



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MATERIAL
COMPUESTO DE MATRIZ EPÓXICA CON FIBRAS DE GUADUA
ANGUSTIFOLIA KUNTH MEDIANTE SIMULACIÓN A TRAVÉS DEL
SOFTWARE ANSYS**

**KAREN DANIELA ROBERTO CAICEDO 506317
ANGIE CAROLINA LOZADA GARAVITO 506259**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020**

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MATERIAL
COMPUESTO DE MATRIZ EPÓXICA CON FIBRAS DE GUADUA
ANGUSTIFOLIA KUNTH MEDIANTE SIMULACIÓN A TRAVÉS DEL
SOFTWARE ANSYS**

**KAREN DANIELA ROBERTO CAICEDO 506317
ANGIE CAROLINA LOZADA GARAVITO 506259**

TRABAJO DE GRADO

**DOCENTE ASESOR
MSC. MBA. MARTIN EDUARDO ESPITIA NERY**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. MARTIN EDUARDO ESPITIA NERY
Director del proyecto de grado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., 25 de enero de 2021

DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro y todos los que vengan a mi madre Mery Caicedo quien ha sido la persona que siempre me ha acompañado y apoyado en mis alegrías y tristezas, quien me ha enseñado a luchar inalcanzablemente por mis sueños y me ha llenado de buenos valores, quiero agradecerle por todos los sacrificios que ha hecho para que mis hermanos y yo cumplamos nuestros sueños y podamos estar ahora aquí. Este logro es por ti y para ti, y sin ti nada de esto hubiese sido posible.

Gracias a las personas que me estuvieron acompañando en este proceso, a mis hermanos y a mis amigos porque en ellos nunca faltó una palabra de aliento o un apoyo en los momentos difíciles.

Karen Daniela Roberto.

Dedico este logro a Dios, a mis padres, Martha Garavito y Orlando Lozada y a mi prima Lady Jarleth Lozada Prado por el esfuerzo, la dedicación, compañía, y su apoyo incondicional durante todo mi pregrado, luchando conmigo para lograr mis metas, sueños e ideales, buscando mi felicidad, y afianzando conocimientos para una vida laboral y profesional, en donde pueda desarrollarme completamente. A mi familia y amigos que me han acompañado a lo largo de este proceso con sus conocimientos y me han motivado para llegar al final de este sueño.

Angie Carolina Lozada Garavito.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros padres y familiares por estar a nuestro lado durante estos años de estudio, quienes estuvieron siempre dándonos su apoyo cuando se nos presentaron dificultades motivándonos a seguir adelante para lograr recibir uno de los frutos de tanto esfuerzo a lo largo de nuestra carrera.

Gracias a la Universidad Católica de Colombia por habernos permitido formarnos en ella, gracias al Ing. Martín Eduardo Espitia Nery docente de la Universidad por su disposición y tiempo invertido en este proyecto, fue de gran ayuda su apoyo durante este proceso.

También queremos agradecer a nuestros amigos que compartieron con nosotras esta etapa tan importante en nuestras vidas.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	13
2. ANTECEDENTES	15
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
5. OBJETIVOS	19
5.1.OBJETIVO GENERAL	19
5.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
6. MARCO DE REFERENCIA	20
6.1.MARCO TEÓRICO	20
6.1.1. GUADUA	22
6.1.2. MORFOLOGÍA	23
6.1.2.1. RIZOMA	24
6.1.2.2. TALLO O CULMO	24
6.1.2.3. RAMAS	25
6.1.2.4. HOJAS CAULINARES	25
6.1.2.5. HOJAS DE FOLLAJE	26
6.1.2.6. PROPIEDADES DE LA GUADUA	28
6.1.2.7. PROPIEDADES FÍSICAS	28
6.1.2.8. PROPIEDADES MECÁNICAS	29
6.1.3. FIBRAS	31
6.1.3.1. FIBRAS NATURALES	31
6.1.3.2. FIBRAS SINTÉTICAS	32
6.1.3.3. FIBRAS ARTIFICIALES	33
6.1.3.4. OBTENCIÓN DE LA FIBRA DE GUADUA	33
6.1.3.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE GUADUA	34
6.1.3.6 ESTUDIOS Y APLICACIONES DE LA FIBRA DE GUADUA	35
6.1.4. RESINAS POLIMÉRICAS	38
6.1.4.1. RESINAS POLIÉSTER	38
6.1.4.2. RESINAS VINILÉSTER	38
6.1.4.3. RESINAS FENÓLICAS	38

6.1.4.4.	RESINAS EPÓXICAS	39
6.1.5.	MATERIALES COMPUESTOS	39
6.1.5.1.	MATERIALES COMPUESTOS	40
6.1.5.2.	ANÁLISIS MECÁNICO DE MATERIALES	41
6.1.5.2.1.	ENSAYO DE FLEXIÓN	42
6.1.5.2.2.	ENSAYO DE COMPRESIÓN	43
6.1.5.2.3.	ENSAYO A TRACCIÓN DIRECTA	44
6.1.6.	SIMULACIÓN	45
6.1.6.1.	TIPOS DE SIMULACIÓN	46
6.1.6.1.1.	SIMULACIÓN DISCRETA	46
6.1.6.1.2.	SIMULACIÓN CONTINUA	46
6.1.6.1.3.	SIMULACIÓN COMBINADA DISCRETA-CONTINUA	46
6.1.6.1.4.	SIMULACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA	46
6.1.6.1.5.	SIMULACIÓN DETERMINÍSTICA Y ESTOCÁSTICAS	47
6.1.6.2.	MODELOS DE SIMULACIÓN	47
6.1.6.2.1.	MODELO ANÁLOGO	47
6.1.6.2.2.	MODELO MATEMÁTICO	47
6.1.6.2.3.	MODELO COMPUTACIONAL	47
6.1.6.3.	MÉTODO DE ANÁLISIS NUMÉRICO	47
6.1.6.3.1.	MÉTODOS NUMÉRICOS PARA SIMULACIÓN	49
6.1.6.3.2.	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DISCRETOS	49
6.1.6.3.3.	MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS	50
6.1.6.3.4.	MÉTODO POR ELEMENTOS FINITOS	51
6.1.6.4.	CLASES DE SIMULADORES	52
6.1.6.4.1.	ANSYS STRUCTURAL	52
6.1.6.4.2.	COMSOL MULTIPHYSICS	53
6.1.6.4.3.	ABAQUS	54
6.2.	MARCO CONCEPTUAL	55
7.	ALCANCES Y LIMITACIONES	57
8.	METODOLOGÍA	58
8.1	IDENTIFICAR METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS NUMÉRICOS PARA MATERIALES COMPUESTOS	59

8.2 REALIZAR UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL USO DE ANSYS EN LA SIMULACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS	60
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
9.1.RESULTADOS	66
9.2.ANÁLISIS DE RESULTADOS	96
10. ESTRATÉGIAS DE TRANSFERENCIA DE RESULTADOS	99
11. CONCLUSIONES	100
12. RECOMENDACIONES	101
13. BIBLIOGRAFÍA	102

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación de propiedades Bambú vs otros materiales	30
Tabla 2. Propiedades mecánicas del Bambusa Blumeana en condición seca	30
Tabla 3 Valores promedio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de G. angustifolia en función de la posición en el culmo y la edad	35
Tabla 4. Diferentes resultados de ensayos. Esfuerzo y Modulo elástico	35
Tabla 5. Ventajas y desventajas de los métodos de análisis numéricos.	48
Tabla 6. Propiedades mecánicas de Bioepoxi SuperSap 100/1000 [74]	69
Tabla 7. Promedio de las propiedades mecánicas de las fibras de guadua	69
Tabla 8 Propiedades obtenidas ante el comportamiento de flexión promedio	96
Tabla 9 Propiedades obtenidas ante el comportamiento de tracción promedio	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1 Proceso Marco Teórico	20
Fig. 2 Angustifolia Kunth en Colombia	22
Fig. 3 Estructura Anatómica Angustifolia Kunth	23
Fig. 4 Rizoma de Guadua	24
Fig. 5 Culmo de Guadua	25
Fig. 6 Hojas Caulinares	26
Fig. 7 Hojas follaje.....	26
Fig. 8 Partes de la Guadua	27
Fig. 9 Sección transversal de culmo de Guadua.....	29
Fig. 10 Clasificación de las fibras.....	31
Fig. 11 Clasificación de las fibras según su origen	32
Fig. 12 Clasificación de los materiales compuestos por fibras	40
Fig. 13 Principales fibras vegetales utilizadas en materiales compuestos	41
Fig. 14 Diagrama de tensión (esfuerzo) Vs. Deformación.....	42
Fig. 15 Ensayo a flexión.....	43
Fig. 16 Ensayo a compresión.....	44
Fig. 17 Resistencia directa a la tracción.....	45
Fig. 18 Métodos de análisis numérico.....	48
Fig. 19 Temperatura de partículas en un reactor	50
Fig. 20 Malla superficial coloreada por aspecto de la celda.....	51
Fig. 21 Nodos y elementos de una malla	52
Fig. 22 Simulación a través del Software ANSYS.....	53
Fig. 23 Simulación a través del Software COMSOL	54
Fig. 24 Simulación a través del Software ABAQUS	55
Fig. 25 Metodología para la simulación del comportamiento mecánico a tracción y flexión de un material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua Angustifolia Kunth por el método de los elementos finitos con el Software Ansys.	58
Fig. 26 Diagrama de flujo del paso a paso de la metodología propuesta.....	66

Fig. 27 Ambiente de Ansys Workbench 2020 R2, con módulos de ACP (PRE), Estructuras estáticas.....	68
Fig. 27 Bioepoxi SuperSap 100/1000 creado en Ansys	70
Fig. 28 Fibra de guadua creada en Ansys	70
Fig. 29 Geometría creada en Ansys.....	71
Fig. 30 Mallado de la geometría.....	71
Fig. 31 Creación de la capa de Bioepoxi SuperSap 100/1000.....	72
Fig. 32 Creación de la capa de fibra de guadua	73
Fig. 33 Propiedades Polares del Bioepoxi SuperSap 100/1000.....	73
Fig. 34 Propiedades polares de la fibra de Guadua	74
Fig. 35 Rosettes.....	75
Fig. 36 Oriented Selección Set	75
Fig. 37 Modeling Group, capa Bioepoxi SuperSap	76
Fig. 38 Modeling Group, capa fibra de guadua	76
Fig. 39 Solid.....	77
Fig. 40 Análisis de SamplinPoint.....	78
Fig. 41 Modelo importado de Ansys ACP Pre.....	79
Fig. 42 Static Structural (B3)	79
Fig. 43 Solution (B4)	80
Fig. 44 Deformación total	81
Fig. 45 Deformación direccional X	82
Fig. 46 Deformación direccional Y	82
Fig. 47 Deformación direccional Z	83
Fig. 48 Vector del esfuerzo principal.....	83
Fig. 49 Esfuerzo cortante XY	84
Fig. 50 Esfuerzo cortante YZ	84
Fig. 51 Esfuerzo cortante XZ	85
Fig. 52 Máximo esfuerzo cortante.....	86
Fig. 53 Esfuerzo Normal X.....	86
Fig. 54 Esfuerzo Normal Y	87
Fig. 55 Esfuerzo Normal Z	88
Fig. 56 Máximo esfuerzo principal.	88
Fig. 57 Mínimo esfuerzo principal.	89
Fig. 58 Esfuerzo equivalente.....	90
Fig. 59 Soporte y una fuerza perpendicular al plano XY	90
Fig. 60 Deformación total	91
Fig. 61 Máximo esfuerzo principal	92
Fig. 62 Mínimo esfuerzo principal.	93
Fig. 63 Esfuerzo normal	93
Fig. 64 Vector del esfuerzo principal.....	94
Fig. 65 Prueba de esfuerzo.....	95
Fig. 66 Prueba de deformación.....	95

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1 Curva Esfuerzo-Deformación	97

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son establecidos en la unión de una matriz con un material de refuerzo que suele ser un tipo de fibra o un polvo. Las fibras del compuesto reciben la tensión a la que se somete el material y debido a su gran módulo de elasticidad se obtienen propiedades mecánicas mejoradas. En los últimos sesenta años los materiales más diversificados y más utilizados a nivel mundial han sido los plásticos reforzados con fibras sintéticas como los termoplásticos y termoestables reforzados con fibras de carbono, kevlar, vidrio, etc. Por causa del aumento de los precios de la materia prima y de la conciencia medio ambiental se aumentó el uso de los llamados materiales verdes, muchos de los cuales son del tipo reforzados por fibras de origen vegetal, como las fibras de coco, lino, fique, guadua, etc, [1].

El mercado de los materiales compuestos está liderado por el sector automotriz el cual consume el 31%, seguido por la aeronáutica y el ámbito espacial en donde se utiliza un material de alto rendimiento, estableciéndose en el mercado con un consumo de 22%, continuando con la industria de la construcción en el cual los materiales conocidos como tradicionales ejercen una competencia muy fuerte en el sector (hormigones, metales, cerámicas, polímeros etc.); sus prestaciones son muy bien conocidas por todas las figuras que aparecen en la construcción: proyectistas, contratistas, operarios e incluso los propios clientes, aunque la construcción sólo representa un pequeño porcentaje del mercado de materiales compuestos con un 13%, contra el 35% en Japón, el 32% en Brasil y el 30% de promedio mundial. [2]

La clasificación de los materiales compuestos se debe gracias a su matriz, la cual se puede identificar en tres grupos principales, 1) materiales compuestos de matriz metálica, 2) materiales compuestos de matriz cerámica y 3) materiales compuestos de matriz polimérica [3], son éstos últimos a los que dedicaremos este estudio. Los polímeros abarcan materiales tan diversos como los plásticos, el caucho, los adhesivos o las resinas, los cuales pueden definirse como moléculas mediante enlaces interatómicos covalentes [4], para este caso se utilizará una resina epóxica como parte del material compuesto, siendo este el material de matriz más utilizado en los materiales compuestos a través de resinas.

Actualmente la industria busca materiales compuestos porque ofrecen ventajas que permiten reemplazar otros materiales y optimizar de alguna manera las características y comportamientos de estos, por ejemplo, para materiales como el metal o fibras de refuerzo se lograr reducir o eliminar su uso, debido que son nocivas para el medio ambiente. [5] Los materiales hoy en día usados, como los compuestos de fibra de vidrio y carbono ofrecen a la industria propiedades mecánicas mejoradas, pero todos esos aspectos favorables durante el período de uso operan en contra del medio ambiente al momento de su degradación, ya que no son degradables y su

manera de destrucción al final de la vida son desconocidos. [6] Por lo anterior, es necesario suplantar el tipo de fibras que se han venido usando hasta ahora.

Es aquí donde se da paso a la investigación de materiales alternativos para los materiales compuestos, considerando como un elemento con múltiples ventajas a la fibra de Guadua Angustifolia Kunth porque 1) es un recurso de múltiples aplicaciones, 2) ha cumplido un importante papel ambiental, cultural y económico con ventajas naturales e industriales, 3) su empleo ha mostrado avances importantes debido a las diversas investigaciones realizadas sobre el aporte a la conservación del medio ambiente y sus fortalezas mecánicas para los diversos usos, ya que es una de las plantas con mayor resistencia mecánica y de fácil integración a otros materiales, como los polímeros y 4) Colombia es productor de cantidades representativas de la planta, sin embargo, no se aprovecha este recurso en los campos en que su aplicación puede llegar a ser de gran beneficio para la sociedad, como lo es en construcción de viviendas, canaletas, acueductos, puentes, entre otros.

La información plasmada en el presente documento es de carácter teórico, el cual busca ser comprobado experimentalmente en un futuro trabajo, basado en literatura recolectada por ensayos realizados afines y en la evaluación del uso de materiales compuestos de matriz polimérica con fibras naturales, las cuales vienen siendo una estrategia beneficiosa para el mejoramiento del medio ambiente. Este trabajo tiene como objetivo, estructurar una metodología que permita la simulación del comportamiento mecánico a tensión y flexión de un material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua Angustifolia Kunth por medio del uso de elementos finitos mediante el software Ansys.

Para la simulación se tuvieron en cuenta los principios de flexión y torsión en cuanto a la deformación causada sobre la geometría estudiada, así, mediante el análisis de elementos finitos se permitió conocer el comportamiento mecánico del material compuesto en una aplicación real exaltando la utilidad del Ansys en el diseño de materiales para elementos reales, evitando las limitaciones de los ensayos de laboratorio como la diferencia con las escalas y comportamientos reales que hace necesaria la utilización de factores de conversión o correcciones para extrapolar los resultados a escala de la muestra. Dicho lo anterior, se permitió proceder con la simulación a través del Software Ansys. Acorde a lo anterior, se obtuvieron resultados comparativos teniendo en cuenta la simulación la simulación del material compuesto por capas epóxicas con capas de fibras de Guadua Angustifolia Kunth.

2. ANTECEDENTES

Últimamente se ha incrementado el interés sobre los materiales eco-amigables, varios de estos estudios se han enfocado en la sustitución de fibras sintéticas por fibras de origen natural en refuerzo en los materiales compuestos. Estas fibras naturales, en su mayoría procedentes de fuentes vegetales, tales como las fibras guadua, coco, lino, etc, presentan distintas ventajas por encima de sus homologas sintéticas [7]; sin embargo, a pesar de tener menor módulo de Young y resistencia mecánica, estas son interesantes ya que mejoran significativamente las propiedades de los compuestos que refuerzan, generalmente de matriz polimérica, además de poseer diversas ventajas a diferencia de sus homólogas sintéticas, ya que estas son biodegradables, de fuentes abundantes, menos rígidas y quebradizas que las de vidrio y cerámica, no tóxicas y de mucho menor costo. [8]

Por otra parte, el uso de materiales compuestos de matrices poliméricas con fibras de guadua ha evidenciado a nivel mundial un incremento notable en las últimas décadas, por tanto, el mercado dispone de una gran variedad de softwares de simulación para materiales compuestos mediante el método matemático de elementos finitos. [9] Estas herramientas informáticas han permitido evaluar el rendimiento de productos con aplicación de criterios de resistencia, rigidez o fatiga, a su vez haciendo un análisis térmico, acústico, dinámico, electromagnético y de flujos [10]; sin embargo, el método de elementos finitos por novedoso que parezca, tiene varios años en su forma conceptual, ya que podemos recordar las bases de cálculo diferencial e integral propuestos por Isaac Newton por tomar un ejemplo, no obstante, el desarrollo moderno de esta técnica comienza en 1940 en el campo de la Ingeniería Estructural, con los trabajos de Hrennikoff en 1941 y McHenry en 1943, quienes propusieron el uso de líneas en una dimensión para representar elementos como barras o vigas para el cálculo de esfuerzos en sólidos con sección transversal continua. [11]

En la antigüedad los materiales compuestos eran conocidos por la humanidad en la era del Paleolítico también conocida como la edad de la piedra vieja. En los últimos años, los materiales compuestos a base de polímeros han sido utilizados en diversas aplicaciones, como la deportiva, construcción, automotriz, entre otros. [12] Un material compuesto se caracteriza por tener propiedades superiores a la de sus componentes por separado, sus componentes no se disuelven ni se funden entre ellos, aunque funcionan en conjunto. Los materiales compuestos han alcanzado significativos desarrollos en diversas áreas, en las que se han logrado numerosas ventajas en cuanto a su resistencia mecánica y a su vez permitiendo ofrecer soluciones eficientes en costo según la aplicación. Se ha visualizado la presencia y uso de materiales compuestos en estructuras de edificios, en las cuales principalmente es usada la unión de acero y concreto, sin embargo, para todos los tipos de aplicación, varía el compuesto dado a que en cada caso un material puede soportar cargas diferentes.

Debido a lo anterior, se propuso realizar un trabajo sobre materiales compuestos, más concretamente fibras de guadua con resina epóxica, teniendo en cuenta que se seleccionó la guadua debido a que es un material que se ha dado a conocer por sus altas propiedades, además de ser una fibra natural en la que se están realizando diversas investigaciones para analizar más de sus propiedades, por otra parte, la resina epóxica se seleccionó debido a que es un material de amplio uso industrial, con unas excelentes propiedades dentro de materiales poliméricos termoestables ya que posee una gran compatibilidad con otros materiales. La resina epóxica es un material comúnmente usado para la producción de composites junto con otros materiales fibrosos que mejoran su rendimiento mecánico y estabilidad térmica, como lo son las fibras de vidrio o carbono, que se pueden reemplazar por fibras vegetales. Esta resina se caracteriza gracias a sus buenas propiedades mecánicas, a su buen aislamiento eléctrico, a su resistencia ante fluidos corrosivos (agua, ácidos, alcoholes, etc.), y a sus excelentes propiedades adhesivas, entre otras. [13]

Finalmente, algunas investigaciones, han logrado expresar que es posible mejorar las propiedades de las fibras de origen vegetal, cuando éstas son tratadas con un material de matriz polimérica. Estos métodos pueden ser utilizados para optimizar la compatibilidad de las fibras con la resina y obtener un compuesto de mejor calidad. [14]

3. JUSTIFICACIÓN

Las fibras naturales se han convertido en una alternativa llamativa para aplicaciones industriales debido a su leve peso, bajo costo y por ser una materia prima renovable con propiedades superiores a otros materiales cuando se utiliza como refuerzo en materiales compuestos. Es por esto que se busca implementar el uso de fibras naturales en materiales compuestos de matriz epóxica, de tal manera que amortigüen el efecto negativo en el medio ambiente generado por materiales que tienen baja capacidad de degradación. Es así como las fibras de guadua al poseer diversas características que la conciben como un recurso importante en cuanto a su comercialización y biodegradación, se ha planteado como elemento esencial en el desarrollo de la presente investigación, especialmente por sus propiedades estructurales, como la relación resistencia/peso que es superior a la de la mayoría de las maderas. [15]

Se han realizado diversos estudios sobre el reemplazo de fibras sintéticas, los cuales en los últimos años han mostrado un importante incremento para obtener diferentes alternativas menos perjudiciales, renovables y ecológicas para reducir el impacto ambiental. El uso de los materiales compuestos a través de fibras naturales se ha aumentado en el mercado en términos de economía, gracias a su alta resistencia y a su alto grado de descomposición al finalizar su ciclo de vida, pero, por otro lado, las fibras vegetales brindan unas excelentes opciones, debido a su naturaleza competitiva y renovable. [16]

La utilización de materiales compuestos ha sido extendida en los últimos años, especialmente cuando se aplica su uso con fibras naturales, la Guadua al ser un material con unas características físico-mecánicas de alto potencial puede ser empleada dentro del uso de materiales compuestos [17]. Por esto, en este proyecto se busca realizar la simulación del material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua *Angustifolia* Kunth, con el objetivo de analizar el comportamiento mecánico a flexión y a tracción del material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua.

Lo que motiva el desarrollo de esta investigación puede ser explicado a través del tratar de identificar las propiedades de un material compuesto sin necesidad de desarrollar ensayos de laboratorio, que pueden tomar tiempo y recursos, brindando a través de este trabajo una metodología práctica y rápida para la identificación de las propiedades mecánicas de los materiales, dejando de lado limitaciones del laboratorio, ya que las muestras con las que se ensayan corresponden a puntos aislados, no siendo representativos de todo el conjunto ni de la variabilidad de factores presentes en la naturaleza, y que condicionan los comportamientos de los materiales, de ahí la importancia de realizar un número de ensayo estadísticamente representativo, además en mucho de los casos las condiciones ambientales en que se encuentran las muestras son difíciles de reproducir en laboratorio.

Adicional a ello, la Guadua al ser un material ambientalmente sostenible, el cual se puede producir en grandes cantidades, se convierte en un factor interesante para su estudio al ser implementado en un material compuesto de matriz polimérica a partir de una resina epóxica.

4. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El medio ambiente es uno de los factores más importantes e influyentes para la humanidad cuando se realizan diseños y construcciones, y es por ello que se han llegado a implementar las fibras guadua como refuerzo en diversos materiales compuestos, ya que gracias a sus propiedades mecánicas mejoran significativamente la resistencia de un material compuesto, en especial cuando su matriz es polimérica, lo cual permite contribuir a las comunidades en su adaptación a los cambios negativos del medio ambiente, disminuyendo a su vez costos.

A pesar de haber realizado investigaciones sobre las publicaciones actuales tendientes a analizar las propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz epóxica con fibras de Guadua, se debe seguir perfeccionando, ya que, pese a que se encontraron diversos estudios referentes al contenido, estos no han sido exhaustivos, debido a que en muy pocos se han encontrado resultados de análisis de simulación por elementos finitos.

En este sentido, y de acuerdo con el objetivo planteado para el presente proyecto, se procura dar respuesta a la siguiente pregunta: **¿Cuál es la metodología para analizar el comportamiento mecánico a tracción y flexión de un material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua Angustifolia Kunth con el uso del software ANSYS?**

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Estructurar una metodología que permita la simulación del comportamiento mecánico a tracción y flexión de un material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua Angustifolia Kunth por el método de los elementos finitos con el Software Ansys.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar metodologías de análisis numéricos para materiales compuestos.
- Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de ANSYS en la simulación de materiales compuestos.
- Proponer una metodología de simulación del comportamiento a tracción y flexión de un material compuesto matriz epóxica con fibras de Guadua mediante el Software Ansys.

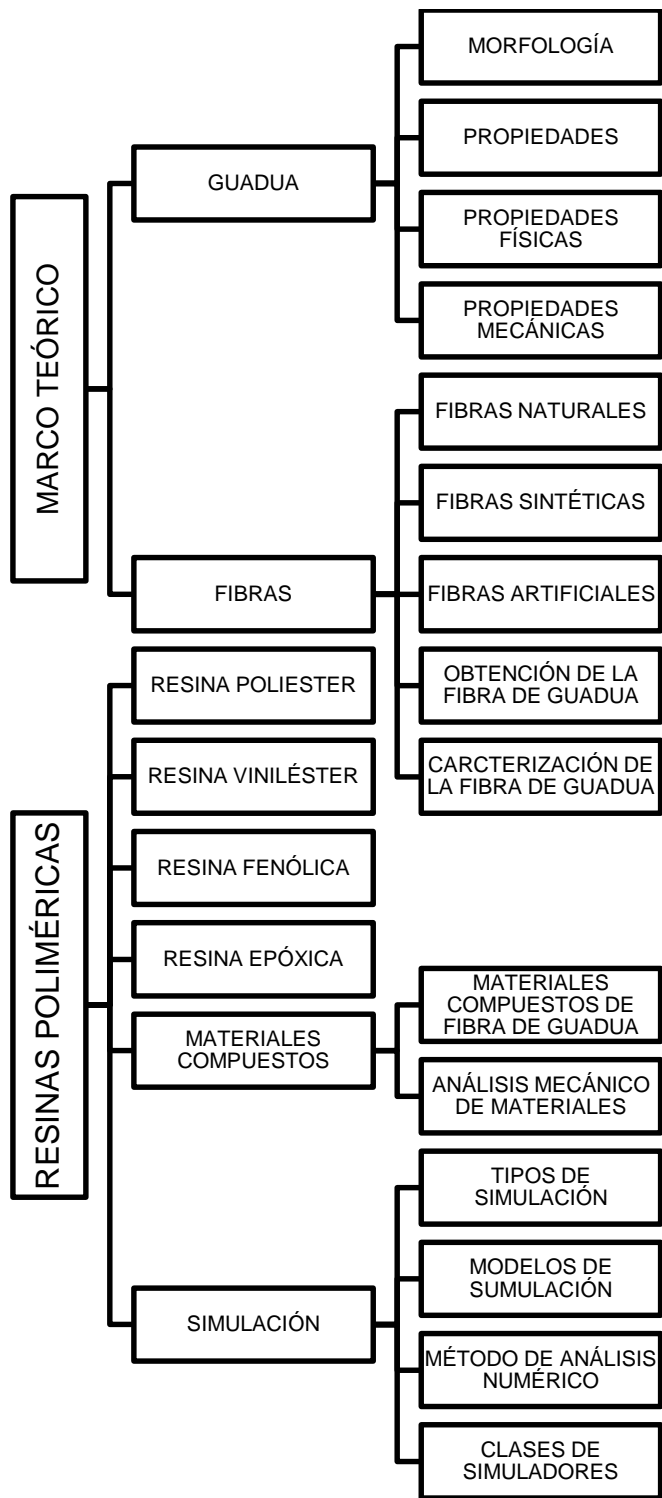
6. MARCO DE REFERENCIA

Las literaturas utilizadas para el desarrollo del presente trabajo de investigación fueron adquiridas a través de revisiones virtuales en los repositorios de las principales universidades del país, las cuales brindan tesis de pregrados, posgrados y doctorados afines a esta investigación. En la presente investigación, se tuvo en cuenta la literatura encontrada en artículos de investigación y las respectivas normas técnicas aplicables con base a los materiales poliméricos compuestos de fibras naturales, y para este caso, se tomaron los resultados de ensayos ya ejecutados para la comprobación de resistencia a flexión y a tracción de una Resina Epóxica reforzada con fibras de *Guadua Angustifolia Kunth*.

