar-treated sisal fibers. *composite Part A: applied science and manufacturing*, 40(7), 687-694.
- Sanjuan, R., & Jasso, C. (2009). EFFECT OF WASTE AGAVE FIBER ON THE REINFORCING OF VIRGIN OR RECYCLED POLYPROPYLENE. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(3), 319-327.
- Shoji, H., Ohata, M., & Minami, F. (2015). Simulation-based method for hierarchal material design to improve ductile crack growth resistance of structural component. *International Journal of Fracture*, 167-178.
- Simbaña, A. (2001). *Usos y Aprovechamiento actual de la totora (Schoenoplectus californicus) en Imbabura*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Sede Ibarra. Ibarra: PUCESI.
- Susheel, K., B.S., K., & Inderjeet, K. (2009). Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites—A Review. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, 1253-1272.
- Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A., & Bermúdez, J. (2006). Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa. *Revista Tecnológica ESPOL*, 19(1), 113-120.

- Thiruchitrabalam, M., Athijayamani, A., Sathiyamurthy, S., & Syed Abu Thaheer, A. (2010). A Review on the Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites for the Development of Roselle Fiber- Reinforced Polyester Composite. *Journal of Natural Fibers*, 7(4), 307-323.
- USDAARS. (2012). *Taxon:Schoenoplectus californicus (C.A. Mey) Soják*. Germplasm Resources information Network. Betsville: GRIN.
- Zhu, X., Chen, X., Zhai, Z., Yang, Z., Li, X., & He, Z. (2014). Strain Rate Dependent Deformation of a Polymer Matrix Composite with Different Microstructures Subjected to Off-Axis Loading. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-11.