6.1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describe las propiedades de la *Guadua Angustifolia Kunth*, identificando su morfología y clasificación, asimismo, se expone la diversidad de la *Guadua* existente en Colombia y en el mundo. Seguido a esto se describe detalladamente la clasificación de las fibras y los materiales compuestos y su análisis mecánico para llevar a cabo la simulación. Finalmente se podrá encontrar la definición, tipo y modelos de Softwares teniendo en cuenta el método de análisis numérico por el cual se lleven a cabo. Ver Fuente: Autores

Fig. 1 Proceso Marco Teórico



Fuente: Autores

6.1.1. Guadua

La Guadua aporta un papel importante en distintos ámbitos socioculturales, económicos y ambientales del país, ya que el uso de estos materiales es de bajo costo y presenta sostenibilidad, es por ello por lo que en todo el mundo se ha llegado a implementar diferentes alternativas y tecnologías para la producción, propagación y manejo silvicultural de esta especie.

En Colombia la especie alcanza producciones representativas y presenta condiciones ecológicas que le permite contribuir como fuente de agua, albergando variedad de especies animales y a la captura de CO₂., se puede mencionar que dicho potencial se comenzó a mostrar a través de los diferentes proyectos de construcción.

Gracias a sus propiedades como reguladora de aguas, la Guadua es la especie forestal más importante del occidente de Colombia. Además de ello, la Guadua es importante por ser una planta protectora de suelos ya que sus condiciones físico-mecánicas la hacen conveniente para la producción de muebles, fabricación de artesanías y construcción de la tierra. La Guadua es la planta que más crece sobre la faz de la tierra ya que pueden llegar a crecer hasta 1 metro en 24 horas, alcanzando en sus escenarios normales entre 18 y 20 metros de altura.

Colombia posee una gran variedad de Guadua, la cual tiene las mejores condiciones físico-mecánicas del mundo por su durabilidad, esta es la *Angustifolia* Kunth, es una especie muy importante dada por sus características, esta se puede encontrar desde Panamá hasta Perú, pero la variedad bicolor solo se ha encontrado en Colombia.

Fig. 2 *Angustifolia* Kunth en Colombia



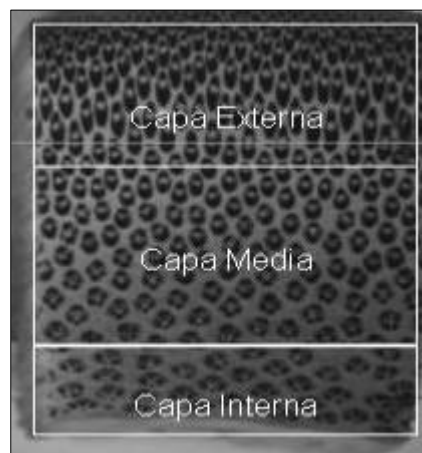
Fuente: [18]

Esta especie está dotada de condiciones que la hacen unos perfectos recursos sostenibles, no necesita de semilla para producirse. Adicionalmente presenta una enorme riqueza ambiental. La guadua *Angustifolia* posee propiedades estructurales que sobresalen de sus demás especies, generando grandes ventajas de aprovechamiento, adicionalmente estas pueden ser comparadas con la del acero ya que algunas fibras presentes en esta especie absorben gran cantidad de energía, esta admite grandes niveles de flexión por ende es ideal para levantar construcciones sismo resistentes.

Se debe tener en cuenta que por esta especie ser un material orgánico, también realiza su fotosíntesis y por ello existen factores que afectan el desempeño mecánico de la especie, en el caso de la humedad de la planta, edad y entre otras

La guadua *angustifolia* fue analizada en pruebas de resistencia y se encontró en su estructura interna, la incidencia que presenta está en la resistencia a flexión y a tensión. La resistencia a la flexión disminuye de la capa externa a la interna, debido a la reducción de la cantidad de células de fibras en ese sentido. Los valores de resistencia a flexión en la guadua disminuyen con la presencia de nudos debido a la discontinuidad de las fibras en esa parte del material: “La resistencia a la tensión al igual que la de flexión disminuye de la capa externa a la interna, aspecto que se relaciona con que la cantidad de las células de fibra se reducen hacia la capa interna, como menciona” [19]

Fig. 3 Estructura Anatómica *Angustifolia* Kunth



Fuente: [20]

6.1.2. Morfología

La estructura de la Guadua está conformada por un sistema de ejes vegetativos que forman alternadamente nudos y entrenudos, los cuales varían en su morfología, esta se considera un material compuesto mediante fibras que están internas en una

matriz, esta planta se compone de un culmo hueco que de tal forma cubre las fibras de guadua que está dividido por diafragmas y resulta siendo un material funcionalmente graduado, lo que quiere decir que sus fibras se distribuyen de manera heterogénea sobre todas las paredes del culmo [21]

6.1.2.1. Rizoma

Es un tallo subterráneo almacenador de nutrientes y es el elemento apto para la propagación sexual, en este se encuentra las yemas y estas generan nuevos rizomas y tallos.

Fig. 4 Rizoma de Guadua



Fuente: [22]

6.1.2.2. Tallo o Culmo

El culmo se refiere a un tallo fistuloso y articulado de las gramíneas, pero también puede ser leñoso para cualquier tipo de planta, constituye (Caña Común, Bambú, etc.). Formado por nudos y entrenudos, los cuales dan rigidez, flexibilidad y resistencia. En este caso el tallo suele ser macizo y solo es sólido en los nudos.

Fig. 5 Culmo de Guadua



Fuente: [23]

6.1.2.3. Ramas

A diferencia del tallo son macizas, en algunos casos se atrofian y son reemplazadas por unas espinas de 10 o 15 centímetros en promedio, sus ramas son muy especiales, crecen casi solitarias sin hojas, las ramas seleccionadas a partir de la tercera en altura y de la mitad de la rama se pueden utilizar también en la reproducción de la especie [24]

6.1.2.4. Hojas Caulinares

Son hojas que salen directamente del tallo cubren al rizoma y este sirve de función protectora, se reconocen por tener una forma triangular, siendo estos de color marrón, y protegiendo las yemas originadas en las ramas basales.

La presencia de pubescencia aparece a medida que el ápice del rizoma comienza a emerger del suelo. Además de proteger se utilizan para la fabricación de objetos artesanales y como elemento decorativo [22]

Fig. 6 Hojas Caulinares



Fuente: [25]

6.1.2.5. Hojas de Follaje

Son de color verde, tienen una punta similar a una lanza y son de textura lisa. Los Bambúes tiran hojas poco a poco, a lo largo del año.

Fig. 7 Hojas follaje



Fuente: [26]

Copa: Es la parte apical de la guadua, con una longitud entre 1.20 a 2.0m.

Varillón: Esta sección posee un diámetro pequeño y la longitud es de unos 3.0m aproximadamente.

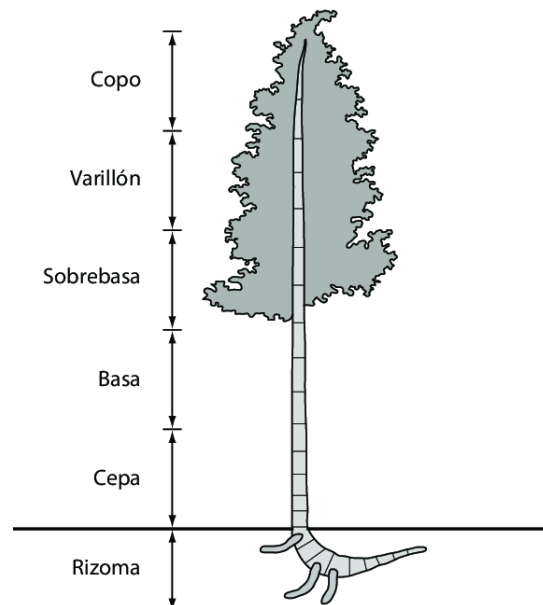
Sobre basa: El diámetro es menor y la distancia entre nudos es un poco mayor comparado con la basa, la longitud es de aproximadamente 4.0m.

Basa: El diámetro es intermedio y la distancia entre nudos es mayor que en la cepa; es la parte del culmo de la guadua que más se utiliza; tiene una longitud aproximada de 11m.

Cepa: Es la parte del culmo con mayor diámetro y espesores de pared mayores; Posee una longitud de 4m. Las distancias de cañutos son las más cortas y en la construcción se les utiliza como columnas.

Rizoma: Es un tallo subterráneo, que conforma el soporte de la planta. Es el lugar por donde la guadua absorbe los nutrientes. [27]

Fig. 8 Partes de la Guadua



Fuente: [28]

6.1.2.6. Propiedades de la guadua

La Guadua en Colombia se destaca por su extraordinaria firmeza a compresión y su buena resistencia al corte paralelo, esto sin contar su gran flexibilidad, lo anterior convierte a la guadua en uno de los instrumentos más interesantes para la bioconstrucción, donde ha sido catalogada como un material estructural sismo-resistente.

Las propiedades de la guadua se presentan dependiendo de la condición del ambiente como son el suelo y el clima que afectan la tasa de crecimiento, la estructura, la forma y la resistencia. Uno de los problemas actuales sobre las características físico-mecánica de la guadua es que, en el expediente de las investigaciones hechas en los últimos años, no se encuentra homologada; se pueden exponer los resultados advirtiendo que éstos no pertenecen a los límites sino a los de diseño [29]:

- **Compresión.** Sigma: 18 N/mm², Lamda: 0, Módulo de Elasticidad: 18.400N/mm²
- **Tensión.** Sigma: 4 18 N/mm², Módulo de Elasticidad: 19.000 N/mm²
- **Flexión:** Sigma 18 N/mm², Módulo de Elasticidad: 17.900 N/mm²
- **Cortante:** Tau - sin cemento en el cañuto - 1.1 N/mm²
- **Peso Específico:** 790 Kg/M³

6.1.2.7. Propiedades Físicas

La Guadua es considerada como un material liviano, económico y de fácil desarrollo en numerosas regiones de la geografía colombiana, es caracterizada por sus culmos que son formados por cascaras cilíndricas, esbeltas y huecas. Para desarrollar un cultivo de este espécimen, uno de los factores más importantes a considerar es la textura del suelo, es por esto que se recomienda realizar plantaciones en suelos de condiciones de textura apropiada para el desarrollo del rizoma.

Fig. 9 Sección transversal de culmo de Guadua



Fuente: [30]

6.1.2.8. Propiedades Mecánicas

La Guadua es un material natural y es por ello que existen una infinidad de factores que afectan su desempeño mecánico, de acuerdo a lo anterior, a esta especie vegetal se le realizan pruebas de su comportamiento bajo la acción de fuerzas externas, esfuerzos máximos y módulos de elasticidad, pese a que sus propiedades pueden variar según sus dimensiones, expansión térmica y cambio del volumen a causa de la humedad, por lo tanto la guadua está relacionada con su estructura y la densidad de las fibras que la conforman.

Aunque todavía no existe ningún código, ya se hicieron varios ensayos que nos permiten conocer las propiedades mecánicas de la guadua, como fuerzas de rotura, deformaciones en el límite proporcional y recomendaciones para fuerzas admisibles. Los diferentes resultados están variando en sus especificaciones y en sus valores, pero ya se puede concluir un promedio de resistencias mínimas de todas las investigaciones. A dichos valores todavía hay que aplicar factores de seguridad para conocer las fuerzas admisibles. La tabla 1 nos muestra los valores promedio en comparación con los que comúnmente se trabaja.

Tabla 1. Comparación de propiedades Bambú vs otros materiales

EL BAMBU EN COMPARACIÓN					
Material	Resistencia de diseño (R) (Kg/cm²)	Masa por volumen (M) (Kg/cm²)	Relación de resistencia (R/M) (Kg/cm²)	Módulo de elasticidad (E) (Kg/cm²)	Relación de rigidez (E/M) (Kg/cm²)
Concreto	82	2400	0.032	127400	53
Acero	1630	7800	0.209	214000	274
Madera	76	600	0.127	112000	187
Bambu	102	600	0.170	203000	340

Fuente: [23]

La esbeltez y el radio de giro favorable que presenta el bambú es debido a su forma tubular, el bambú resiste mucho más que la madera y en la relación entre fuerza máxima y peso, el bambú presenta un valor que se aproxima al del acero.

Revisando los valores de resistencia, claramente se observa que el bambú tiene propiedades mecánicas muy altas con relación a la madera y aún con el hormigón. Esto le da una potencial resistencia estructural que poco se explota en el mundo, excepto por algunos países que tienen larga tradición en su uso como son la India, China y Malasia, y apenas ha sido implementada hace unos pocos años en el continente americano en Costa Rica y Colombia.

Se puede concluir que el bambú es muy apto para las estructuras livianas y espaciales en donde aparecen fuerzas axiales. Para demostrarlo en la tabla 2 nos muestra sus propiedades mecánicas en condición seca.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del Bambusa Blumeana en condición seca

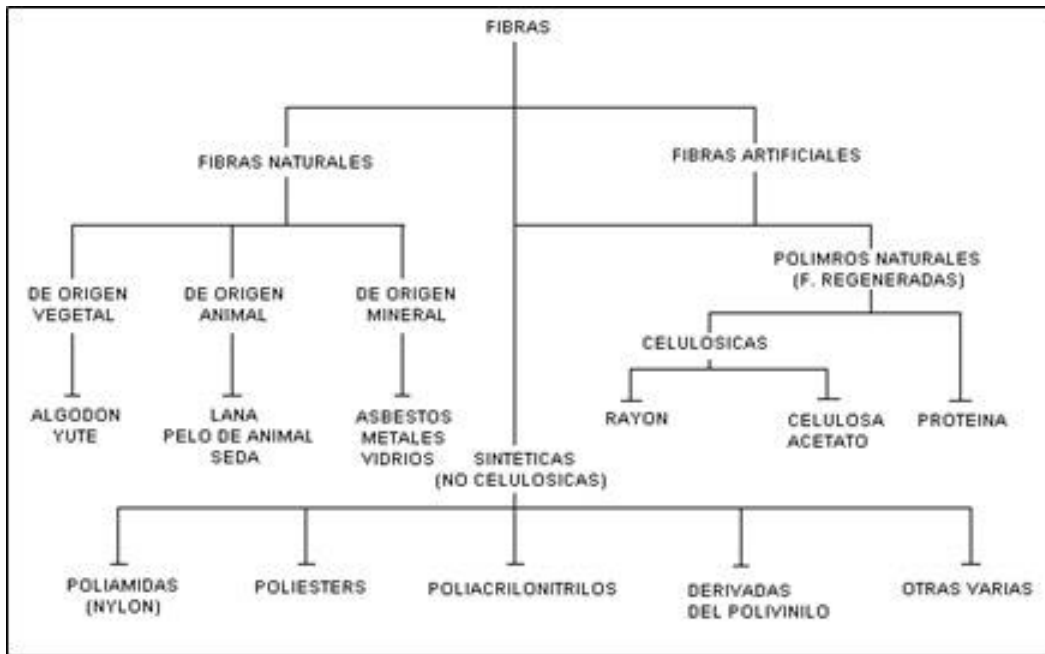
Resistencia a compresión (Kg/cm²)	885
Resistencia a flexión (Kg/cm²)	856
Módulo de elasticidad (Kg/cm²)	203873
Resistencia a cortante paralelo a la fibra (Kg/cm²)	23
Resistencia a tensión (Kg/cm²)	2038-3058

Fuente: [31]

6.1.3. Fibras

Las fibras se han utilizado en la actualidad en diversos productos estructurales y de refuerzo, ya que es amigable con el medio ambiente, y además cuenta con excelentes propiedades mecánicas, por lo anterior, el uso de fibras en materiales compuestos trae consigo múltiples ventajas ambientales que la ha llevado a ser implementada en numerosos proyectos de ingeniería.

Fig. 10 Clasificación de las fibras

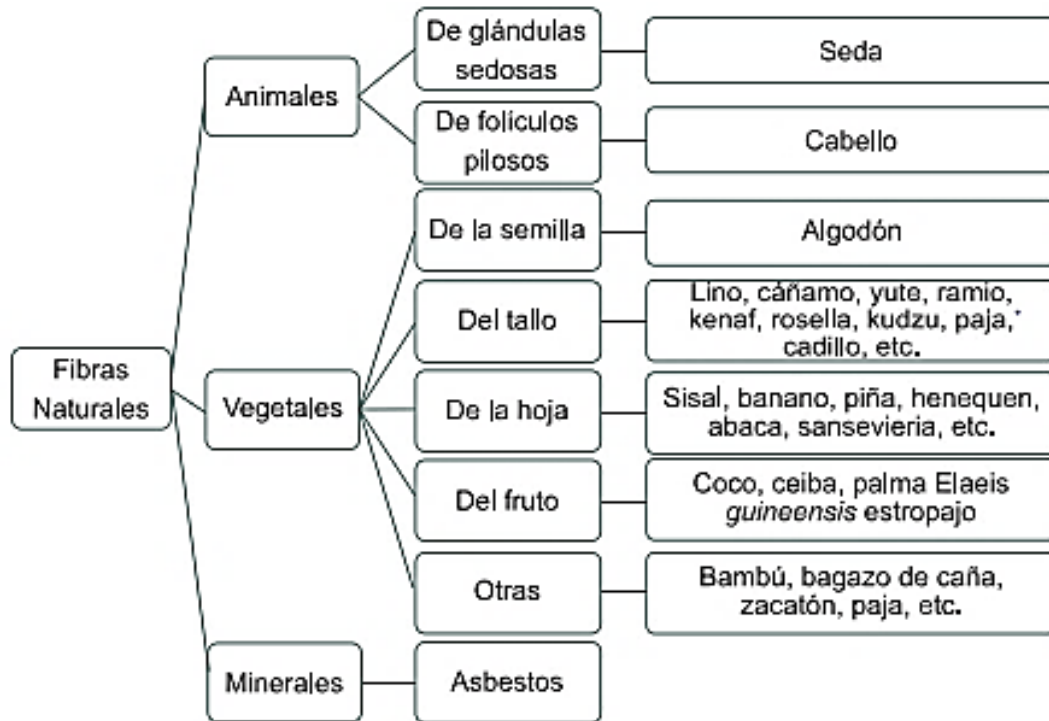


Fuente: [32]

6.1.3.1. Fibras Naturales

Constituyen el tejido esclerenquimatoso y se localizan alrededor de los haces vasculares o forman bandas aisladas en algunas especies; contribuyen con el 40 – 50 % del total del tejido del culmo y con el 60 – 70 % de su peso. En el sentido vertical la cantidad de fibra aumenta de la base hacia la punta mientras que la cantidad de tejido de parénquima disminuye (Londoño, 2002). Las fibras naturales se clasifican según su origen vegetal, animal o mineral. A su vez, las fibras de origen vegetal se clasifican de acuerdo con la parte de la planta de la que se extraen [33], ver Fuente:

Fig. 11 Clasificación de las fibras según su origen



Fuente: [33]

La celulosa es el mecanismo estructural más importante en la mayoría de las fibras naturales de origen vegetal, presentándose en forma de microfibrillas cristalinas alineadas a lo largo de la longitud de la fibra el contenido de celulosa, lignina pectina y hemicelulosa en las fibras vegetales intervienen en sus propiedades, siendo una práctica común eliminar la lignina y la pectina para mejorar el efecto reforzante de las fibras naturales [33].

6.1.3.2. Fibras Sintéticas

Las fibras sintéticas son un tipo de fibras textil que se obtiene de diferentes productos derivados del petróleo como el poliéster, el nylon o spandex; las fibras son enteramente química tanto en la elaboración de la materia prima como la fabricación de la hebra o filamento, son producto del hombre. Por lo anterior estos textiles son caracterizan por ser económicos, versátiles, durables, resistentes y de fácil cuidado, lo cual brinda una mayor libertad a la hora de confeccionar.

6.1.3.3. Fibras Artificiales

Las fibras artificiales, también llamadas fibras semi-sintéticas, se podrían definir como fibras textiles manufacturadas obtenidas generalmente de la pulpa de la madera de proteína animal o vegetal las cuales son sometidos a procesos físicos químicos; estas fibras surgen con la necesidad de obtener filamentos largos y resistentes para tejer materiales textiles de calidad.

6.1.3.4. Obtención de la fibra de Guadua

La fabricación de pulpa kraft también se denomina fabricación de pulpa kraft o fabricación de pasta kraft y se utiliza para producir pulpa de celulosa o pulpa. Su nombre se deriva del papel kraft alemán, que significa "fuerza". Fue desarrollado por el sueco Carl Dahl en 1884 y actualmente se utiliza para fabricar el 80% del papel del mundo [34]

El proceso implica el uso de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S) para extraer la lignina de las fibras de madera utilizando un recipiente de presión grande llamado digestor. El líquido separado llamado licor negro se concentra por evaporación y se quema en una caldera de recuperación para producir vapor a alta presión, que se puede utilizar para la demanda de vapor o la producción de energía en las fábricas. La parte inorgánica del licor negro se utiliza para regenerar NaOH y Na₂S para su reutilización en la pulpa [34]

La mezcla de reactivos de NaOH + Na₂S + H₂O se denomina licor blanco y debe suministrarse con precisión. El álcali efectivo (EA) se refiere a la concentración de componentes alcalinos en la solución, expresada como equivalente de Na₂S, dada por [35]

$$EA = NaOH + 12Na_2S$$

El grado de sulfuración (S) es la concentración de 2S en una solución alcalina, expresada como equivalente de Na₂O y calculada como [35]

$$S = Na_2S / (NaOH + 12Na_2S)$$

El modelo de agua (HM) representa la cantidad de agua en la digestión, incluida la cantidad de agua contenida en los copos de melón y la solución alcalina, dada por [35]

6.1.3.5 Caracterización de las Fibras de Guadua

Dado que los haces de fibras que constituyen la guadua (en lo sucesivo denominadas fibras) están orientados axialmente, las fibras de guadua tienen una alta resistencia a la tracción paralela a las fibras. Debido a que la superficie exterior es dura y tiene más fibras, la resistencia a la tracción de la muestra obtenida de la pared exterior es mayor que la resistencia a la tracción de toda la pared. Por otro lado, la resistencia a la tracción del espécimen anudado es menor que la del espécimen no anudado, porque el nudo es una parte débil del melón debido a la orientación de ciertos haces vasculares. Carvajal y colaboradores encontraron los valores medios de las resistencias a tracción de 165MPa, 156MPa y 87MPa de muestras extraídas de la pared exterior con nudos, la pared completa sin nudos y la pared completa con nudos [36]

La resistencia a la compresión paralela a la fibra en la columna corta es menor que la resistencia a la tracción (al menos un 25%). Incluso en el último caso, se debe considerar la muestra anudada de pared completa., que el esfuerzo compresivo máximo es paralelo a la fibra de 66MPa, la humedad es del 12% y la edad está entre los 3-5 años [37], mientras en otro ensayo se encontró un valor de 34 MPa [38] por otra parte el valor de resistencia promedio de 50 MPa, teniendo un mínimo de 38 MPa y un máximo de 62 MPa. [39] encontró una resistencia promedio de 56 MPa.

La menor resistencia a la compresión paralela a la fibra se debe al hecho de que el núcleo está compuesto por fuertes fibras longitudinales, pero es diferente de la madera. No tiene fibras radiales que conecten fibras longitudinales, que están en una matriz relativamente débil y blanda, lo que hace que la resistencia a la tracción perpendicular a las fibras de melón sea muy pequeña. Cuando se aplica una fuerza vertical, habrá una fuerza radial horizontal hacia afuera que separa las fibras porque no hay un mecanismo lo suficientemente fuerte para mantener las fibras juntas. Los tabiques ayudan hasta cierto punto, pero debido a su poca resistencia a la tensión de tracción en su plano, simplemente se romperán, debido a la separación de las fibras longitudinales y al fallo de compresión paralelo a las fibras.

Dado que tiene fibras solo en la dirección longitudinal, la resistencia al cizallamiento paralelo a las fibras y la tensión perpendicular a las fibras es muy baja. Para Guadua angustifolia. En otro estudio, obtuvieron el valor de resistencia promedio de 7 MPa en una prueba de corte paralela a la fibra [39] encontró que la resistencia a la tracción vertical promedio fue de 0,74 MPa.

Aunado a lo anterior, son varios los autores de investigaciones científicas que también han estudiado las características mecánicas de la fibra de guadua, en este sentido refieren que los valores de resistencia a la tensión y módulo de elasticidad presentan variaciones en función de varios aspectos como proceso utilizado para la extracción de la fibra, edad, posición en el culmo, como se muestra en la tabla 3 y tabla 4.

Tabla 3 Valores promedio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *G. angustifolia* en función de la posición en el culmo y la edad

		Tercio del culmo	Valor promedio resistencia a la tensión (Mpa)	Valor promedio módulo de elasticidad (Gpa)	Valor promedio porcentaje de elongación
Rango de edad	G. joven	Fibras exteriores	534	27,05	2,0
		Fibras intermedias	769	27,44	2,8
		Fibras internas	661	26,24	2,5
	G. madura	Fibras exteriores	578	29,20	2,0
		Fibras intermedias	706	25,67	2,7
		Fibras internas	708	25,61	2,8
	G. sobremadura	Fibras exteriores	512	25,08	2,1
		Fibras intermedias	665	26,77	2,4
		Fibras internas	652	26,40	2,5

Fuente: [40]

Tabla 4. Diferentes resultados de ensayos. Esfuerzo y Modulo elástico

σ (MPa)	E (GPa)
370.1 - 644.8	27
441	35.9
600	46
341 - 503	19.67 - 35.91
512 - 769	25.08 - 29.20
50 - 220	1.5 - 8

Fuente: [28]

6.1.3.6 Estudios y Aplicaciones de la Fibra de Guadua

Entre los diferentes estudios que han dado información sobre la utilización de la Guadua se presenta el estudio realizado por Cuéllar y Muñoz en el 2010 denominado Fibra de Guadua como Refuerzo de Matrices Poliméricas [42], donde se estudió el efecto que tiene la fibra de Guadua *angustifolia* Kunth con y sin tratamiento químico, empleando hidróxido de sodio al 5 y 10%, sobre las propiedades mecánicas de una matriz polimérica reforzada con 10 y 20% de fibra en peso. Entre las propiedades mecánicas evaluadas, se incluyen pruebas de compresión, flexión e impacto, dando como resultado un aumento en la resistencia mecánica en los ensayos de compresión e impacto, en las muestras con presencia de 10% de fibra modificada con una solución de hidróxido de sodio al 5%, respecto a la resina sin refuerzo.

Para el trabajo en laboratorio, en cuanto a la fabricación de las muestras, fue empleada *Guadua angustifolia* Kunth, entre tres y cinco años de edad provenientes del municipio de Chinchiná (Caldas). Las guaduas fueron cortadas y dejadas en campo durante 15 días para que ocurriera el proceso de inmunizado natural. La composición química fue analizada de acuerdo con las Normas Técnicas Colombianas, en el laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Por otra parte, Ramírez y Triana en el 2017 desarrollaron un estudio intitulado, Caracterización de un Material Compuesto Matriz Termoestable Reforzado Con Fibra De Guadua [43], donde se mostraron las diferentes pruebas realizadas a un material compuesto con matriz de resina de poliéster y reforzado con fibras de guadua. Se le realizaron diferentes procesamientos para la eliminación de la lignina, con el fin de verificar la influencia en el comportamiento del material y se obtuvieron allí diferentes resultados en sus propiedades cualitativas y cuantitativas donde se utilizaron métodos y ensayos como el de Van Soest, pruebas de tensión y análisis SEM. El material compuesto se fabricó por medio de un proceso a molde abierto y utilizando diferentes porcentajes de fibra al 10%, 15% y 20 % de guadua en el polímero.

En la sección de deslignificación, se realizaron pruebas a la guadua tratada con distintos métodos para disminuir su porcentaje de lignina, se identificó que el método menos nocivo es la mezcla del ácido acético y clorito de sodio con el cual se puede mejorar o mantener las propiedades de la guadua para su post procesamiento e inclusión en el compuesto. Se trabajó la guadua en tiras longitudinales cepilladas para facilitar su manipulación. Después de realizados los procesos de deslignificación se siguió con una molienda de estas tiras y un tamizaje seleccionando un tamaño adecuado con el que se creó el material compuesto; Adicionalmente, se realizó un estudio de análisis de la fibra, por medio de un microscopio de barrido (SEM) donde se encontró que el proceso de clorito de sodio y ácido acético es el que produce una mejor adhesión matriz fibra.

Por otra parte, en cuanto al área de construcción, Espitia, Sjogreen, Rodríguez, Calderón, Benavides, Espitia, y Nemocon en el 2018 [44] abordaron la Caracterización Física y mecánica de fibras de *Guadua angustifolia* 'Kunth' provenientes de Colombia, esto debido a que las Fibras de origen natural se han implementado como material de refuerzo en distintas áreas; por ello la importancia de conocer sus propiedades. En este trabajo se muestran los resultados de la caracterización física, química y mecánica de fibras naturales de guadua; para lograrlo, se emplearon técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) y ensayos de absorción de humedad, densidad aparente y tensión en las fibras. Esto con el fin de analizar el comportamiento en general de las fibras de guadua, para determinar su viabilidad como refuerzo en materiales compuestos para la construcción. A partir de la caracterización se determinó que la guadua tiene una excelente resistencia a tensión, que puede ser utilizada como refuerzo en matrices poliméricas debido a su rugosidad; es decir, tiene adherencia, es liviana y presenta una excelente absorción en comparación con otras fibras.

En este sentido se presenta la investigación desarrollada por Quintero en el 2018 [45] titulada, Desarrollo y Evaluación De Un Material Compuesto Elaborado a Partir De Polipropileno y Fibras Cortas de Bambú Mediante la Técnica de Moldeo Por Compresión en Caliente, donde se destacó que los materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas como la fibra de vidrio poseen, frente a otras fibras, importantes desventajas tales como la contaminación ambiental, su no biodegradabilidad y el alto costo, entre otras. Recientemente, los investigadores han despertado el interés por el desarrollo de nuevos materiales compuestos elaborados a partir de los recursos naturales disponibles en cada región, y han planteado el uso de fibras naturales como una alternativa para reemplazar los reforzantes sintéticos utilizados actualmente. Esta propuesta de investigación comprendió el estudio del efecto que producen las variables de proceso, específicamente la concentración de fibra de bambú y de agente de acople (Anhídrido Maleico injertado en Polipropileno - MAPP) en el comportamiento mecánico y térmico de un material compuesto desarrollado mediante la técnica de moldeo por compresión en caliente a partir de una matriz de polipropileno y fibras cortas de bambú de la especie "Guadua Angustifolia Kunth -(GAK)". Se utilizó un diseño de experimentos factorial 3k teniendo como factores controlables la concentración de la fibra de GAK y la concentración de MAPP y, como variable de respuesta el "módulo de elasticidad" del material compuesto. De lo anterior, se determinó el nivel más adecuado de estas variables para obtener el mejor composite natural. Asimismo, a dicho material se le realizó una completa caracterización mecánica y térmica, con el fin de explorar su posible aplicación en el sector automotriz. Vale la pena indicar que mediante una investigación preliminares definieron los niveles más adecuados para los siguientes parámetros de proceso: temperatura, presión y/o tiempo en los procesos de extrusión y moldeo por compresión en caliente a partir de la información recomendada en la literatura científica y mediante pruebas de ensayo y error.

La investigación se desarrolló en dos etapas. En la primera, se obtuvieron los materiales compuestos poliméricos mediante los procesos de extrusión, pelletización y moldeo por compresión en caliente; y en la segunda etapa, se hizo la caracterización mecánica y térmica de los materiales compuestos obtenidos con el respectivo análisis de resultados. Los resultados del análisis estadístico ANOVA, permitieron determinar que el mejor material compuesto obtenido de acuerdo con las diferentes configuraciones empleadas en el diseño de experimentos fue el desarrollado con 50% de fibra y 4% de agente de acople, alcanzando en la variable de respuesta "módulo de elasticidad" un incremento del 322% (2.91 GPa) con respecto a la matriz (0.69 GPa). Lo anterior, fue confrontado **con los ensayos mecánicos adicionales realizados (flexión, dureza e impacto), en donde se concluyó el mismo resultado. Mientras que, las propiedades térmicas de estos materiales no tuvieron cambios importantes comparados con el polipropileno virgen.

6.1.4. Resinas Poliméricas

En la actualidad se utilizan diferentes tipos de resinas, en donde se encuentran como las más comunes las resinas poliéster, Viniléster, Fenólica y Epóxica las cuales se presentan a continuación:

6.1.4.1. Resinas Poliéster

La resina poliéster es la de uso común, las cuales son líquidas a temperatura ambiente y pueden ser llevadas a estado sólido, en el caso de las resinas pre-aceleradas, por la adición de un catalizador; y para resinas no pre-aceleradas un acelerador y catalizador. [41]

Desde su descubrimiento, en 1936 las resinas de poliéster han ganado terreno hasta ser en la actualidad el 75% de las resinas utilizadas en el mercado de los materiales compuestos de matriz polimérica. Son producidas a través de reacciones de reacciones de policondensación entre dos monómeros, diol + ácido dicarboxílico. Las resinas de poliéster presentan una baja temperatura de transición vítrea, y su resistencia y rigidez no son altas, el principal inconveniente se debe a que estas tienden a contraerse en hasta un 7% durante el endurecimiento, sin embargo, se encuentra entre los sistemas de matriz más económicos. Para producir la polimerización de la resina, se le debe añadir un sistema catalítico o de curado. [3]

6.1.4.2. Resinas Viniléster

Las resinas viniléster se encuentra en la mitad entre las poliméricas y las epóxicas, ya que reúne las mejores propiedades de la resina epoxi con un curado más rápido, gozando mejores propiedades mecánicas que las del poliéster, además de tener una excelente resistencia a la corrosión. Son producidas a partir de una reacción entre una resina epóxi y un ácido acrílico, su buena resistencia química es debida a los pocos grupos de ésteres susceptibles de ser atacados que contiene su cadena. [3]

Esta resina es característica gracias a su excelente resistencia a la fatiga, buena impregnación de los esfuerzos, buena resistencia al fuego, buena adhesión sobre las fibras de refuerzo y curado rápido, las prestaciones óptimas se alcanzan cuando los laminados son postcurados en altas temperaturas, son muy empleadas en la construcción de moldes composites. [42]

6.1.4.3. Resinas Fenólicas

Son los sistemas de resina más antiguos, tienen excelentes propiedades de resistencia al fuego, alta estabilidad térmica, buena resistencia química y una baja absorción de humedad, son fabricadas mediante una reacción de condensación entre fenol y el formaldehído en la que se genera agua como producto residual. Se

presentan en forma de polvos de moldeo, resinas líquidas y resinas de resolución, es posible moldearlas en alta, media y baja presión. [3]

Las resinas fenólicas tienen una amplia aplicación en el ámbito de la construcción, ya que son empleadas en la fabricación de productos moldurados, adhesivos, revestimientos superficiales, paneles, entre otros. Según su aplicación las resinas fenólicas pueden clasificarse por: Resinas fenólicas técnicas, resinas fenólicas para maderas y aislantes y resinas fenólicas para polvos de moldeo. [43]

6.1.4.4. Resinas Epóxicas

Las resinas epoxi son productos derivados de la química del petróleo que por sí solos son solubles y fusibles, son capaces de reaccionar con endurecedores o agentes de curado para originar estructuras muy reticuladas, insolubles e infusibles, con excelentes prestaciones mecánicas, de manera que se clasifican dentro de los polímeros termorrígidos. Alrededor del 80% de las resinas que se utilizan en el mercado llegan a ser derivados de la reacción de bisfenol A y la epíclorhidrina, siendo a la unión de estos dos componentes el origen de resinas primarias lineales con grupos hidroxilo y epoxi que permiten la reticulación posterior mediante agentes químicos adecuados. [44]

Poseen las mejores características mecánicas y de mayor resistencia térmica, su estabilidad dimensional es otro punto fuerte, ya que se traduce en una ausencia de contracción durante el proceso de curado. Las resinas epoxi se usan tanto en la construcción de moldes como de piezas maestras, laminados, extrusiones y otras ayudas a la producción industrial. Los resultados son más económicos, resistentes y rápidos de producir que los hechos de madera, metal, etc. Los compuestos de fibras y epoxi, aunque son más caros que los de resinas de poliéster o de éster de vinilo, producen piezas más resistentes. [45]

6.1.5. Materiales Compuestos

Un material compuesto es un sistema conformado por dos o más materiales individuales, los materiales individuales que conforman el compuesto tienen propiedades físico-mecánicas totalmente independientes, pero que a su vez se conectan para tomar las mejores de cada uno en pro del producto. En un compuesto, se encuentra una fase discontinua encargada de garantizar la resistencia a la tensión del compuesto, denominada refuerzo; y una fase continua encargada de aportar la rigidez que se requiere para el producto en servicio, denominada matriz. [46]

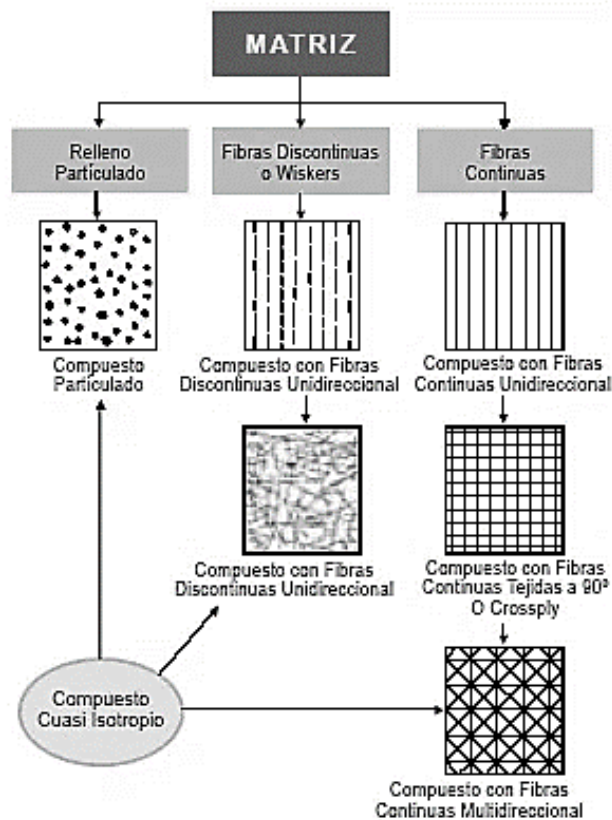
Los materiales compuestos se identifican en dos fases principales que se clasifican en función de la matriz o en función del tipo de refuerzo utilizado para su elaboración, pueden ser de matriz metálica, cerámica o de carbón, o de refuerzos discontinuos

(partículas, plaquetas o fibras cortas) y de esfuerzos continuos (fibras largas, tejidos o laminados). [47]

La matriz es la fase continua y menos rígida que constituye los materiales compuestos, como se observa en la Fuente:

pueden tener como matriz un relleno articulado, fibras discontinuas o fibras continuas.

Fig. 12 Clasificación de los materiales compuestos por fibras

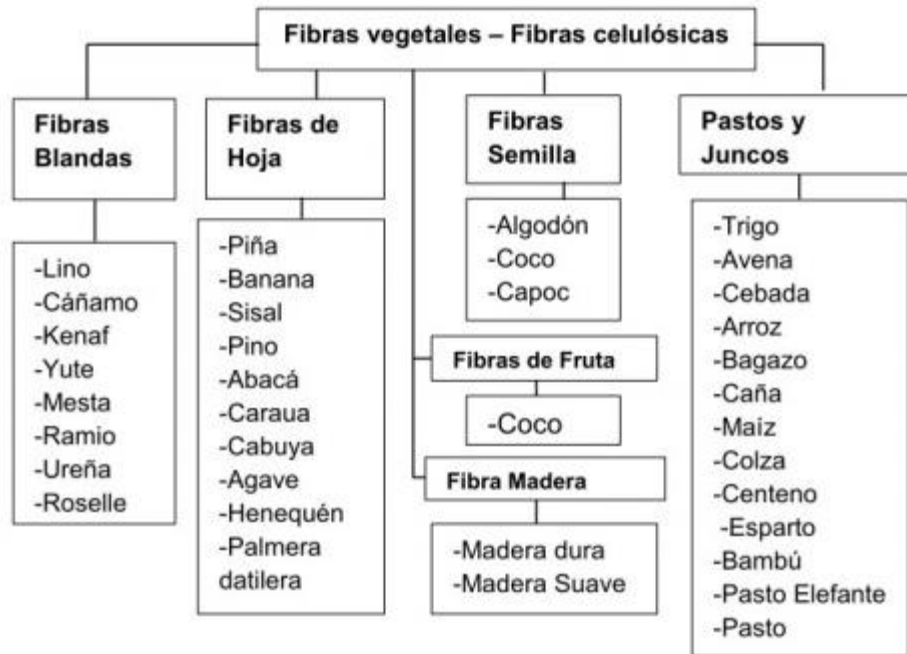


Fuente: [46]

6.1.5.1. Materiales Compuestos

Son materiales compuestos por al menos una de sus partes (matriz o refuerzo) de origen natural u orgánico. Las propiedades del compuesto dependen de los elementos por los que está formado y de la compatibilidad que tengan entre ellos, por lo anterior, los materiales compuestos de fibras naturales se dividen en dos grupos, el primero está conformado por fibras naturales unidas con materiales aglutinantes inorgánicos y el segundo por el uso de fibras naturales como refuerzo en matrices poliméricas como termoplásticos, termoestables, cauchos, etc.

Fig. 13 Principales fibras vegetales utilizadas en materiales compuestos



Fuente: [48]

6.1.5.2. Análisis Mecánico de Materiales

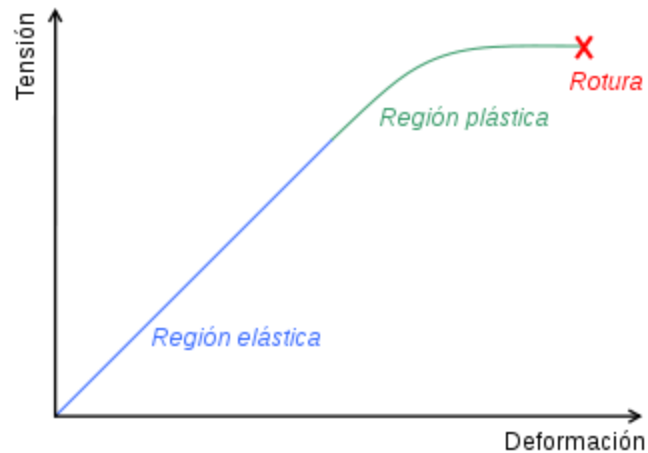
La norma ASTM D3039 consiste en la determinación de las propiedades de tracción de los materiales compuestos, esta norma aplica solamente para aquellos materiales que están formados por una matriz polimétrica reforzada por fibras de alto módulo. Al realizar este ensayo se obtienen los valores de la resistencia a la tracción, máxima tensión de tracción, módulo de elasticidad, relación de Poisson y tensión de transición, estos valores deben ir siempre en el mismo sistema de unidades, ya que la mezcla de dos sistemas puede provocar una disconformidad.

La probeta debe colocarse en las mordazas de la Máquina Universal de Ensayos tirando paralelamente al esfuerzo hasta lograr la falla, la velocidad de la prueba puede determinarse por la especificación del material y el tiempo hasta la falla siendo de 1 a 10 minutos. Una velocidad de prueba típica para probetas estándares es de 2 mm/min, para determinar la elongación y el módulo de tracción se utiliza un extensómetro o medidor de tensión. Las dimensiones de la muestra más común para materiales compuestos según la norma ASTM 3039 es de 250mm de largo x 250mm de ancho x 2,5mm de espesor. [49]

Por otro lado, para el ensayo de flexión se debe tener en cuenta la norma ISO 14125, la cual describe el proceso para determinar las propiedades de este esfuerzo a tres

o cuatro puntos de materiales compuestos reforzados con fibras. Esta norma permite medir la fuerza y la deformación del material compuesto, sin embargo, los resultados que se pueden obtener como lo son, la deformación máxima en las fibras, resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, en la mayoría de los casos son tomados con fines de control de calidad.

Fig. 14 Diagrama de tensión (esfuerzo) Vs. Deformación



Fuente: [50]

Mediante la gráfica de esfuerzo Vs. Deformación como la de la Fuente:

, se pueden representar el esfuerzo mecánico de todos los materiales, el cual permite determinar las fases por las cuales debe pasar el material antes de la rotura acorde a la carga que se le aplique, dichas fases son representadas por las regiones elástica, plástica y rotura respectivamente.

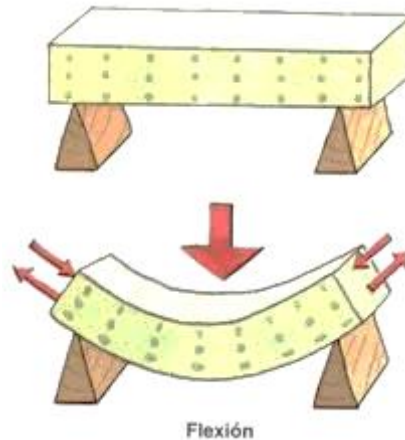
Para determinar las propiedades mecánicas de un material se deben realizar una serie de ensayos que ayuden a determinar la gráfica específica para el material, los cuales se pueden realizar por medio de modelos matemáticos, análisis de imágenes, micromecánica de compuestos o pruebas físicas de esfuerzo a tracción, compresión y flexión, para los cuales se tienen los siguientes ensayos:

6.1.5.2.1. Ensayo de Flexión

Por medio del ensayo de flexión se logra obtener fácilmente las características de propiedades esfuerzo-deformación de un material. El ensayo consiste en someter la parte inferior de la probeta a tracción y la parte superior a compresión, consta de cargar la probeta de forma prolongada o rápida para medir su capacidad resistente ante cargas que se dirigen en dirección a la gravedad. El esfuerzo de flexión puro o simple se obtiene cuando se aplican sobre un elemento fuerzas perpendiculares a su

eje longitudinal para de esta manera provocar giros en la sección transversal con respecto a los inmediatos. [51]

Fig. 15 Ensayo a flexión



Fuente: [52]

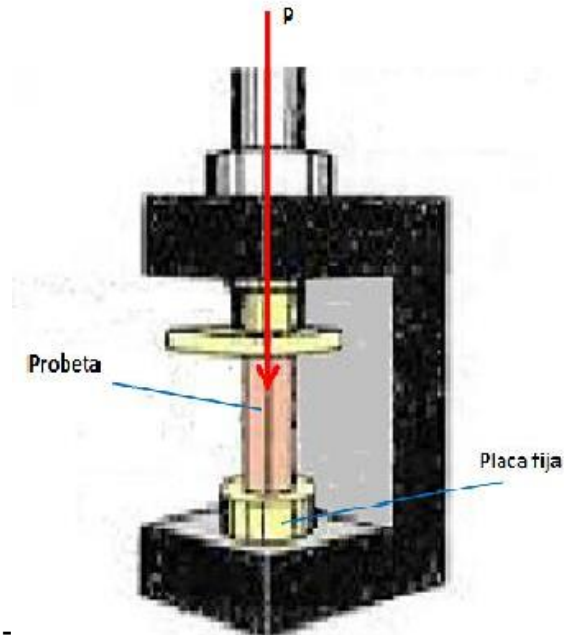
Para determinar una curva esfuerzo-deformación se debe someter el material a un ensayo a flexión y medir la flecha, mientras que para determinar el campo de deformaciones se deben colocar bandas extenso métricas en la probeta. El ensayo se puede realizar aplicando la carga por medio de prensa hidráulica o manual, sin embargo, al aplicar la carga mediante la prensa hidráulica se puede tener una mala precisión en cuanto al nivel de carga que se quiere aplicar, mientras que al aplicar la carga manual se obtiene mayor precisión para niveles de carga comprendidos entre 500 y 1000 N. [53]

6.1.5.2.2. Ensayo de Compresión

Este ensayo permite la caracterización del módulo de compresión y la resistencia a la compresión, requiere de un soporte de pandeo ubicado verticalmente con precisión para situar una carga entre dos placas de compresión en dirección longitudinal. El ensayo se realiza en una máquina de ensayo a tracción que posea una plataforma inferior resistente en la que se ubicará la probeta y una plancha para la compresión de esta como se evidencia en la Fuente:

. [54]

Fig. 16 Ensayo a compresión



Fuente: [55]

Para este ensayo principalmente se busca la determinación de los límites de trabajo en cuestión de fuerza máxima, deformación a rotura e inicio de grieta, estos valores permitirán verificar que los diseños realizados correspondan con los valores empíricos obtenidos en una simulación real. Para que el ensayo se realice de forma precisa, se debe tener una máquina de ensayo que garantice las mediciones y el comportamiento según lo requerido por la norma. [56]

6.1.5.2.3. Ensayo a Tracción Directa

Este ensayo permite determinar las características de resistencia, deformación unitaria de rotura, tenacidad, tensión máxima y módulo de rigidez, es utilizado para la verificación de aceptación o rechazo de un material. Para el caso de materiales compuestos con fibras en un sentido, este ensayo se lleva a cabo ejerciendo la fuerza en dirección paralela a la disposición de las fibras con el fin de determinar la resistencia y deformación de estas. [57]

Fig. 17 Resistencia directa a la tracción



Fuente: [58]

Al soportar la carga aplicada la probeta tiende a deformarse en el sentido de la aplicación de la fuerza, para el caso del ensayo de resistencia a tracción la fuerza se aplica en dirección del eje de la probeta y esto explica su deformación axial. La probeta se alarga en dirección longitudinal a su longitud y se encogerá en el sentido o plano perpendicular. La probeta llevará a un momento en el que empezará a estirarse, disminuyendo su sección y aumentando su longitud, esto se logra hasta que se aplica más carga externa y la probeta se rompe, llegando al punto llamado como momento de rotura. [59]

Teniendo en cuenta el tipo del ensayo a realizar se requieren una serie de accesorios que permitan llevar a cabo los análisis correspondientes, para prueba de tracción se requieren un par de apoyos o mordaza para generar fuerzas en dirección opuesta; para la de compresión, un suplemento elevador y un plato de compresión que genere presión sobre la probeta y, por último; para la de flexión se requiere un presionador que ejerza la carga puntual y dos apoyos, uno en cada extremo. Los resultados que se tienen de estas pruebas son, el módulo de elasticidad, esfuerzo máximo y deformación.

6.1.6. Simulación

La simulación es una imitación aproximada de la operación de un proceso o sistema basado en una técnica de práctica y aprendizaje que se puede aplicar a muchas disciplinas y aprendices diferentes, remplazando y ampliando experiencias reales a otras guiadas que evocan o replican aspectos sustanciales del mundo real de una manera totalmente interactiva, donde los implementos de simulación van desde reproducción de situaciones en papel y lápiz y juegos de mesa hasta complejos sistemas interactivos asistidos por computadora. La tecnología de simulación por computadora se ha desarrollado en estrecha relación tanto con la industria informática como con los procesos de ingeniería, pero también se ha utiliza para estudiar modelos de simulación y el modelado científico de sistemas naturales o humanos para obtener información sobre su funcionamiento. [60].

Actualmente el ordenador se ha convertido en la herramienta fundamental de trabajo para la mayoría de las profesiones, por este motivo, las compañías creadoras de Softwares se enfocan cada vez más en la creación de programas específicos para cubrir necesidades en todos los ámbitos laborales.

6.1.6.1. Tipos de Simulación

6.1.6.1.1. Simulación Discreta

Es la simulación de un sistema que ofrece flexibilidad más allá de la que dan modelos analíticos estocásticos, que por medio de una representación en la cual el estado de las variables cambia instantáneamente en instantes de tiempo. Esta es una herramienta para la evaluación y análisis de desempeño de sistemas complejos donde no se puede establecer con exactitud pero que se puede describir usando modelos de probabilidad y estadística.

6.1.6.1.2. Simulación Continua

Es la simulación de un sistema en la cual las variables de estado cambian en forma continua a través del tiempo, involucrando ecuaciones diferenciales que determinan y describen las interacciones entre los diferentes elementos del sistema. Un ejemplo propio de simulación continua es el estudio de la dinámica de la población mundial.

6.1.6.1.3. Simulación Combinada Discreta-Continua

Es la simulación de un sistema en el cual las variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo y otras llegan a cambiar en instantes de tiempo separado, es una simulación en la cual las variables discreta y continua interactúan. Un ejemplo propio de esta combinación es el estudio del movimiento de un vehículo o la caída del agua de un tanque.

6.1.6.1.4. Simulación Estática y Dinámica

La simulación estática es aquella que representa la relación de un sistema en equilibrio o en estado inmóvil, en cambio la simulación dinámica es aquella que se representa el cambio de un sistema a través del tiempo y muestra su evolución desde

el principio hasta el final. Es decir, que la simulación estática el tiempo no juega un papel importante, en contraste con la dinámica en la cual el tiempo si es importante.

6.1.6.1.5. Simulación Determinística y Estocásticas

La simulación determinística es aquella que no considera ninguna variable importante, únicamente datos que estén de acuerdo con una ley probabilística, en cambio la simulación estocástica es aquella que tiene en cuenta algunos componentes aleatorios de entrada, al utilizar una distribución de probabilidad.

6.1.6.2. Modelos De Simulación

6.1.6.2.1. Modelo Análogo

Es el modelo que representa algo tangible físicamente de un sistema, pero en una escala menor, Un ejemplo propio de modelo análogo sería un mapa, un plano o una maqueta de un edificio a escala.

6.1.6.2.2. Modelo matemático

Es el modelo que se representa a través de ecuaciones matemáticas o relaciones estadísticas, donde se tiene el comportamiento numérico de variables en el que se necesitara desarrollar por un programa informático que corra el modelo. Un ejemplo propio de modelo matemático sería los modelos de regresión o programación lineal.

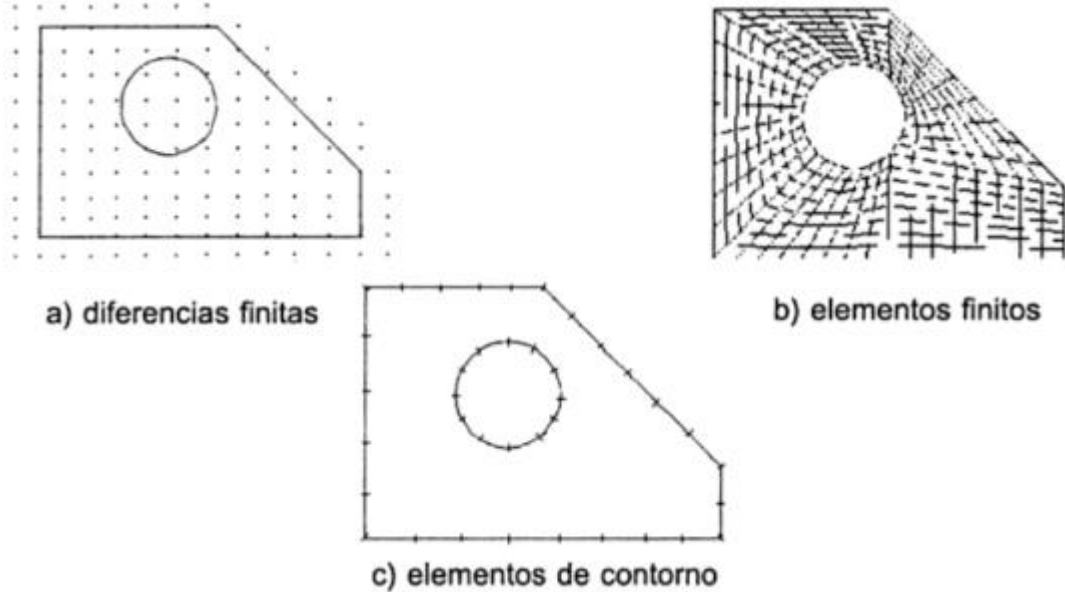
6.1.6.2.3. Modelo computacional

Es el modelo que representa en su mayoría por un modelo matemático en la ciencia de la computación que, a través del uso de programas informáticos, estudian el comportamiento de un sistema complejo por medio de la simulación por computadora. Un ejemplo propio de modelo computacional sería un videojuego o el modelo de simulación de una planta de tratamiento.

6.1.6.3. Método de Análisis Numérico

Los métodos de análisis numérico en Ingeniería y ciencias aplicadas se clasifican en: diferencias finitas, elementos finitos y elementos de contorno.

Fig. 18 Métodos de análisis numérico



Fuente: [61]

Tabla 5. Ventajas y desventajas de los métodos de análisis numéricos.

DIFERENCIAS FINITAS	
Ventajas	Desventajas
Muy simple de utilizar	Requiere de mallas estructuradas
No requiere integración numérica	Difícil representación de las condiciones de contorno
Está muy maduro	No parece que haya nuevas aplicaciones
Genera matrices 'sparse'	Debe modelar el dominio y el contorno
Se usa extensivamente en mecánica de fluidos y problemas de turbulencia	No es adecuado para dominios infinitos
ELEMENTOS FINITOS	
Ventajas	Desventajas

Método de propósito general	Requiere de funcionales o de aplicación de residuos ponderados
Método bien establecido	Requiere de mallas en el dominio
Requiere de integración de funciones simples	No adecuado para problemas infinitos
No requiere de mallas estructuradas	Requiere de refinación de malla
Matrices simétricas y bandeadas	Debe modelar el dominio y el contorno
ELEMENTOS DE CONTORNO	
Ventajas	Desventajas
Modela muy bien las condiciones de contorno	Requiere de integración singular de funciones complejas
Sólo requiere discretizar el contorno	Requiere de soluciones fundamentales
Muy adecuado para problemas infinitos	Genera matrices llenas y no simétricas
Gran precisión en valores del contorno	Todavía en desarrollo

Fuente: [37]

6.1.6.3.1. Métodos numéricos para simulación

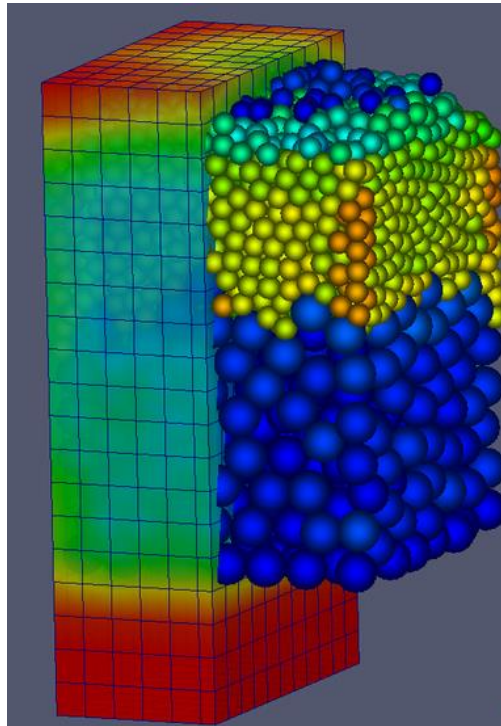
Los métodos numéricos son aplicaciones de algoritmos que permiten la formulación y solución de problemas matemáticos usando operaciones aritméticas menos complejas, este método crea métodos para aprobar de forma eficiente las soluciones de problemas expresados matemáticamente [62], a continuación, se presentan los principales métodos utilizados para simulación.

6.1.6.3.2. Método de los elementos discretos

El método de los elementos discretos (MED) es una técnica numérica utilizado para materiales granulares, simula el comportamiento mecánico de un material desarrollado por un conjunto de partículas las cuales interaccionan entre sí a través de sus puntos de contacto. Este método está relacionado a la dinámica molecular, sin embargo, se diferencia a los otros métodos gracias a su inclusión de grados de

libertad de rotación, contacto entre los elementos discretos y geometrías complejas usadas para su definición.

Fig. 19 Temperatura de partículas en un reactor



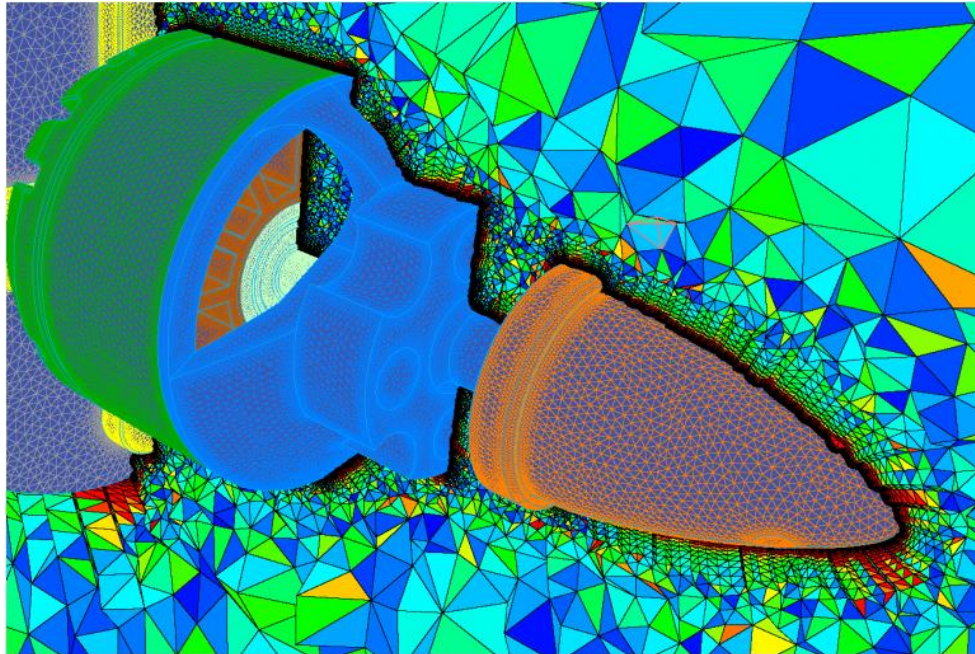
Fuente: [63]

El método de los elementos discretos puede ser representado por un conjunto de partículas rígidas ya sea en 3D o 2D que interactúan entre sí mediante fuerzas normales y tangenciales, lo anterior puede ser visto como ley de contacto para una formulación de un modelo a nivel microscópico. [64]

6.1.6.3.3. Método de los volúmenes finitos

El método de los volúmenes finitos (FVM) es utilizado para la solución de problemas en la mecánica de fluidos, en la práctica demuestra ser el método más eficaz para el cálculo y solución de distintos problemas de fluido, es la idea de observación de Euler, lo que quiere decir que fluye por un volumen de control fijo a través de valores calculados en los nudos y centros de los volúmenes de control, lo cual obtiene una solución que conduce al resto del dominio. [62]

Fig. 20 Malla superficial coloreada por aspecto de la celda



Fuente: [65]

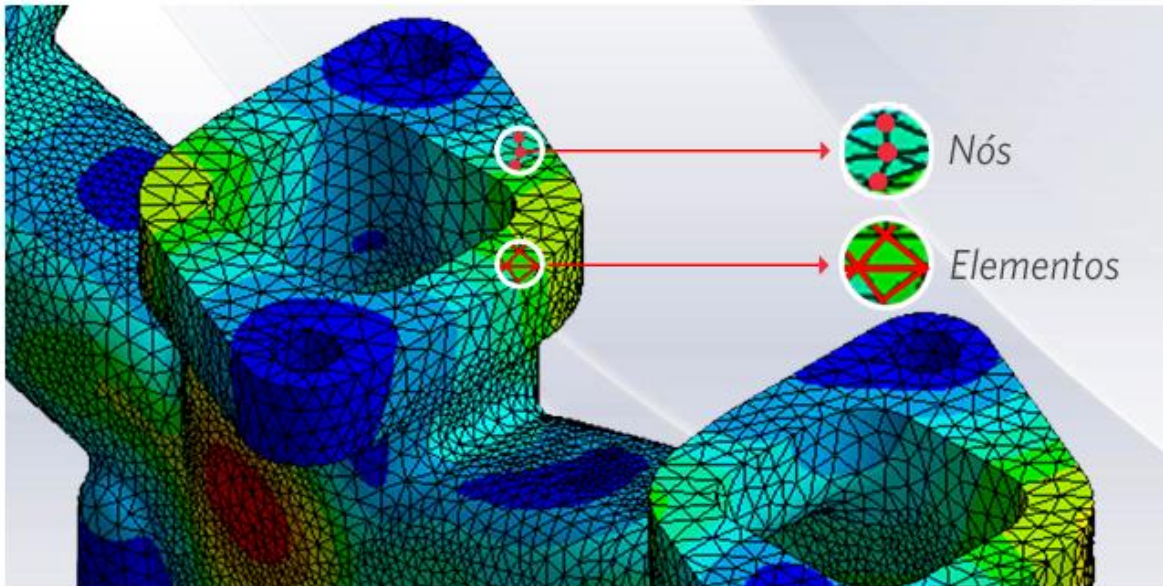
Es un método para representar y evaluar las ecuaciones diferenciales en forma de ecuaciones algebraicas el cual permite descomponer el dominio en volúmenes de control, aproximar numéricamente las integrales, formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control y ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido. [65]

6.1.6.3.4. Método por elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) es utilizado para el análisis de la calidad del material, en el que se produce de forma virtual la geometría de la pieza para ser sometida a cargas y restricciones. El software se encarga de la subdivisión de partes pequeñas las cuales llama elementos, logrando con esta división la solución de problemas complejos con eficiencia, de esta manera es posible reducir tiempos, costos, accesibilidad y equipamiento para un análisis físico. El método propone que un número infinito de variables se cambien por elementos de comportamiento definidos cuyas divisiones pueden tener diferentes formas, ya sea triangular o cuadrangular.

Los elementos finitos están acoplados por puntos a los que se les llaman nodos, al conjunto de nodos y elementos se les denomina malla. La precisión de los métodos de elementos finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y tipo de la malla. Cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos de la malla más precisos serán los resultados del análisis. [10]

Fig. 21 Nodos y elementos de una malla



Fuente: [10]

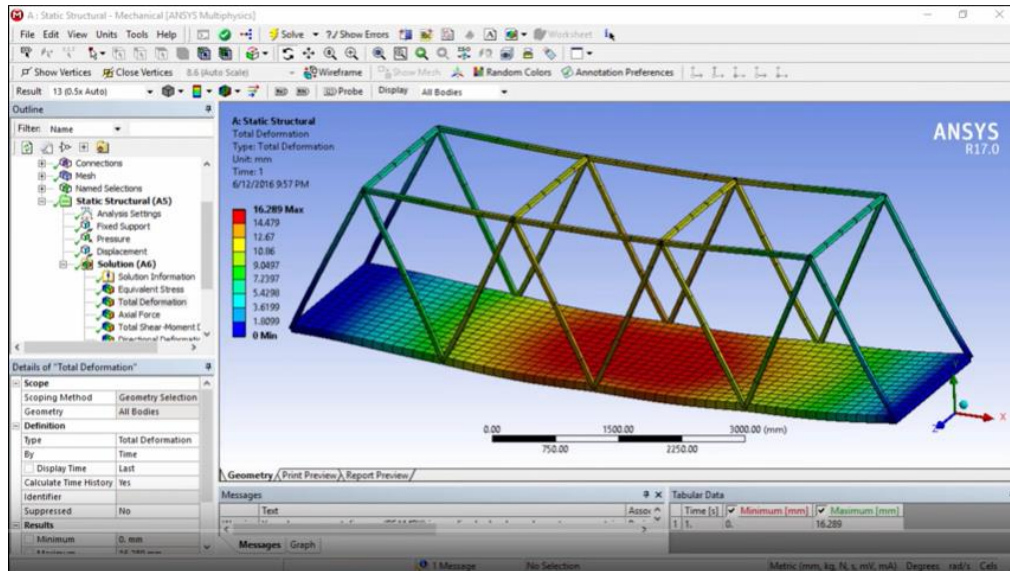
Para la realización de este tipo de análisis se requiere de un Software que de la posibilidad de ejecutar el diseño del producto y a su vez el análisis de propiedades físicas y mecánicas de los elementos. Algunos de los softwares que se pueden emplear son los que se presentan a continuación.

6.1.6.4. Clases de Simuladores

6.1.6.4.1. ANSYS Structural

El software de análisis estructural Ansys permite solucionar problemas complejos de ingeniería estructural y tomar decisiones de diseño mejores y más rápidas. Con los solucionadores de análisis de elementos finitos (FEA) disponibles en la suite, puede personalizar y automatizar soluciones para los diversos problemas de mecánica estructural y parametrizarlos para analizar múltiples contextos de diseño. También se puede vincular fácilmente a otras herramientas de análisis de física para una fidelidad aún mayor. El software de análisis estructural Ansys se utiliza en todas las industrias para ayudar a los ingenieros a optimizar sus diseños de productos y reducir los costos de las pruebas físicas. [66].

Fig. 22 Simulación a través del Software ANSYS

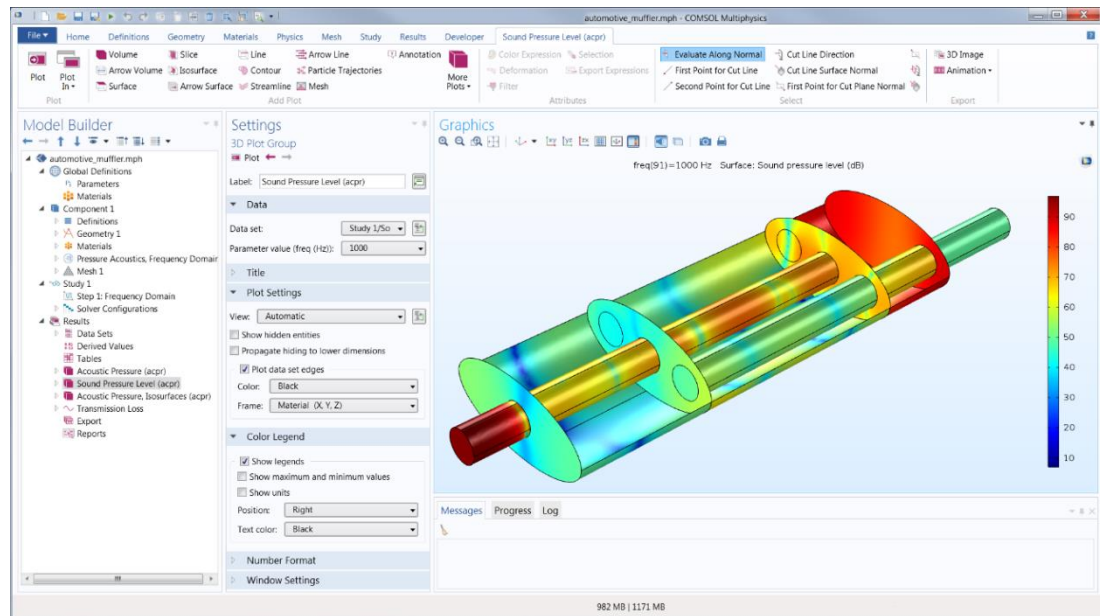


Fuente: [67]

6.1.6.4.2. COMSOL Multiphysics

El Software Comsol permite la resolución y el análisis por elementos finitos y a su vez a la simulación de fenómenos físicos 3D en Ingeniería. También accede a la definición de la Geometría 3D especificando el mesh o malleado, tiene interfaces con diferentes programas CAD, teniendo también una serie de módulos por aplicación y solvers específicos que se pueden agregar, tales como: COMSOL AC / DC MODULE, COMSOL MEMS MODULE, COMSOL RF MODULE, COMSOL OPTIMIZATION LAB, COMSOL ACOUSTICS MODULE, COMSOL HEAT TRANSFER MODULE, COMSOL STRUCTURAL MECHANICS MODULE, COMSOL CAD IMPORT MODULE, COMSOL CHEMICAL ENGINEERING MODULE, COMSOL REACTION ENGINEERING LAB, COMSOL EARTH SCIENCE MODULE y COMSOL MATERIAL LIBRARY. [68]

Fig. 23 Simulación a través del Software COMSOL

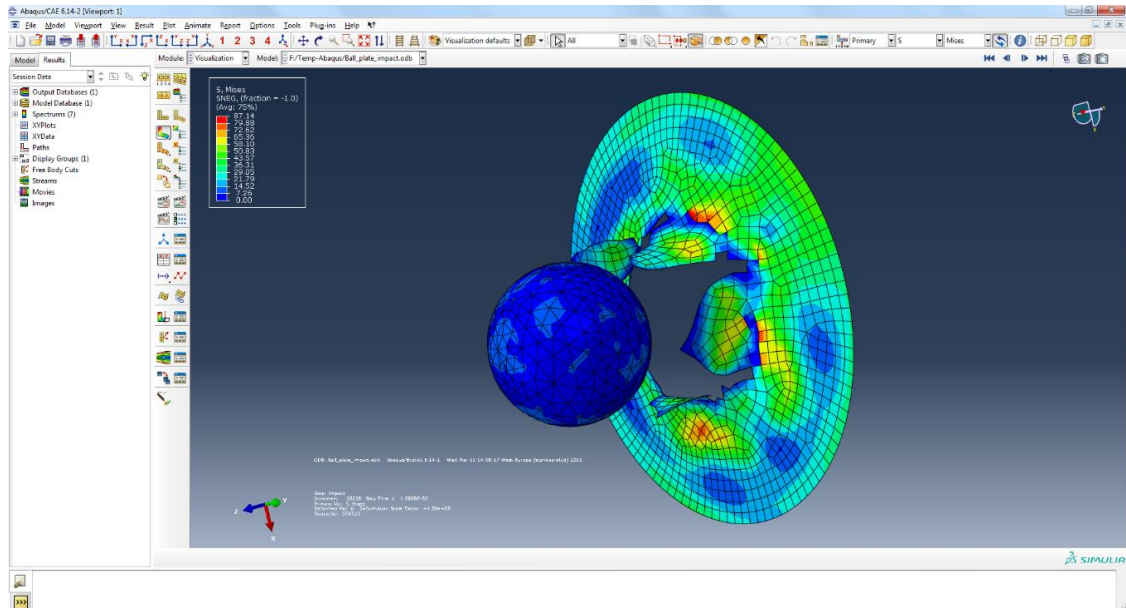


Fuente: [68]

6.1.6.4.3. ABAQUS

El software Abaqus está diseñado para la simulación mediante el método de elementos finitos, el cual permite la realización de cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, incluyendo la simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, acoplamientos acústico-estructurales, mecánica de fluidos, entre otros.

Fig. 24 Simulación a través del Software ABAQUS



Fuente: [69]

6.2. Marco conceptual

Fibras: Hebras o pelos de origen natural y pueden hilarse para dar forma a hilos o cuerdas. *

Culmo: Es el tallo fistuloso y articulado de las gramíneas, pero también puede ser leñoso para cualquier tipo de planta, está formado por nudos y entrenudos, los cuales dan rigidez, flexibilidad y resistencia.

Simulación: Consiste en aplicar los programas en los que podemos comprobar como funcionar en determinar sistema.

Probeta: Trozo de guadua usada para pruebas de laboratorio con dimensiones específicas.

Muestra: Cantidad de fibras necesarias para las pruebas de laboratorio.

Flexión: Es la deformación que se presenta en un elemento alargado en dirección perpendicular al eje longitudinal.

Tracción: Es el esfuerzo interno al que se somete la muestra, en el cual se le aplica dos fuerzas en sentido opuesto, estirando de esta manera la muestra.

Esclerenquimatoso: Es el tejido de sostén presente en plantas jóvenes y herbáceas, la cual proporciona flexión a los tallos jóvenes.

Bioconstrucción: Es un sistema de edificaciones con el menor impacto ambiental, tanto en su construcción como en su funcionamiento como vivienda.

Biomasa aérea: Se define como todo el material orgánico viva o muerta, por encima del suelo y biomasa por debajo del suelo.

Edáficas: relación con el suelo, en especial como condicionante de la vida de las plantas

Fisiográficas: Ciencia que estudia y describe los aspectos y fenómenos físicos de la tierra.

Matrices poliméricas: Consiste en polímero incorporado a una fase de esfuerzo como fibras o polvos.

Micro fibrillas: Es la organización de celulosa de polisacárido fibrilar y representa entre el 15% y 30% del peso seco de las paredes celulares vegetales.

Hemicelulosa: Es el grupo de polisacáridos presentes en las paredes celulares de muchas plantas.

Lignina: Es una clase de polímeros orgánicos que forman materiales estructurales importantes en los tejidos de plantas vasculares.

Pectina: Son el principal componente de la lámina media de la pared celular y constituyen el 30% del peso seco de la pared celular primaria de células vegetales.

Resina epóxica: O cristal líquido, es un polímero termoestable que pasa de estado líquido a sólido cuando se le aplica un endurecedor o catalizador.

Biocomposito: O Biocompuesto, es un material formado por una matriz (resina) y un refuerzo de fibras de naturales (generalmente derivado de plantas naturales)

7. ALCANCES Y LIMITACIONES

El alcance del presente proyecto consiste en estructurar una metodología que permita la simulación del comportamiento mecánico de un material compuesto a partir de fibras de guadua *Angustifolia Kunth*, enfocándose en la resistencia mecánica a tracción y flexión bajo el uso de elementos finitos con el Software ANSYS, en el cual se busca comparar la resistencia a tracción y flexión del material compuesto teniendo un caso real como base de comparación.

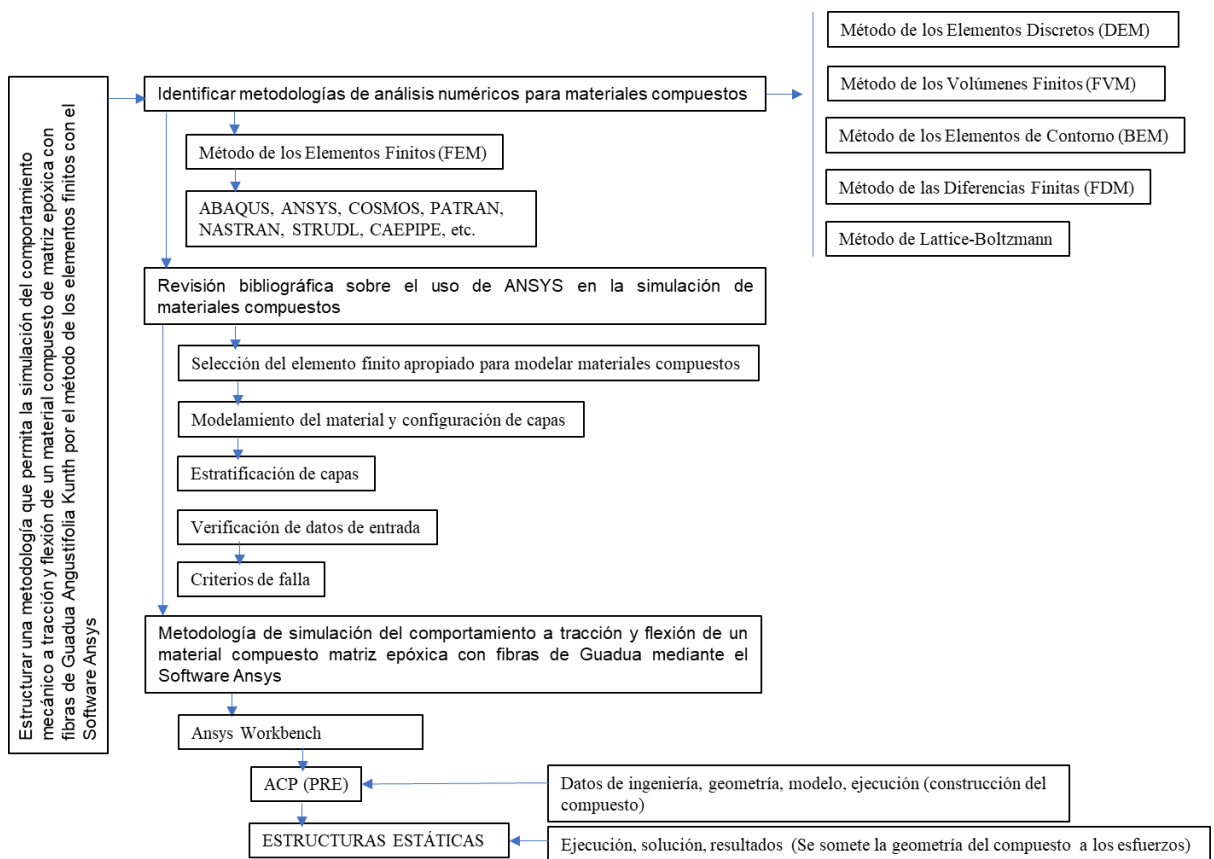
Como limitaciones durante el proceso descrito anteriormente, se estima los siguientes:

- Tiempo de elaboración: Este fue llevado a cabo durante el semestre 2020-I, para lo cual se realizó una investigación exhaustiva sobre los diferentes softwares aplicables teniendo en cuenta la normativa para el desarrollo de ensayos de resistencia mecánica a flexión y tracción de un material compuesto.
- Simulación y pruebas: Este fue realizado mediante el método de elementos finitos a través del software ANSYS teniendo en cuenta los parámetros de la norma ASTM 3036 para el ensayo de resistencia a tracción y la norma ISO 14125 para el ensayo de resistencia a flexión.
- Estudio: El presente proyecto se limita al estudio de propiedades mecánicas a flexión y tracción de un material compuesto a partir de fibras de la guadua, para lo cual se realizará una comparación con base a la simulación mediante el software Ansys vs un caso real.

8. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describe el método que permitió estructurar una metodología para la simulación del comportamiento mecánico a tracción y flexión de un material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua Angustifolia Kunth por el método de los elementos finitos con el Software Ansys. Para ello se sigue el proceso indicado en la figura 25

Fig. 25 Metodología para la simulación del comportamiento mecánico a tracción y flexión de un material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua Angustifolia Kunth por el método de los elementos finitos con el Software Ansys.



Fuente: Autores

8.1 Identificar Metodologías de Análisis Numéricos para Materiales Compuestos

Con respecto a Identificar metodologías de análisis numéricos para materiales compuestos, es de mencionar que los métodos numéricos son aplicaciones de algoritmos mediante los cuales se pueden utilizar operaciones aritméticas menos complicadas para formular y resolver problemas matemáticos. También se denominan métodos indirectos, el análisis numérico idealiza y diseña métodos para entregar efectivamente soluciones a problemas expresados en matemáticas, el objetivo principal del análisis numérico es encontrar soluciones "aproximadas" a problemas complejos.

El análisis numérico es el estudio de algoritmos, que buscan los resultados numéricos de problemas en los más diferentes campos de la humanidad con modelos matemáticos. Generalmente, el algoritmo del método numérico se divide en directo, recursivo e iterativo, por ejemplo, la iteración proporciona una serie de pasos que convergen o no se aproximan a la solución exacta. El propósito del análisis numérico es encontrar una secuencia que pueda aproximarse al valor exacto con un mínimo de operaciones básicas, entre los diferentes métodos numéricos se pueden identificar [70]

- Método de los Elementos Finitos (FEM)
- Método de los Elementos Discretos (DEM)
- Método de los Volúmenes Finitos (FVM)
- Método de los Elementos de Contorno (BEM)
- Método de las Diferencias Finitas (FDM)
- Método de Lattice-Boltzmann

De los mencionados, el método más utilizado, es el método de elementos finitos (MEF), que en realidad se refiere al uso de software que proporciona la cantidad necesaria de cálculo, en los materiales compuestos, esto es inevitable, porque no solo se debe diseñar la estructura sino también el material. Es decir, se determina el número de capas en el material compuesto y la orientación de las fibras, lo que da propiedades mecánicas apropiadas según la dirección de la carga [71]

Actualmente, la última tecnología de materiales compuestos consiste en seleccionar la fibra adecuada y la dirección correcta para optimizar el producto. Por tanto, uno de los aspectos necesarios del uso de estos materiales es la sabia aplicación de las modernas herramientas informáticas para realizar automáticamente los cálculos y analizar adecuadamente cualquier aplicación basada en materiales compuestos

De esta forma, el uso de programas MEF permiten obtener soluciones aproximadas a problemas que son fáciles de expresar en ecuaciones diferenciales. En ingeniería, la mayoría de los procesos actuales se definen de esta manera, por lo que estos procedimientos permiten obtener productos de alta calidad a un menor costo, o mejorar los procesos existentes, o estudiar la falla de componentes estructurales o

materiales, ayudando a reducir el tiempo total de desarrollo del producto, reducir el número de ciclos de prueba y evaluación de prototipos como el caso del diseño de un material compuesto.

En este sentido, se identifica la existencia de muchos programas de análisis de elementos finitos, tales como [72]:

- ABAQUS
- ANSYS
- COSMOS
- PATRAN
- NASTRAN
- STRUDEL
- CAEPIPE, etc.

Particularmente Ansys en el campo del diseño y estudio de materiales compuestos posee componentes específicos para simular dichos materiales, dando la oportunidad de establecer las propiedades de cada uno de los componentes bien sea laminar o matricial, de tal manera que las fibras pueden ser especificadas a detalle [73].

8.2 Realizar Una Revisión Bibliográfica Sobre El Uso De Ansys En La Simulación De Materiales Compuestos

Ansys como paquete computacional ofrece el módulo composite PrePost (Ansys ACP) con el cual se pueden manejar las propiedades elasticidad, dureza y deformación de los materiales compuestos lo que lo hace atractivo para muchos tipos de fabricación. Los materiales compuestos como la fibra de carbono (CFRP), que se utilizan normalmente en los sectores aeroespacial y automotriz, se utilizan cada vez más en aplicaciones energéticas, deportivas, de construcción y marinas, sin embargo, su naturaleza compuesta hace que la simulación precisa sea un desafío [66].

Para ello, Ansys ofrece un conjunto completo de herramientas para ayudar a superar este desafío, así, Ansys Composite PrepPost es una herramienta dedicada para el modelado de capas compuestas y el análisis de fallas. Puede generar modelos compuestos en capas para simulaciones estructurales y térmicas implícitas y explícitas, así como de fluidos.

Por tanto, ACP proporciona una disposición eficiente y las mejores capacidades de modelado de elementos sólidos de su clase y una plataforma que ofrece muchas formas de intercambiar información del modelo. Es compatible con el formato de archivo CAE compuesto HDF5 independiente del proveedor para la comunicación con herramientas de terceros. Más allá del modelado de estructuras compuestas, Ansys Composite Cure Simulation (ACCS) simula el proceso de fabricación de curado, le ayuda a simular el proceso de curado de una pieza y predice tensiones residuales y distorsiones inducidas por el proceso [66]

8.2.1 Características

Los compuestos en capas de ingeniería implican definiciones complejas que incluyen numerosas capas, materiales, espesores y orientaciones. El desafío de la ingeniería es predecir qué tan bien se desempeñará el producto terminado en condiciones de trabajo del mundo real. Esto implica considerar tensiones y deformaciones, así como una variedad de criterios de falla. ANSYS Composite PrepPost proporciona todas las funcionalidades necesarias para el análisis de estructuras compuestas en capas [71].

- Soporte para información de capa de material en ensamblajes
- Una gran cantidad de herramientas para definir el apilado y la orientación de capas compuestas
- Envoltura plana y drapeada
- Salida de libros de capas
- Entorno de posprocesamiento diseñado específicamente para compuestos
- Una amplia variedad de modelos de criterios de falla de última generación
- Elementos de carcasa 3D para compuestos delgados
- Elementos sólidos 3D para compuestos gruesos

Es Integrado, lo que permite la asociación de distintas tecnologías para el desarrollo de un producto sin abandonar una única plataforma. Además, su integración permite la asociación con los softwares más avanzados de CAD. Por último, su sistema de integración permite incluirse sin dificultad en sistemas de documentación propios de cada empresa.

Al ser modular ANSYS permite que los clientes instalen una única aplicación para la solución de un problema específica. A medida que el usuario avanza en la solución, este puede necesitar análisis más complejos, los distintos módulos de ANSYS permiten solucionar los problemas por partes [72].

8.2.2 Procesamiento de Ansys

El MEF usa un complejo sistema de puntos llamados nodos que hacen una red llamada malla, esta malla, está programada para contener el material y las propiedades de la estructura que definen, cómo ésta reaccionará ante ciertas condiciones de carga. A los nodos se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de tensión en un área. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno [71]

Los puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente testeados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevado estrés. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento

de malla a cada nodo adyacente, Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

Básicamente los pasos a seguir en el análisis de estructuras mediante el método de los desplazamientos a través del MEF son [62]:

1. El medio continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado durante la etapa de preproceso.
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o “nodos”, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.
3. Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento. Por ejemplo, el campo de desplazamientos dentro de un elemento lineal de dos nodos viene definido por: $u = N1.u1 + N2.u2$, siendo $N1$ y $N2$ las funciones comentadas (funciones de forma) y $u1$ y $u2$ los desplazamientos en el nodo 1 y en el nodo 2.
4. Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.
5. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma $F = k \cdot u$, que como vemos es similar a la del cálculo matricial.
6. La resolución del sistema anterior permite obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.
7. En la etapa de postproceso se presentan los resultados, generalmente de forma gráfica para su análisis.

8.2.3 Fases de procesamiento del Ansys

Las fase que cumple el programa se presentan continuación [72]:

1. Pre-procesamiento: El primer paso en MEF, pre-procesamiento, es construir un modelo de elementos finitos de la estructura a ser analizada. En muchos paquetes de MEF se requiere de la entrada de una descripción topológica de las características geométricas de la estructura. Ésta puede ser 1D, 2D, o 3D, el objetivo principal del modelo es replicar de manera realista los parámetros importantes y características del modelo real.

La manera más sencilla para conseguir similaridad en el análisis es utilizar planos preexistentes, modelos CAD. Una vez que se ha creado la geometría, se utiliza un

procedimiento para definir y dividir el modelo en pequeños elementos. En general, un modelo de elementos finitos está definido por una malla, la cual está conformada por elementos y nodos.

Los nodos representan puntos en los cuales se calcula el desplazamiento (análisis estructural). Los paquetes de MEF enumeran los nodos como una herramienta de identificación. Los elementos están determinados por conjuntos de nodos, y definen propiedades localizadas de masa y rigidez. Los elementos también están definidos por la numeración de la malla, la cual permite referenciar la correspondiente deflexión o esfuerzo (en análisis estructural) para una localización específica.

Cuando se trata de volúmenes o superficies complejas tridimensionales, se necesita utilizar software especializado de diseño para modelar cualquier pieza específica. En este caso, una vez que se diseña un elemento se lo traduce a Ansys, y se utilizan las opciones de importación

2. Análisis (cómputo de la solución): En la siguiente etapa, en el proceso de análisis de elementos finitos se lleva a cabo una serie de procesos computacionales que involucran fuerzas aplicadas, y las propiedades de los elementos de donde producir un modelo de solución. Tal análisis estructural permite la determinación de efectos como lo son las deformaciones, estiramiento o esfuerzos que son causados por fuerzas estructurales aplicadas como lo son la fuerza, la presión y la gravedad.

3. Post-procesamiento (visualización): Estos resultados entonces pueden ser estudiados utilizando herramientas visuales dentro del ambiente de MEF para ver y para identificar completamente las implicaciones del análisis, herramientas numéricas y gráficas permiten la localización precisa de información como esfuerzos y deformaciones a ser identificadas.

8.2.4 Protocolo para simular un material compuesto en Ansys ACP

a. Selección del elemento finito apropiado para modelar materiales compuestos

La biblioteca de elementos finitos de Ansys contiene más de 100 diferentes tipos. Cada tipo de elemento tiene un nombre y un número único. El software Ansys permite modelar materiales compuestos con elementos especializados llamados elementos laminados (layered), y cada lámina puede poseer características isotrópicas u ortotrópicas diferentes, a continuación, se presentan los tipos de elementos para laminados:

Membrana (Shell): Los elementos estructurales tipo membrana de Ansys usan menos nodos y elementos y recursos computacionales, y el espesor puede ser fácilmente optimizado. Se debe modelar como superficie

Sólido: Los elementos sólidos requieren de más nodos, elementos, memoria computacional y tiempo de cálculo. Se debe modelar la pieza como sólido.

Sólido – Membrana: Para estructuras laminadas o estructuras tipo sándwich, utiliza la teoría de Mindlin - Reissner

Viga: Elemento basada en la teoría de viga de Timoshenko análoga a Mindlin-Reissner, se usa en materiales no lineales

b. Modelamiento del material y configuración de capas

Una vez que está cargado en el programa el elemento a ser analizado, sea vía las herramientas de modelado de Ansys, o mediante un software externo de diseño, se selecciona el elemento finito apropiado para el modelo. Se necesita entonces asignar las propiedades del material, que son ortotrópicas para la mayoría de los compuestos, es importante notar que estas propiedades corresponderán a una capa denominada especialmente ortotrópica. Es decir, los ejes del material 1-2 coinciden con los ejes de referencia (ejes de carga) x-y, es decir, la dirección de las cargas aplicadas coincide con la dirección de los ejes del material.

De ser necesario, se pueden generar materiales adicionales, de tal modo que cada capa puede ser construida de diferente material ortotrópico. Es importante no dejar vacío ninguno de los campos. Como se ha visto en los capítulos precedentes, para obtener un laminado compuesto, se suele estratificar con capas, cuyos ejes del material no coinciden necesariamente con los ejes de referencia, estas capas se denominan generalmente ortotrópicas, y sus propiedades se calculan automáticamente asignando la rotación en grados de la capa con respecto al eje x, se puede asignar el material de la capa, la orientación de la misma con respecto a los ejes de referencia y el espesor de la capa.

Estratificación de capas. Una de las ventajas que ofrece el trabajar con materiales compuestos es que se puede estratificar capas donde sea necesario, y en el número y orientación que convenga. Es posible definir varios laminados con números de capas, espesores, orientaciones y material diferente. A continuación, se malla todo el elemento que está siendo analizado.

Verificación de datos de entrada. Ansys tiene varias opciones para verificar si los datos de entrada han sido correctamente ingresados: LAYLIST lista la secuencia de estratificación de capas y las propiedades del material. LAYPLOT permite visualizar la secuencia de estratificación en forma de las capas, que están cruzadas de líneas paralelas que indican su orientación.

3. Metodología de simulación del comportamiento a tracción y flexión de un material compuesto matriz epóxica con fibras de Guadua mediante el Software Ansys.

Para los efectos de simular el comportamiento a tracción y flexión de un material compuesto con matriz epóxica con fibras de Guadua mediante el Software Ansys, se

debe seguir los métodos que ofrece Ansys de manera sistemática, para lo cual se refiere:

- a. Bajo el ambiente de Ansys Workbench, se accede a las herramientas como ACP (PRE), Estructuras estáticas
- b. Se selecciona el módulo ACP (PRE), en este se perfilan todas las condiciones del material a evaluar, primeramente, se especifican los datos de ingeniería correspondientes a los materiales que constituirán el compuesto, para este caso sería un epóxico y las fibras de guadua (seleccionados de acuerdo a los criterios que requiere el diseño), de los cuales se especificarán propiedades elásticas y esfuerzos permisibles, entre otros.
Definidos los tipos de materiales, se especifica la geometría del material, bien sea importando la figura de un programa cad o construida en el propio Ansys Geometría, seguidamente se aplica la herramienta modelo donde se aplica el mallado a la pieza o secciones de la pieza.
Luego se selecciona la herramienta ejecución, en la cual se especifican los detalles del material compuesto como número de capas de epóxico y su alternancia, así como los planos en los cuales se direccionarán las fibras de guadua, espesor de cada capa entre otros.
- c. Listo el material compuesto, se emplea el módulo Estructuras estáticas, en el cual se especifican las fuerzas aplicadas al material en sus respectivos planos, para los efectos de esta metodología serán fuerzas axiales para evaluar el comportamiento del compuesto epoxico-fibra guadua y una fuerza perpendicular al plano xz para evaluar el comportamiento ante el esfuerzo de flexión, donde los resultados muestran el material con sus respectivas configuraciones.
- d. Especificados los aspectos mecánicos a los cuales estará sometido el material, se seleccionan las evaluaciones que se realizarán, ello implica esfuerzos y deformaciones, dando los resultados de manera numérica y gráfica, especificando la distribución de los esfuerzos sobre el material compuesto.

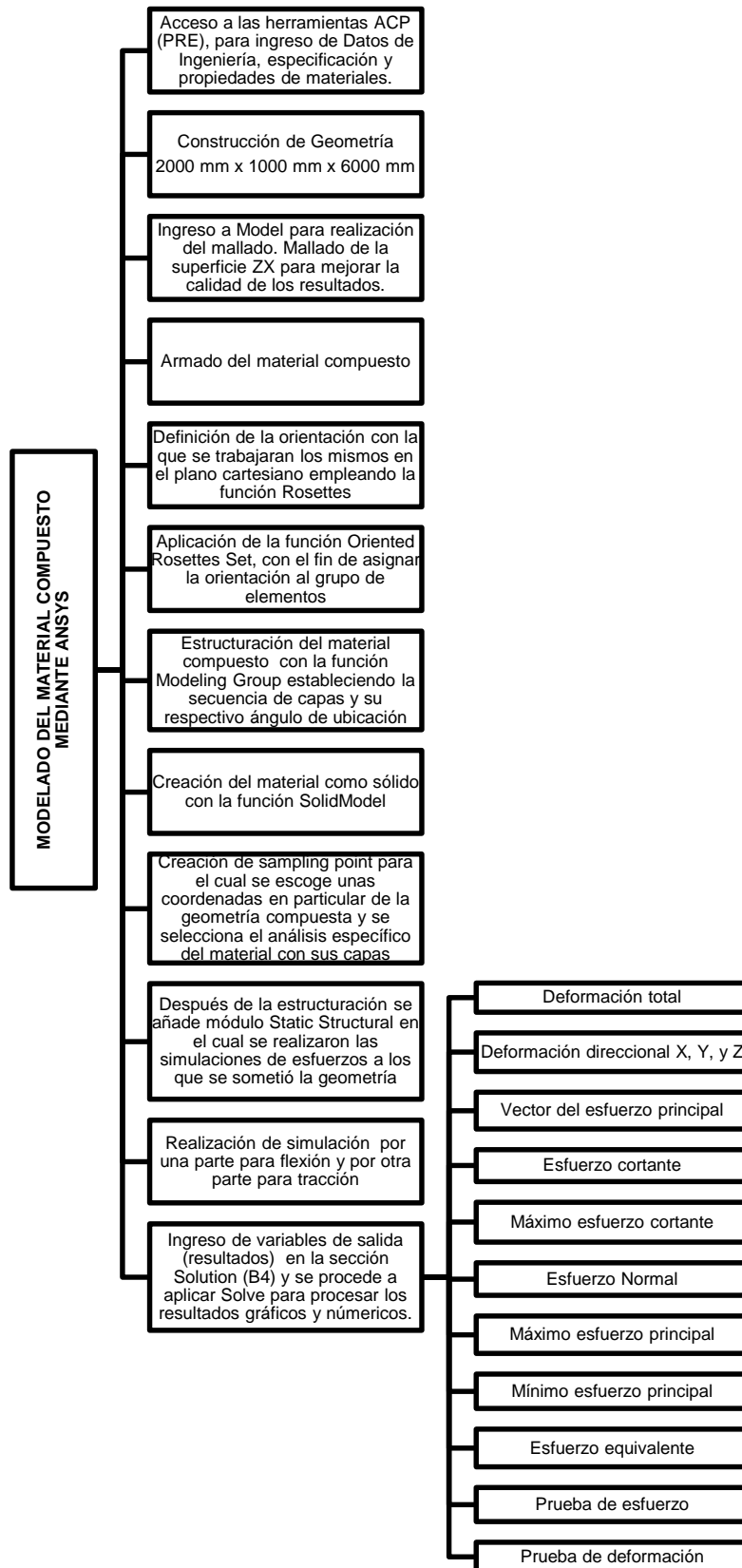
Para aplicar la Metodología de simulación del comportamiento a tracción y flexión de un material compuesto epóxico con fibras de Guadua mediante el Software Ansys, en la sección 9 se presentan los resultados y análisis de los resultados, que permitieron caracterizar mecánicamente el material compuesto epoxico-fibra de guadua en cuanto a tracción y flexión.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La simulación del material compuesto se realizó en el Software ANSYS, mediante el análisis numérico por elementos finitos, el cual permite conocer el comportamiento mecánico del material en una aplicación real, por tales razones para los efectos de este estudio se construyó una geometría de grandes dimensiones para exaltar la utilidad del software en el diseño de materiales empleados, siendo esto ventajoso en comparación con las limitaciones de las probetas empleadas en los ensayos de laboratorios tradicionales. Mediante la reproducción virtual del producto se evaluó una lámina constituida por un material compuesto de resina epóxica con fibras de guadua en sus diferentes dimensiones con respecto a la flexión y tracción. A continuación, se hace la descripción de los pasos seguidos para el desarrollo de la simulación en software.

9.1. RESULTADOS

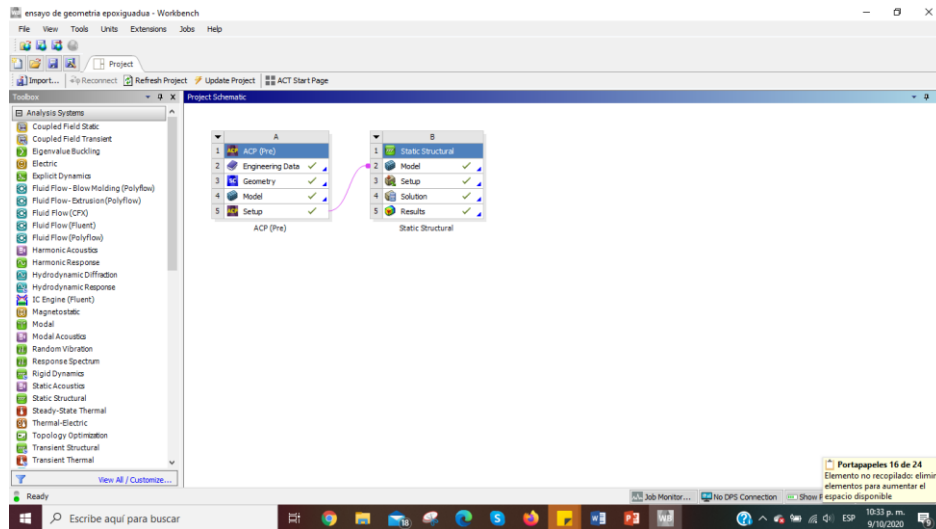
Fig. 266 Diagrama de flujo del paso a paso de la metodología propuesta



Fuente: Autores

a. Bajo el ambiente de Ansys Workbench 2020 RE, se accedió a las herramientas ACP (PRE), Estructuras estáticas requeridas para la simulación del comportamiento mecánico a tracción y flexión de un material compuesto de matriz epóxica con fibras de Guadua Angustifolia Kunth, como se muestra en la figura 26.

Fig. 277 Ambiente de Ansys Workbench 2020 R2, con módulos de ACP (PRE), Estructuras estáticas



Fuente: Autores

b. Se seleccionó el módulo ACP (PRE), donde se ejecutó lo siguiente:

Datos de ingeniería. Especificación de los materiales y sus propiedades, de acuerdo a los requerimientos, constituyéndose en esta oportunidad para la conformación de un material biocompuesto de un bioepoxi y las fibras de guadua.

Tal como se refirió en el inicio de la investigación, la utilización de materiales compuestos con fibra de guadua favorece al medio ambiente ya que las fibras son biodegradable, aunado a ello para maximizar este propósito se emplea un bioexpóxico - Bioepoxi SuperSap 100/1000 - que a diferencia de las resinas epoxi tradicionales, que se componen principalmente de materiales a base de petróleo, las formulaciones de Super Sap TM contienen un 55% de materias primas bio-renovables, que son subproductos de desechos de otros procesos industriales como la celulosa y la producción de biocombustibles, así el compuesto resultante es una opción sostenible en la fabricación de estructuras civiles, en la tabla 6 se muestran las propiedades mecánicas de acuerdo al fabricante.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de Bioepoxi SuperSap 100/1000 [74]

PROPIEDADES	RESINA
Densidad (g/m ³)	2,01
Módulo de elasticidad (GPa)	3,7
Radio de Poisson	0,39
Esfuerzo máximo a tracción (Mpa)	26,7
Esfuerzo máximo a compresión (Mpa)	26,6
Esfuerzo máximo a flexión (Mpa)	26,7
Esfuerzo de fluencia a tracción (Mpa)	24,4
Esfuerzo de fluencia a compresión (Mpa)	24,4
Deformación (%)	7,31
Masa (g)	150
Peso (N)	1,47
Volumen (cm ³)	74,61

Fuente: Autores

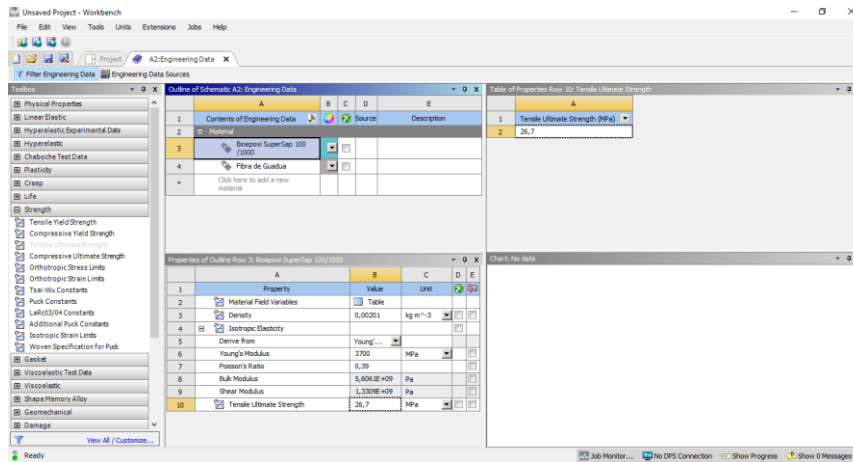
Seguidamente, se presentan las propiedades mecánicas de las fibras de guadua producto de promediar los valores encontrados en la revisión bibliográfica, como se aprecia en la tabla 7. Por otra parte, en las figuras 27 y 28 se muestran los materiales creados en ANSYS a partir de las propiedades mencionadas. Para ello se hizo clic en nuevo material se les asignó nombre y se seleccionaron las propiedades de acuerdo al listado con el que cuenta el programa.

Tabla 7. Promedio de las propiedades mecánicas de las fibras de guadua

Propiedades	Fibra de Guadua
Densidad (g/m ³)	0,8
Módulo de elasticidad (GPa)	28,1
Radio de Poisson	0,21
Esfuerzo máximo a tracción (MPa)	402

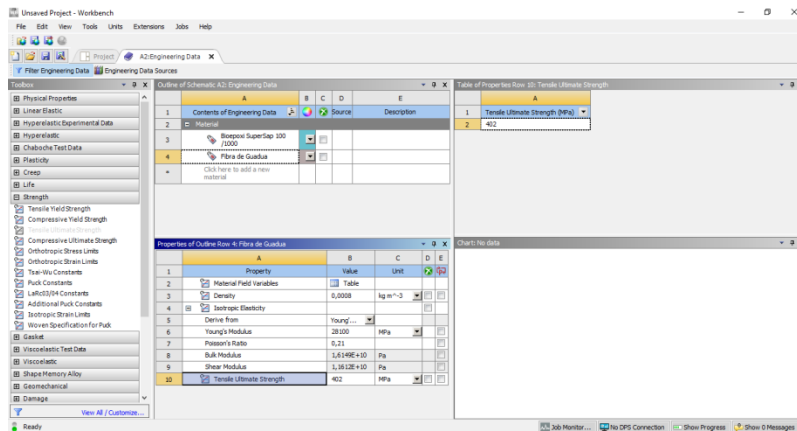
Fuente: Autores

Fig. 28 Bioepoxi SuperSap 100/1000 creado en Ansys



Fuente: Autores

Fig. 29 Fibra de guadua creada en Ansys

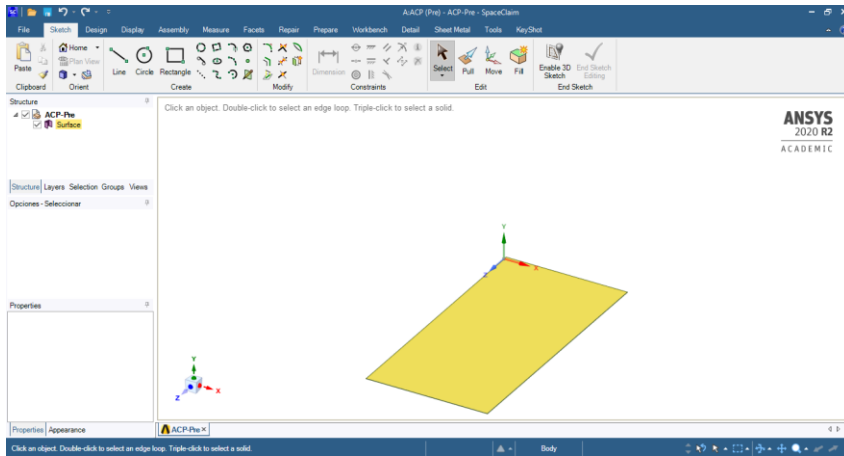


Fuente: Autores

Geometría

Para efectos de que se visualice la utilidad de Ansys en el diseño de ingeniería de piezas reales (superando las limitaciones de los laboratorios), se construyó una geometría de 2000 mm x 1000 mm x 600 mm. La geometría se construyó en el propio Ansys inicialmente como una superficie de 2000 mm x 1000 mm como se aprecia en la figura 29.

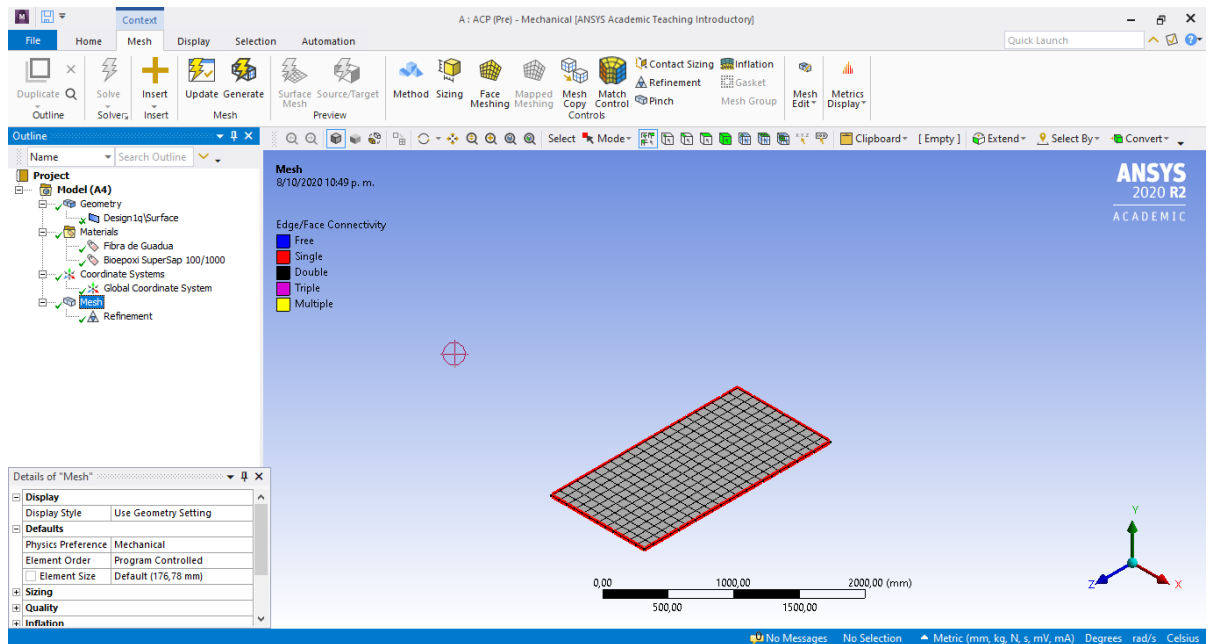
Fig. 30 Geometría creada en Ansys



Fuente: Autores

Seguidamente, se accedió a Model para realizar el mallado, tal como se aprecia en la figura 30, el programa reconoce los materiales creados y la geometría construida sobre la cual se realiza el mallado que por defecto el programa realiza, sin embargo, se refinó el mallado de la superficie ZX para mejorar la calidad de los resultados.

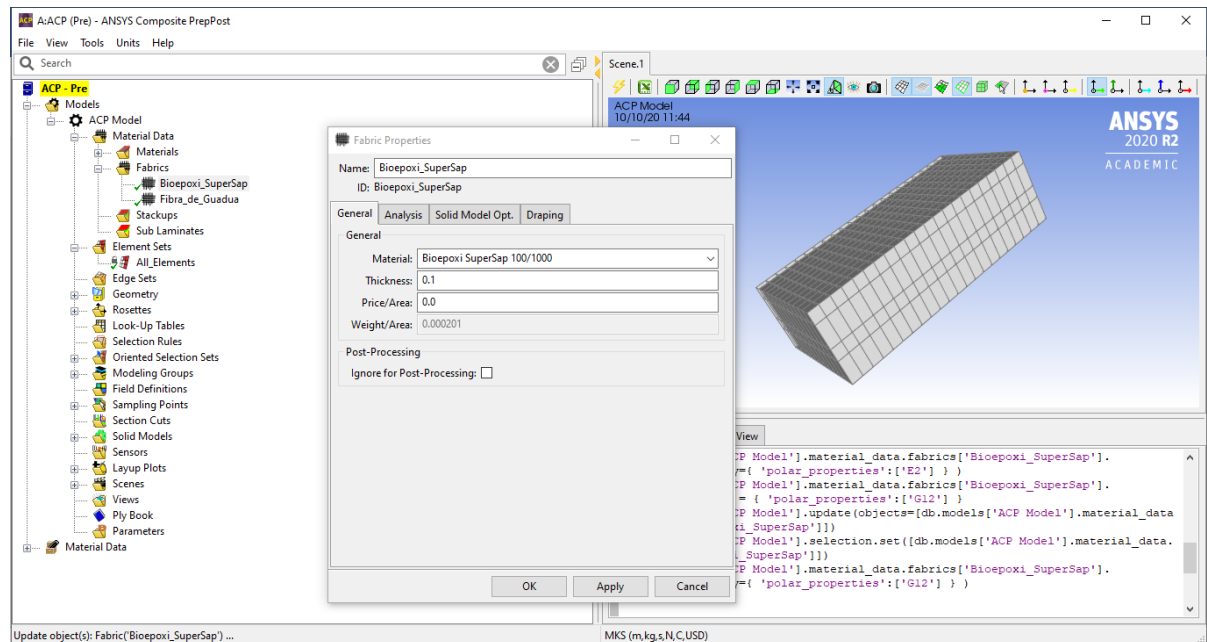
Fig. 31 Mallado de la geometría



Fuente: Autores

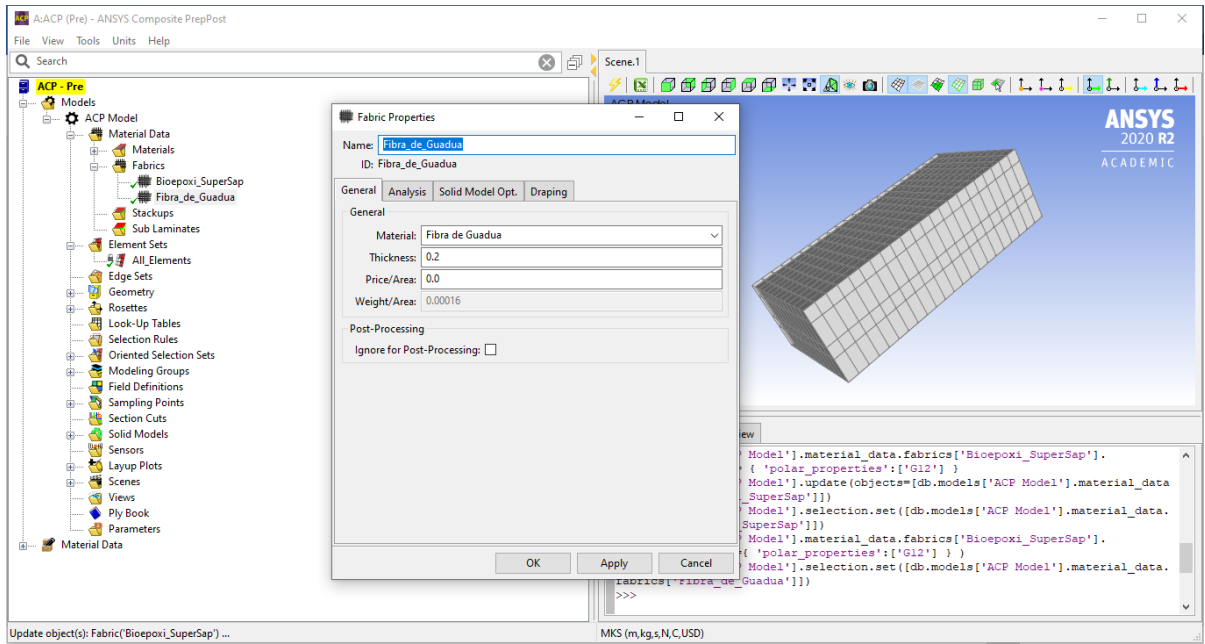
Luego del mallado de la geometría se procede al armado del material compuesto en este sentido como se muestra en la figura 31 se creó la capa de Bioepoxi SuperSap 100/1000 con un espesor de 0,1 mm, asimismo, se creó la capa de fibra de guadua con espesor de 0,2 como se muestra en la figura 32, estas medidas se colocaron diferentes para efectos visuales de diferenciación, como se aprecia en las mencionadas imágenes.

Fig. 32 Creación de la capa de Bioepoxi SuperSap 100/1000



Fuente: Autores

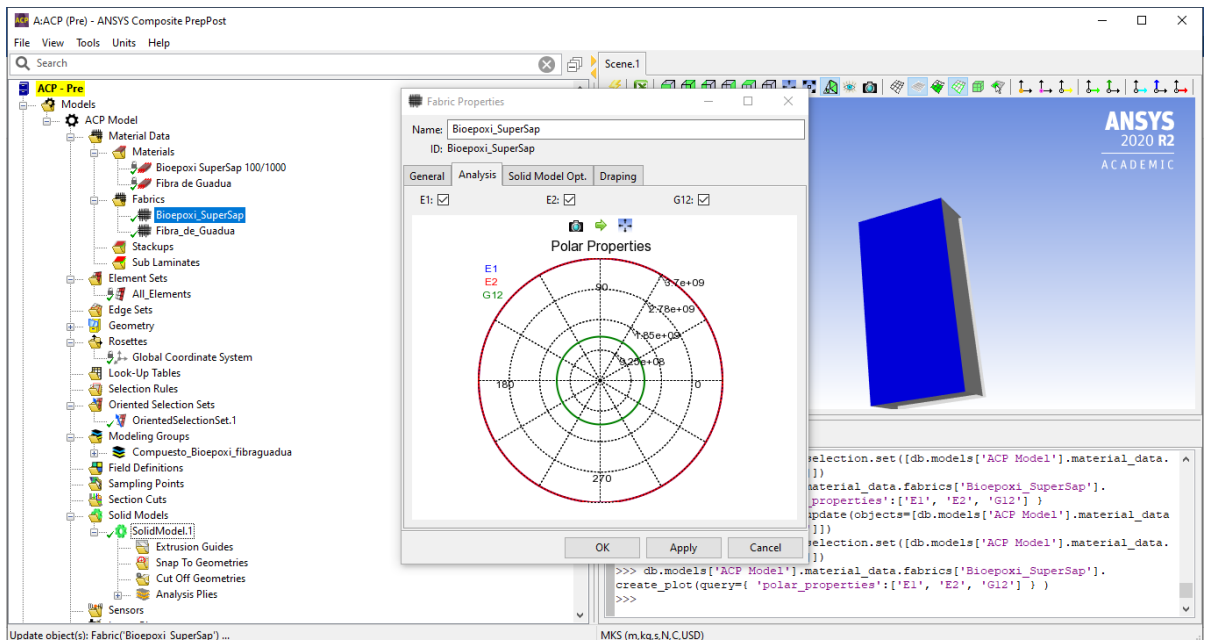
Fig. 33 Creación de la capa de fibra de guadua



Fuente: Autores

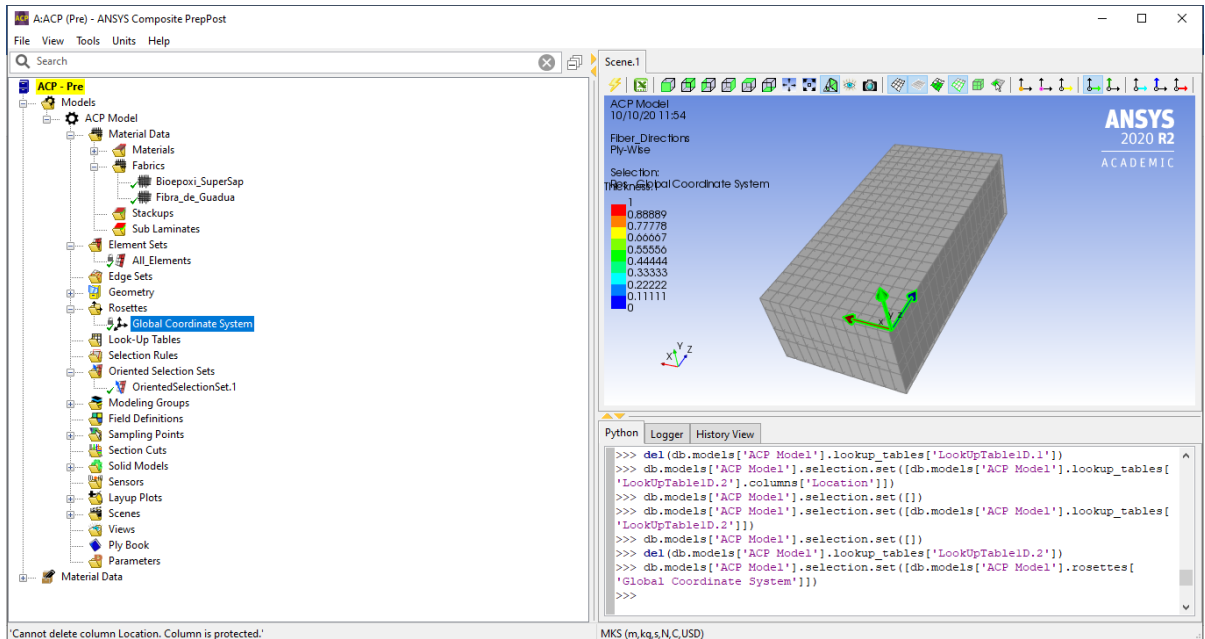
Así mismo, el programa muestra las propiedades polares de cada capa de material con los espesores asignados, tal como se refleja en las figuras 33 y 34, ello a partir de la aplicación de la pestaña análisis.

Fig. 34 Propiedades Polares del Bioepoxi SuperSap 100/1000



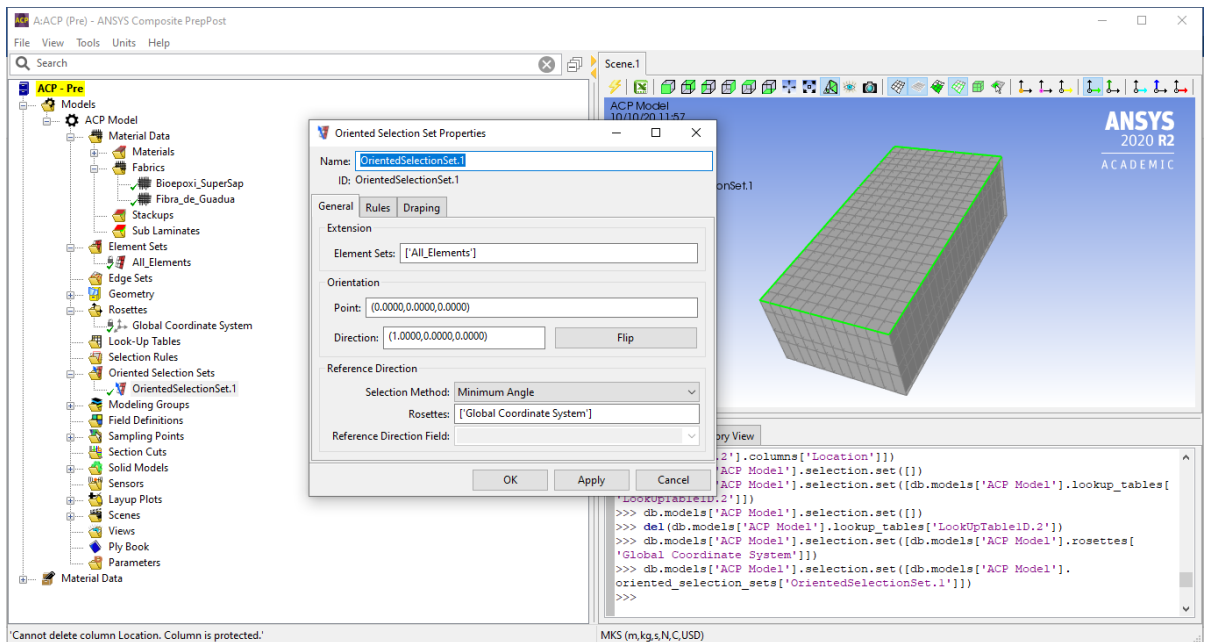
Fuente: Autores

Fig. 36 Rosettes



Fuente: Autores

Fig. 37 Oriented Selección Set

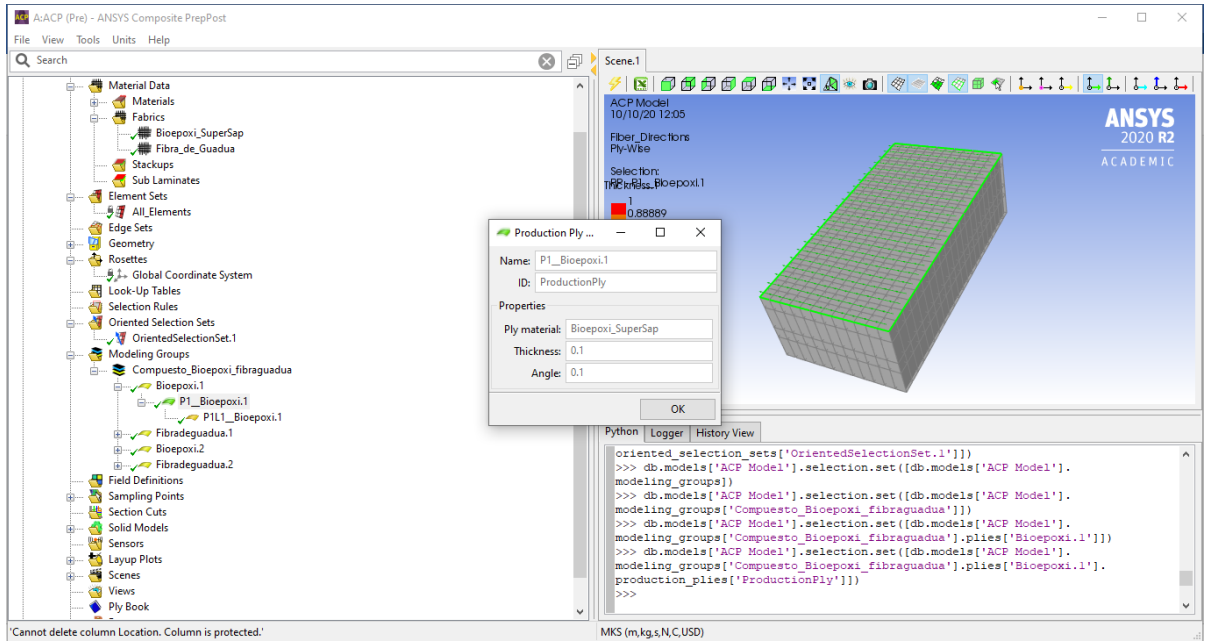


Fuente: Autores

Consecutivamente, se estructuró el material compuesto de Bioepoxi SuperSap 100/1000 y fibra de guadua en función de los pasos anteriores con la función Modeling Group, se estableció la secuencia de capas y su respectivo ángulo de

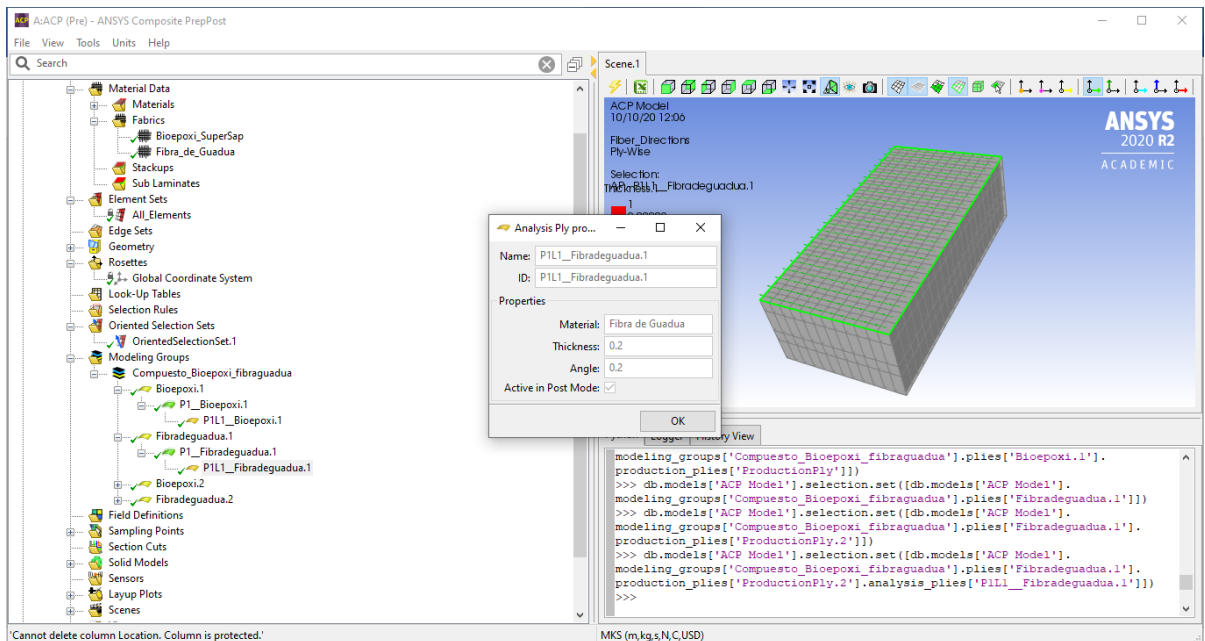
ubicación, tal como se muestra en la figura 37 las capas de colocaron de manera intercaladas y con un ángulo entre ellas de 0,1 para las del epoxico y 0,2 para la fibra de guadua como se aprecia en la figura 38.

Fig. 38 Modeling Group, capa Bioepoxi SuperSap



Fuente: Autores

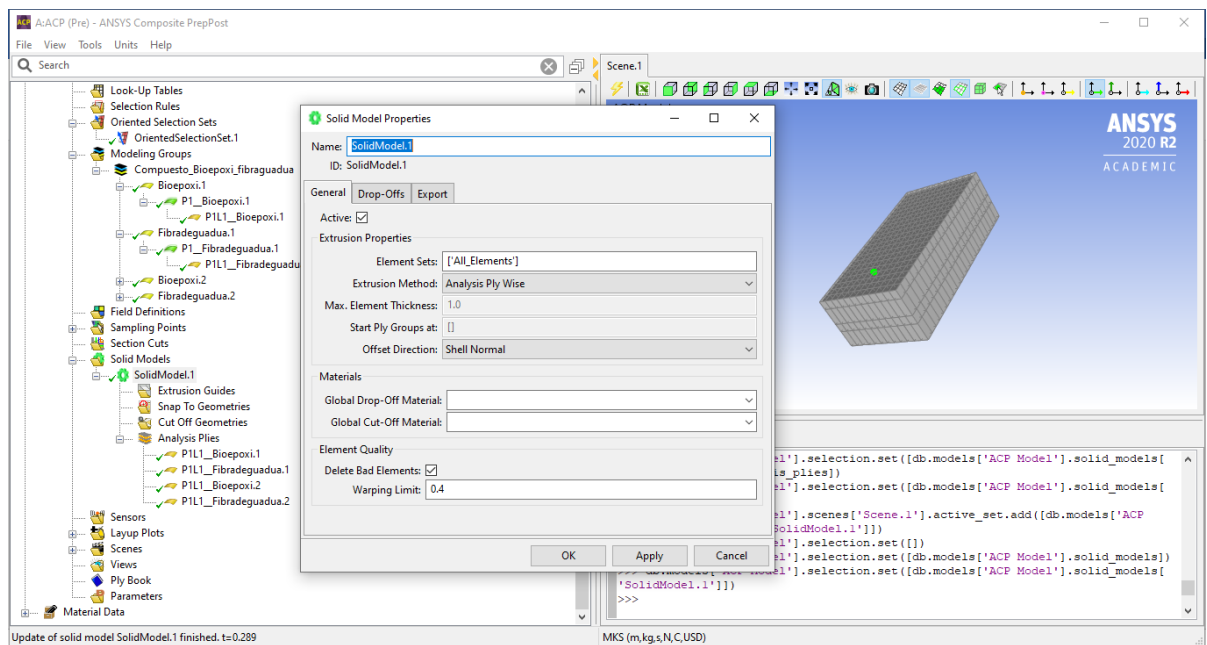
Fig. 39 Modeling Group, capa fibra de guadua



Fuente: Autores

Hasta ahora, se encuentra creado el material compuesto, sin embargo, se prosigue con la creación del material como sólido con la función SolidModel, en esta oportunidad el programa a partir de las características que se han asignado anteriormente al set de grupos construye el material compuesto como un sólido con la geometría importada al inicio del proceso ACP.

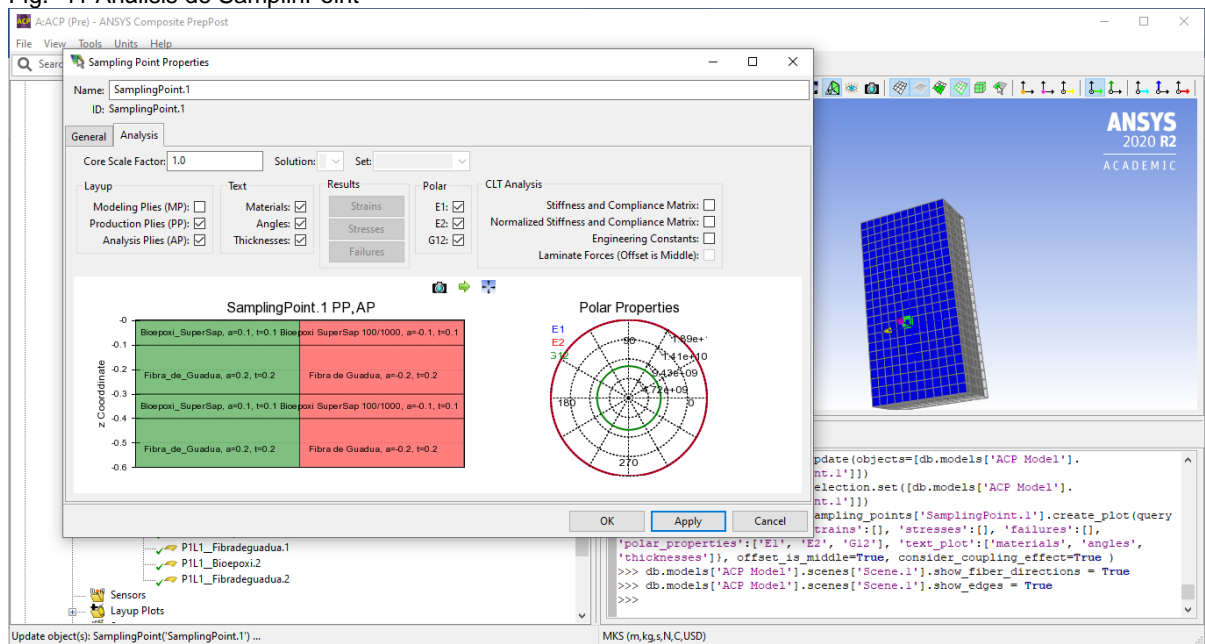
Fig. 40 Solid



Fuente: Autores

Finalmente, se crea un sampling point, para el cual se escoge unas coordenadas en particular de la geometría compuesta y se selecciona el análisis específico del material con sus capas tal como se muestra en la imagen 40, indicando los espesores, distribución, ángulos y propiedades polares resultantes

Fig. 41 Análisis de SamplinPoint

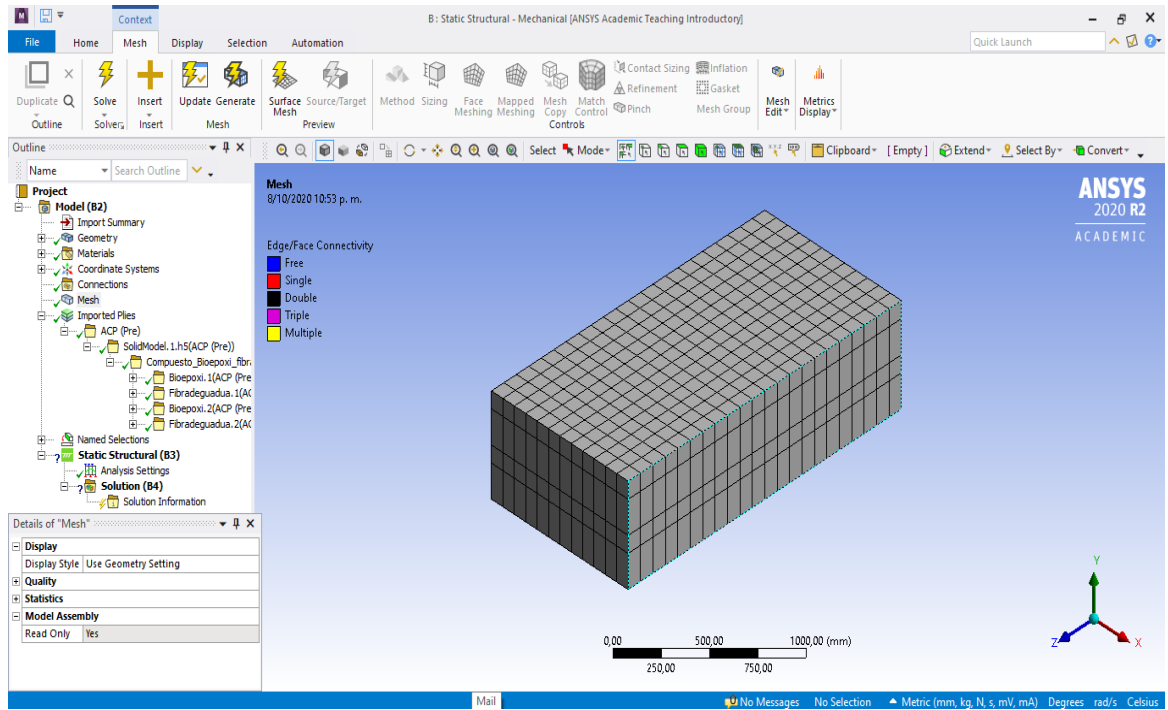


Fuente: Autores

Concluida la estructuración del material compuesto, se añade el módulo Static Structural como se muestra en la figura 41, en el cual se realizaron las simulaciones de esfuerzos a los que se sometió la geometría, indicando primeramente el modelo, el cual se transfiere desde el módulo ACP hasta el mencionado módulo, importando la estructuración del compuesto en la pestaña Imported Piles como se visualiza en la imagen 41.

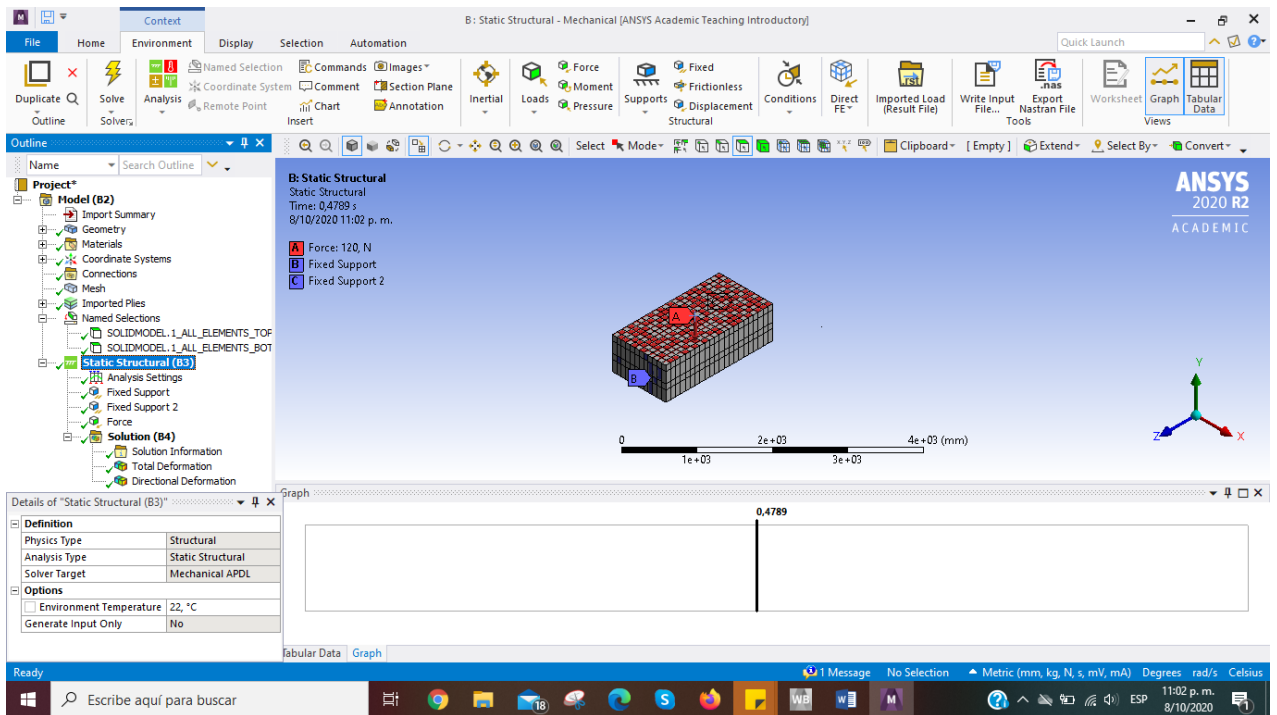
En este sentido, las simulaciones se realizaron en dos partes una para flexión y otra para estudiar el comportamiento a tracción, de tal manera que primero se mostrará a continuación los resultados para la simulación de tracción. Para ello, con Static Structural (B3), se ubicaron dos soportes y se aplicó una fuerza perpendicular a la superficie ZX de -120 N, como se aprecia en la figura 42, con ello se definieron las variables mecánicas de entrada para la simulación del comportamiento de flexión.

Fig. 42 Modelo importado de Ansys ACP Pre



Fuente: Autores

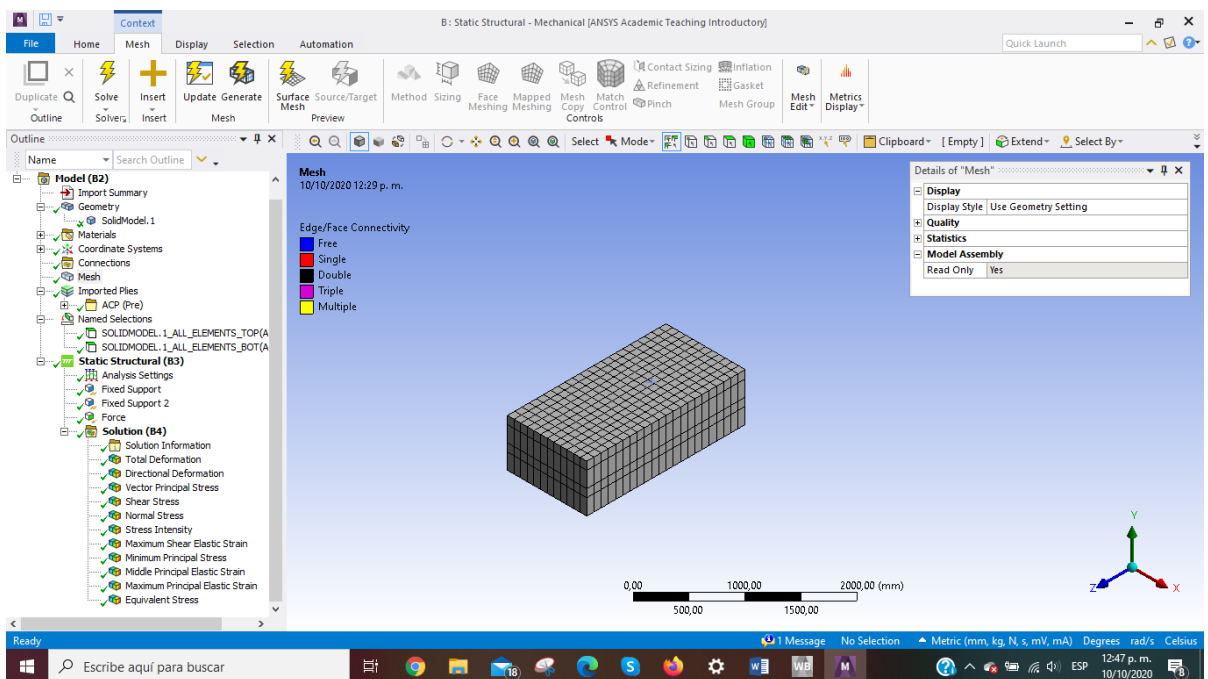
Fig. 43 Static Structural (B3)



Fuente: Autores

Por otra parte, las variables de salida (resultados), se agregaron en la sección Solution (B4) como se aprecia en la figura 43.

Fig. 44 Solution (B4)

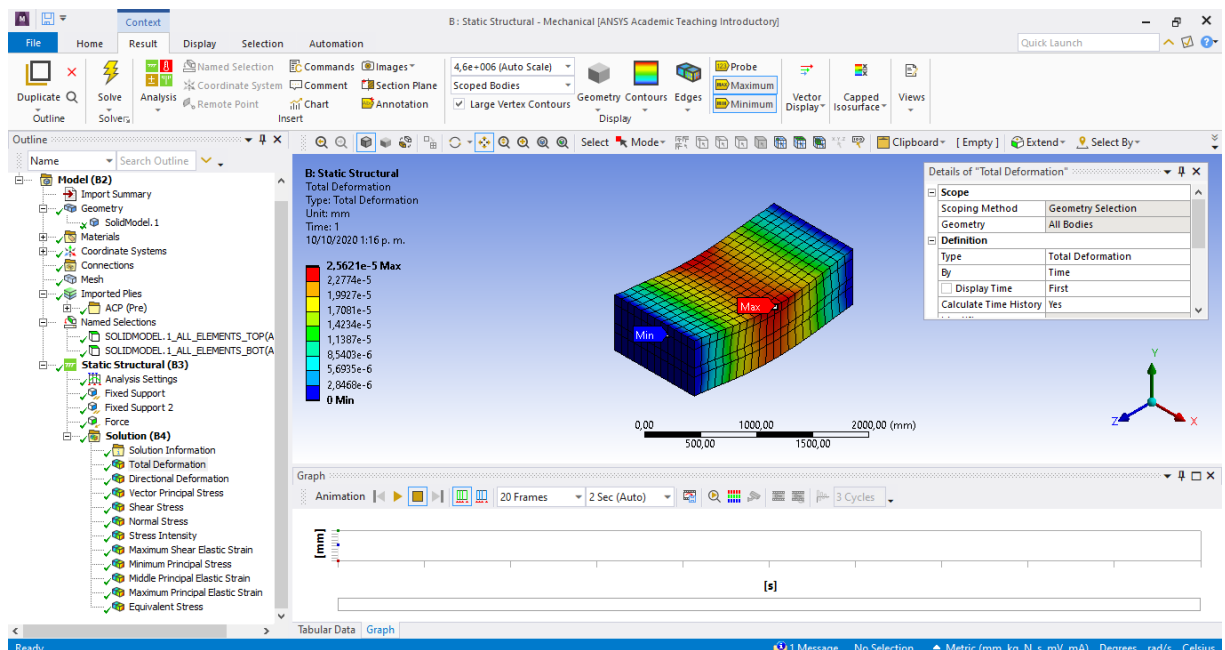


Fuente: Autores

Al aplicar la función Solve se procesan los resultados de cada una de las soluciones especificadas, en tal sentido a continuación se presentan cada uno de ellos con su resultado gráficos y numéricos.

Deformación total. La misma se ubicó en un valor promedio de $1,3229\text{e-}005$ mm mientras la máxima deformación fue de $2,5621\text{e-}005$ mm para toda la geometría, en la figura 44 se aprecia gráficamente como el color rojo indica la zona con máxima deformación y en color azul la zona con la mínima deformación siendo cero, teniendo valores intermedios representados en otros colores según la leyenda que acompaña a la geometría.

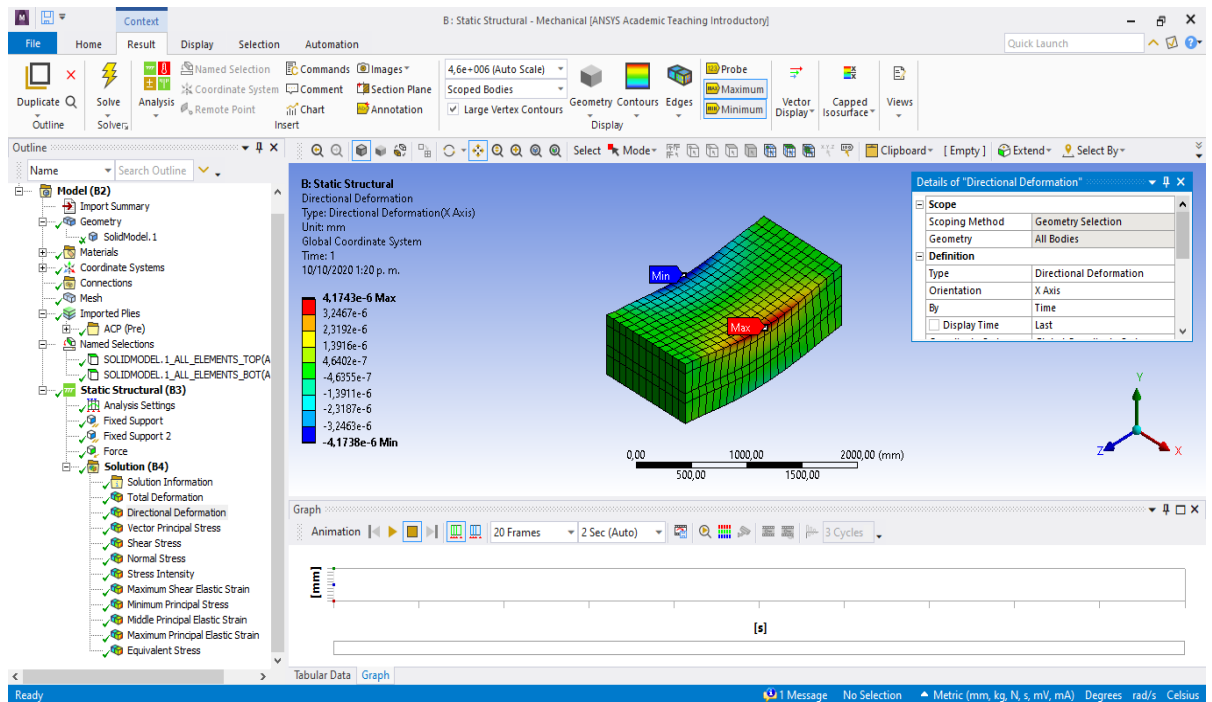
Fig. 45 Deformación total



Fuente: Autores

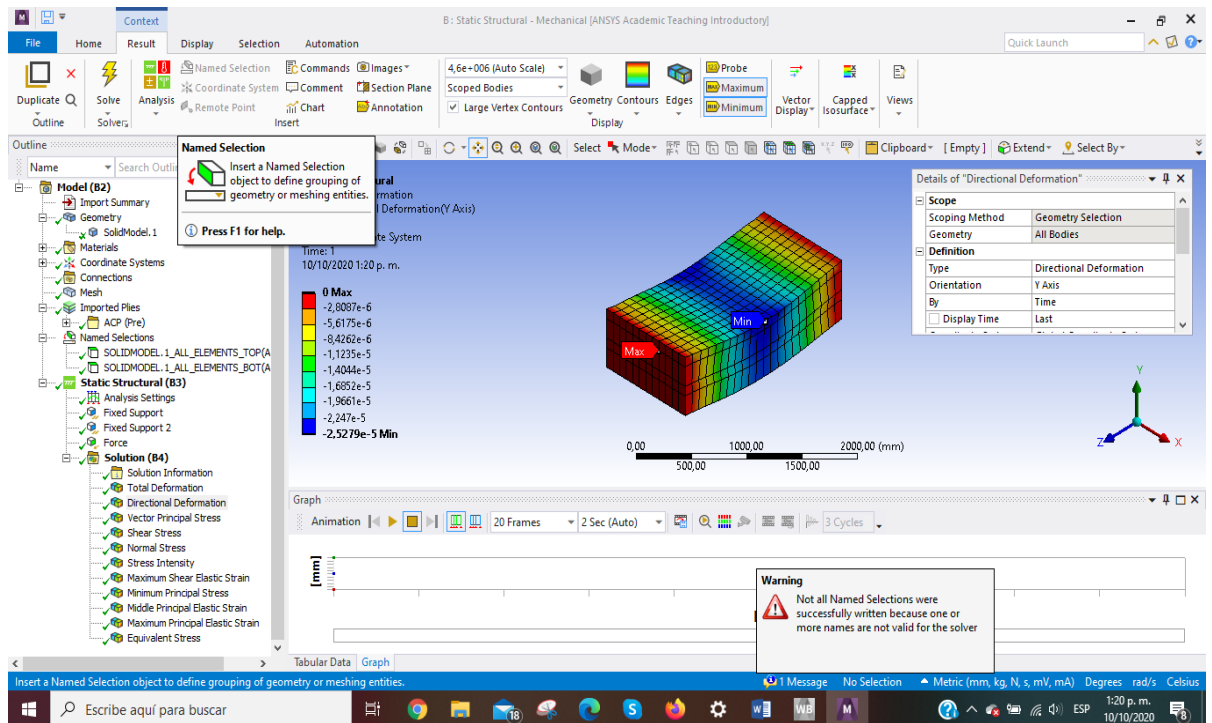
Deformación direccional. En este sentido los resultados se obtuvieron para tres orientaciones X, Y y Z como se aprecia en las figuras 45, 46 y 47, así para la orientación X la máxima deformación fue $4,1743\text{e-}006$ mm, la mínima de $-4,1738\text{e-}006$ mm y la promedio $-5,6651\text{e-}011$ mm, con respecto a la orientación Y, el valor máximo fue 0, mm, el mínimo $-2,5279\text{e-}005$ mm y el valor promedio $-1,2865\text{e-}005$ mm, en tanto para Z la máxima deformación fue de $6,2244\text{e-}006$ mm, la mínima $-6,2258\text{e-}006$ mm y la promedio de $-1,316\text{e-}010$ mm.

Fig. 46 Deformación direccional X



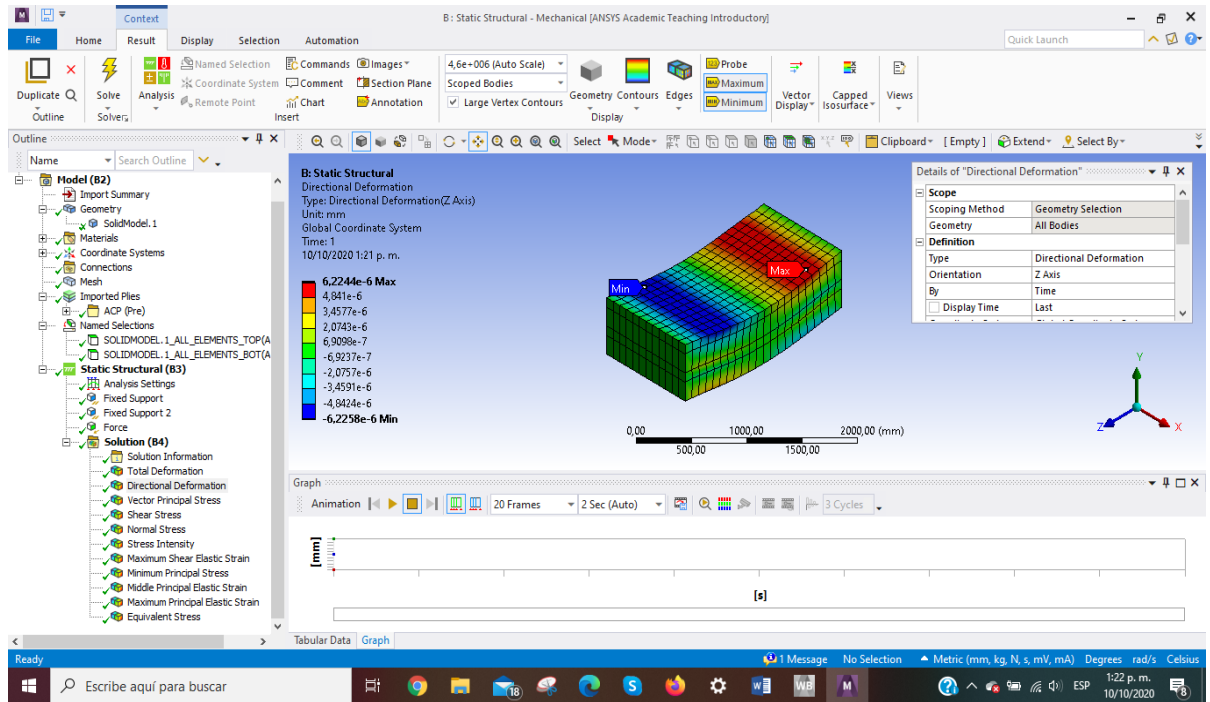
Fuente: Autores

Fig. 47 Deformación direccional Y



Fuente: Autores

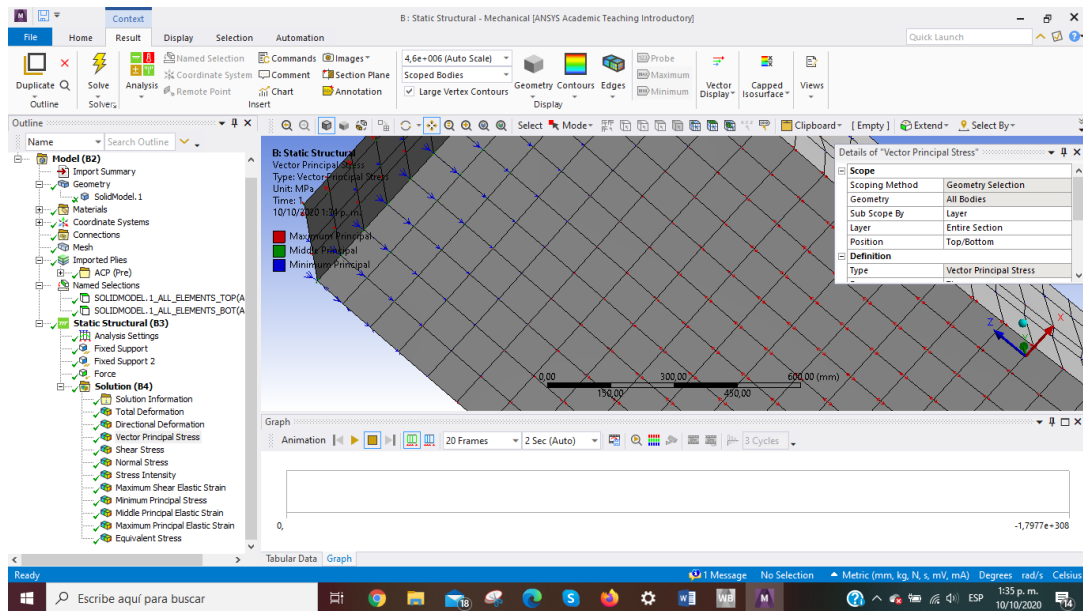
Fig. 48 Deformación direccional Z



Fuente: Autores

Vector del esfuerzo principal. En la figura 48 se presenta el vector del esfuerzo principal con respecto a las capas del material compuesto de Bioepoxi SuperSap 100/1000 y fibra de guadua en a totalidad de la geometría.

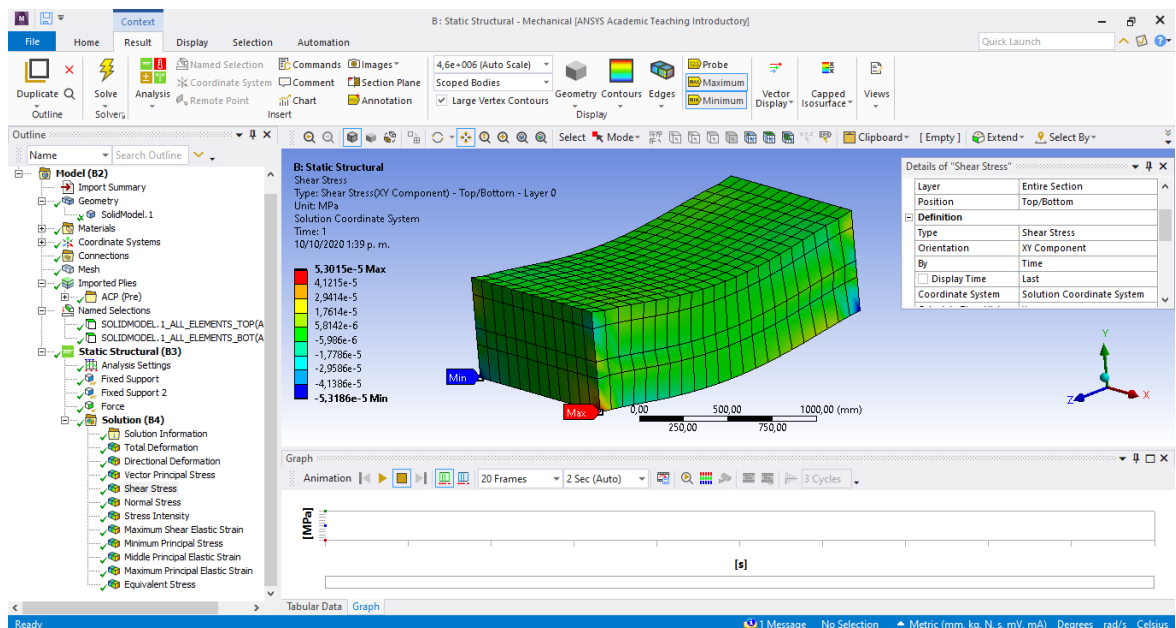
Fig. 49 Vector del esfuerzo principal



Fuente: Autores

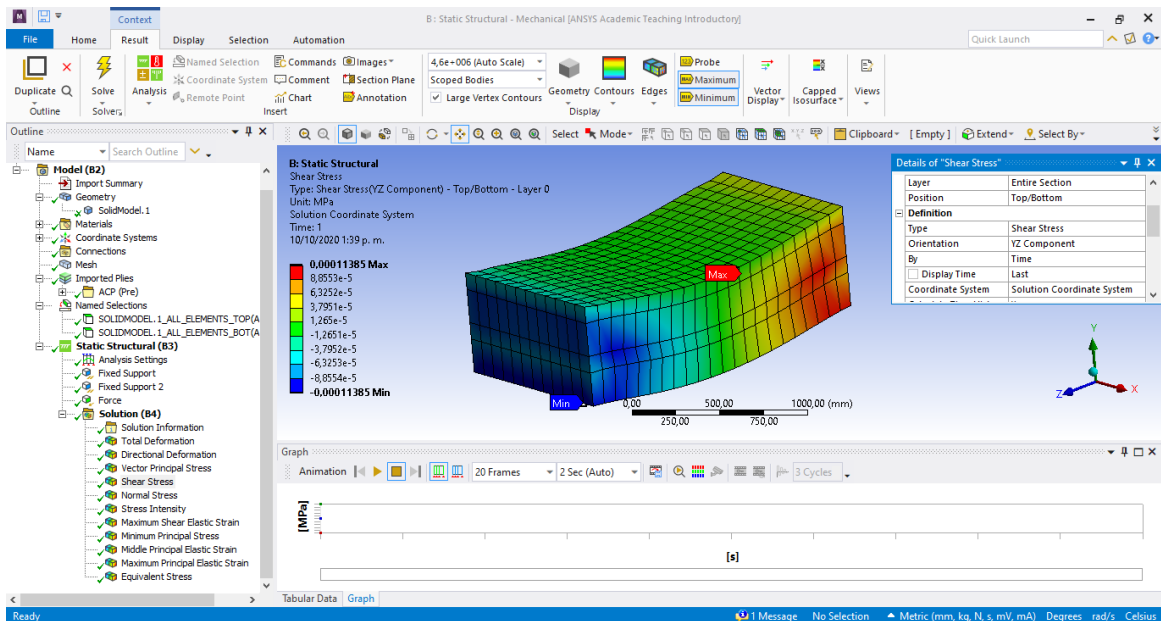
Esfuerzo cortante. Como se aprecia en las figuras 49, 50, y 51 el esfuerzo cortante producido en los diferentes planos arrojó valores máximos, mínimos y promedios a saber, XY: $5,3015e-005$ Mpa, $-5,3186e-005$ Mpa, $1,7144e-009$ Mpa; YZ: $1,1385e-004$ Mpa, $-1,1385e-004$ Mpa, $7,6154e-009$ Mpa; XZ: $1,0003e-005$ Mpa, $-1,0005e-005$ Mpa, $-6,1227e-010$ Mpa, siendo el alcance la geometría completa y el sub alcance cada capa. El color rojo indica el máximo esfuerzo cortante aplicado.

Fig. 50 Esfuerzo cortante XY



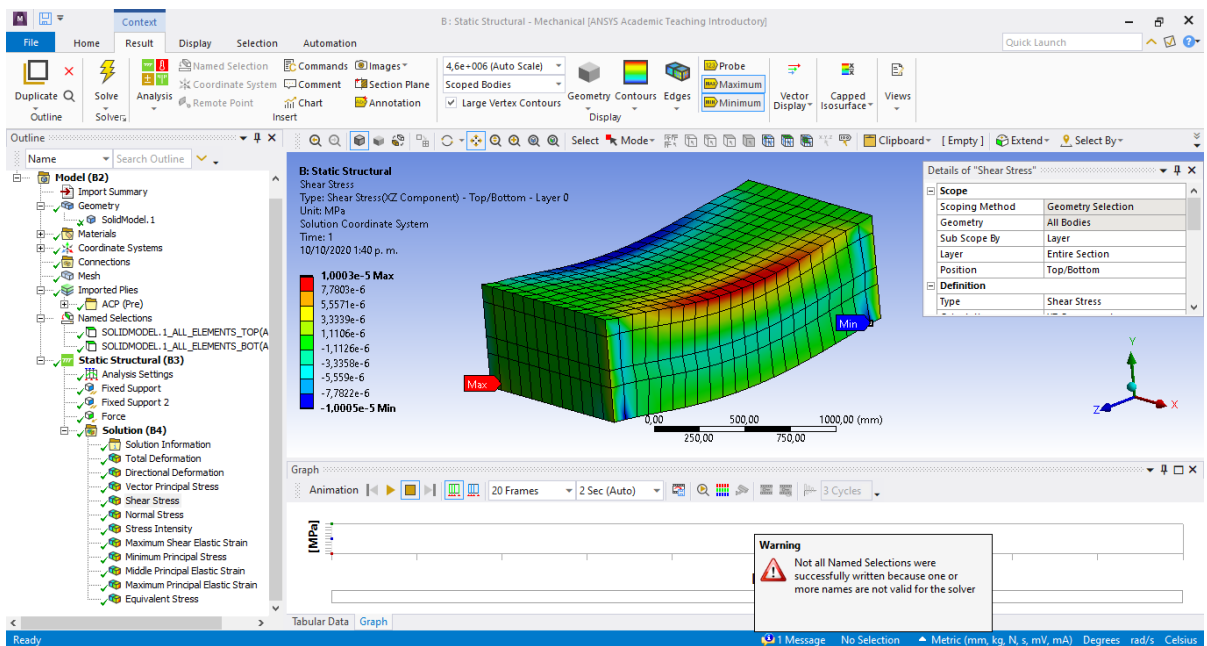
Fuente: Autores

Fig. 51 Esfuerzo cortante YZ



Fuente: Autores

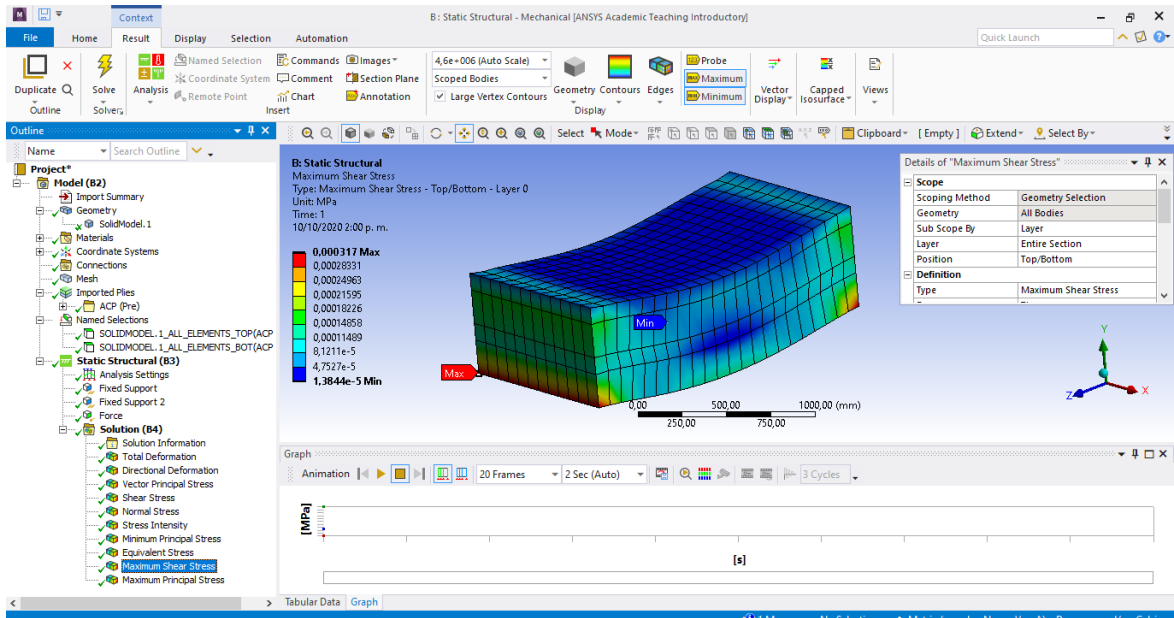
Fig. 52 Esfuerzo cortante XZ



Fuente: Autores

Máximo esfuerzo cortante. Los valores arrojados se encuentran el máximo en $3,17e-004$ Mpa, el mínimo $1,3844e-005$ Mpa y el promedio $2,2066e-005$ Mpa tal como se aprecia en la figura 52, siendo el alcance la geometría completa y el sub alcance cada capa, el color rojo indica la zona con el máximo esfuerzo cortante aplicado.

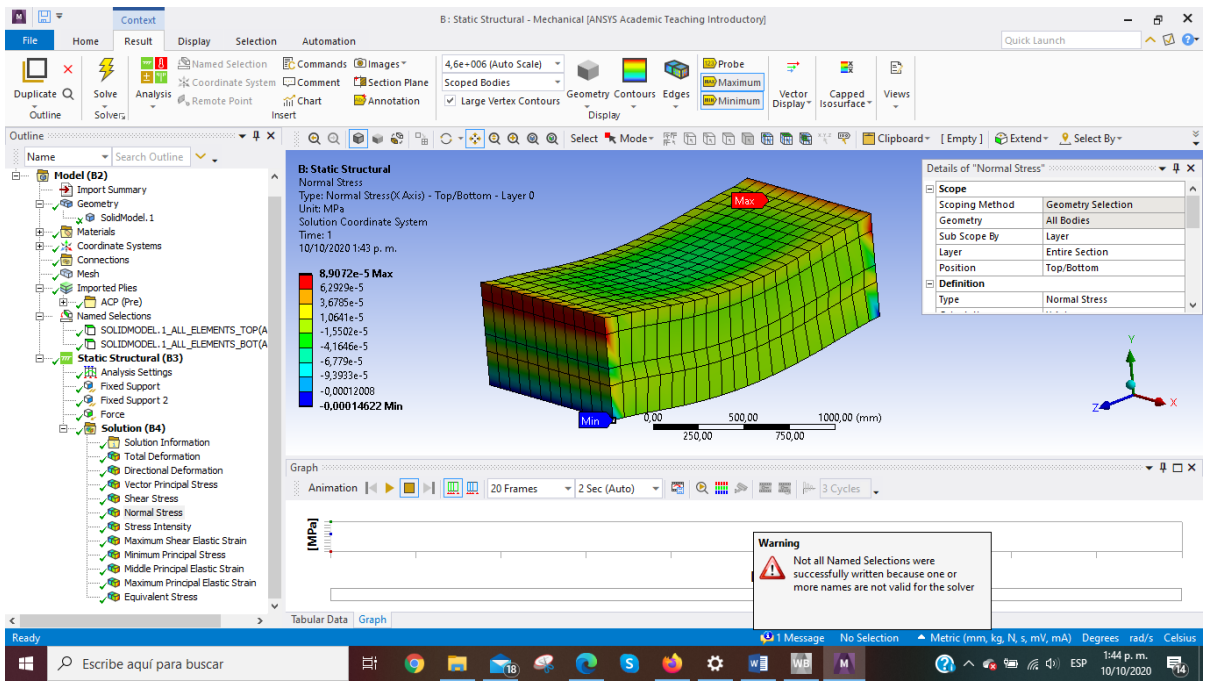
Fig. 53 Máximo esfuerzo cortante



Fuente: Autores

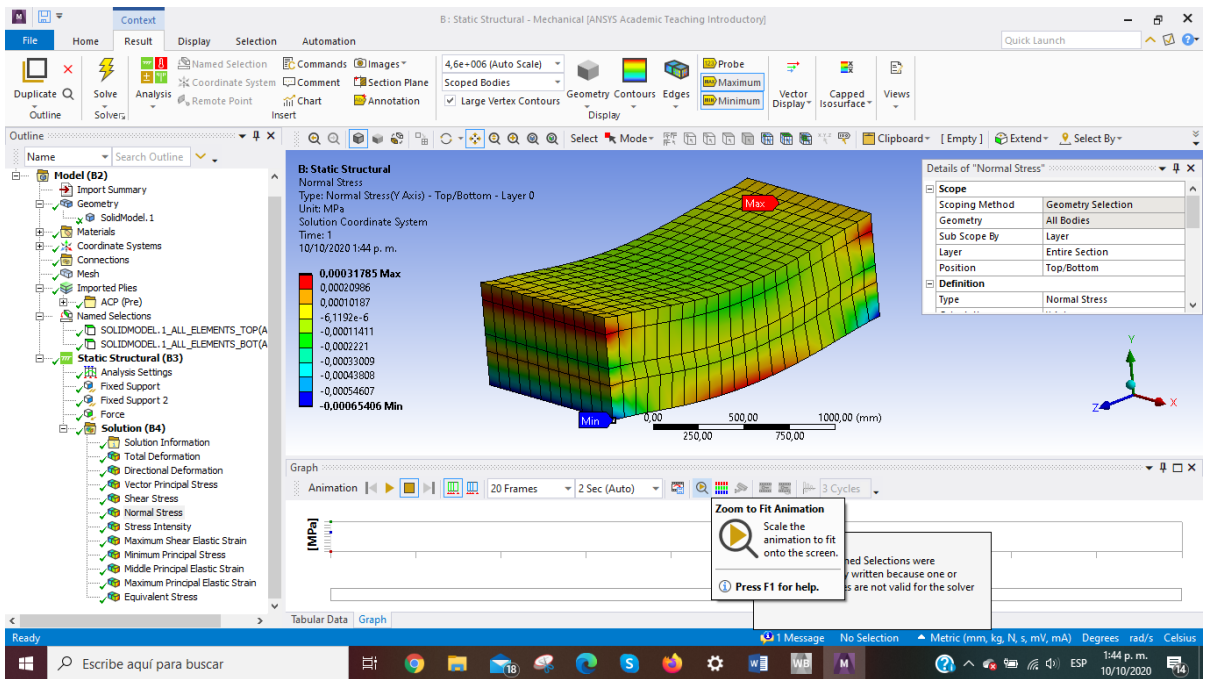
Esfuerzo Normal. En las figuras 53, 54, 55 se aprecian los resultados máximo, mínimo y promedio para el esfuerzo normal: $8,9072e-005$ Mpa, $-1,4622e-004$ Mpa, $-6,5017e-006$ Mpa con orientación X; $3,1785e-004$ Mpa, $-1,5326e-005$ Mpa, $-6,5406e-004$ Mpa para la orientación Y, $6,2767e-005$ Mpa, $-8,1019e-005$ Mpa, $-3,1476e-005$ Mpa en la orientación Z.

Fig. 54 Esfuerzo Normal X



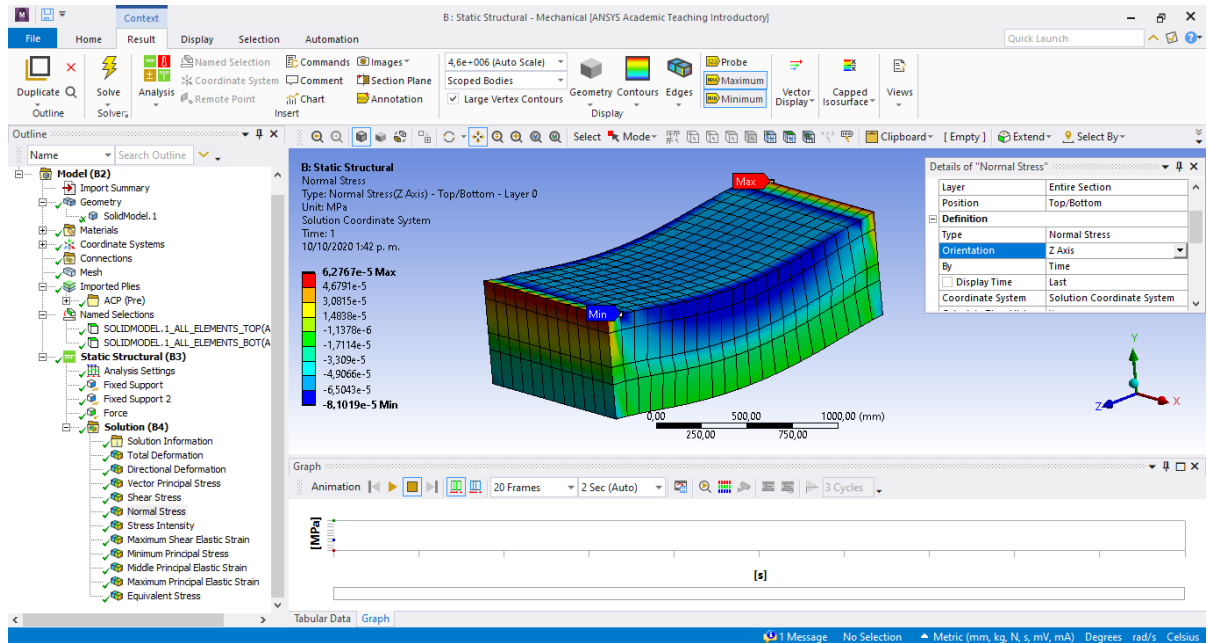
Fuente: Autores

Fig. 55 Esfuerzo Normal Y



Fuente: Autores

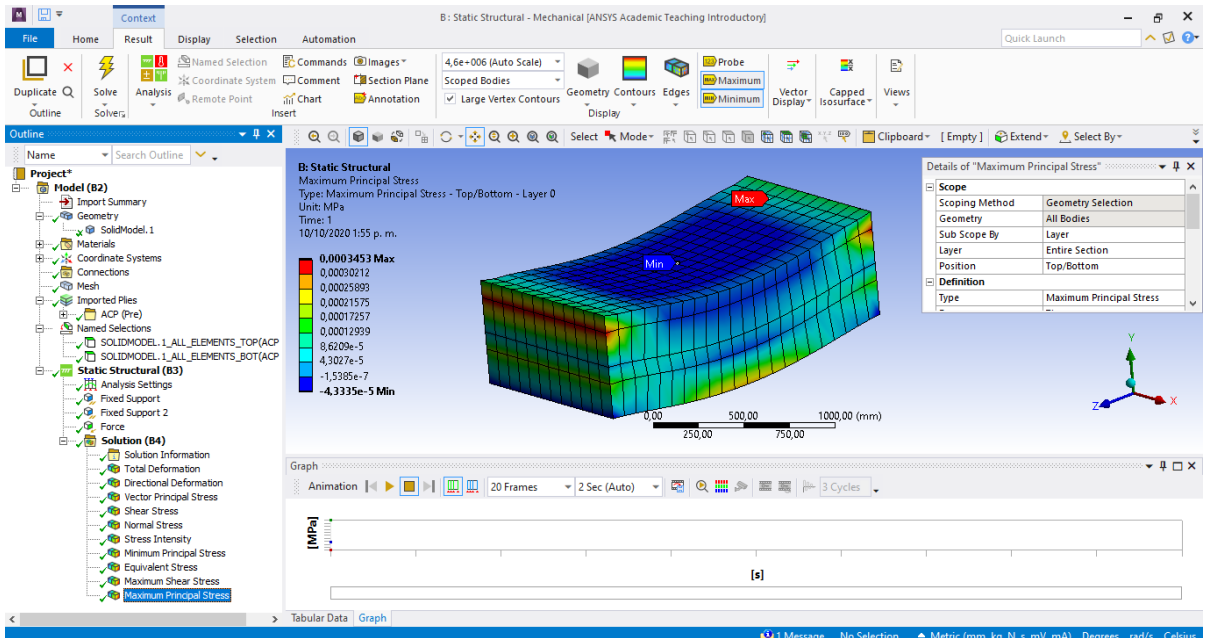
Fig. 56 Esfuerzo Normal Z



Fuente: Autores

Máximo esfuerzo principal. De acuerdo con la figura 56, el mayor valor para el máximo esfuerzo principal fue $3,453e-004$ Mpa, el mínimo $-4,3335e-005$ Mpa y el promedio $6,2829e-005$ Mpa. siendo el alcance la geometría completa y el sub alcance cada capa, el color rojo indica la zona con el mayor valor de esfuerzo principal máximo aplicado.

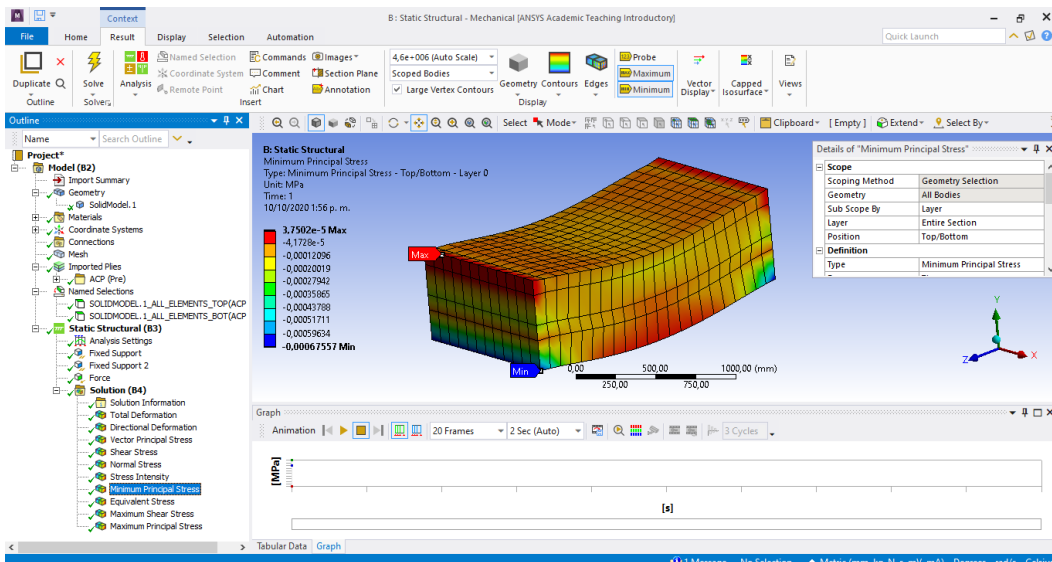
Fig. 57 Máximo esfuerzo principal.



Fuente: Autores

Mínimo esfuerzo principal. En la figura 57, se muestra la gráfica que indica las zonas con el mínimo esfuerzo principal aplicado de tal manera que dentro de este se registraron variaciones siendo la máxima registrada $3,7502e-005$ Mpa, mínima $-6,7557e-004$ Mpa y el promedio $-1,013e-004$ Mpa.

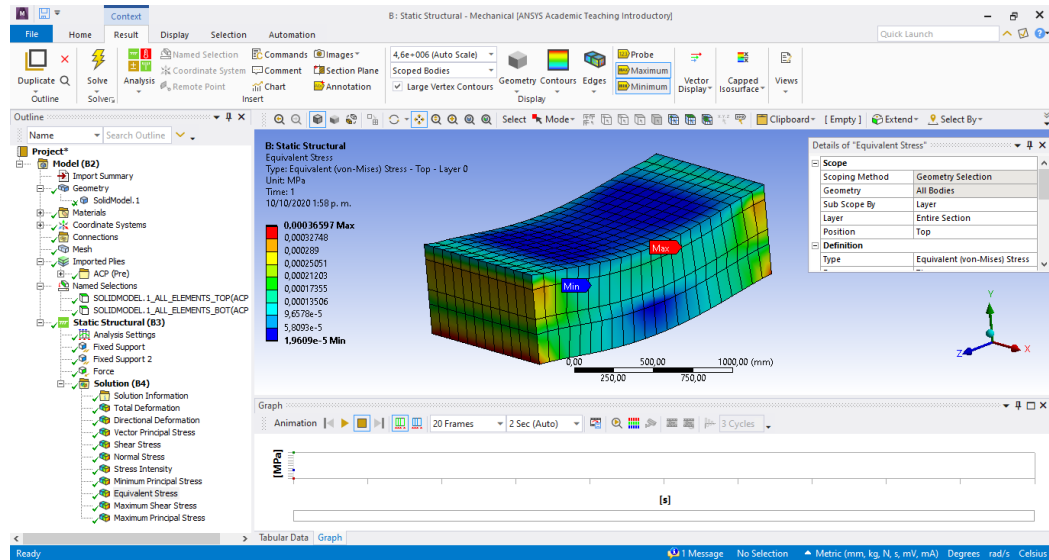
Fig. 58 Mínimo esfuerzo principal.



Fuente: Autores

Esfuerzo equivalente. Para este esfuerzo los valores fueron máximo 3,6597e-004 Mpa, mínimo 1,9609e-005 Mpa y promedio 1,2765e-004 Mpa. siendo el alcance la geometría completa y el sub alcance cada capa, el color azul indica la zona con el menor valor de esfuerzo tal como se aprecia en la figura 58.

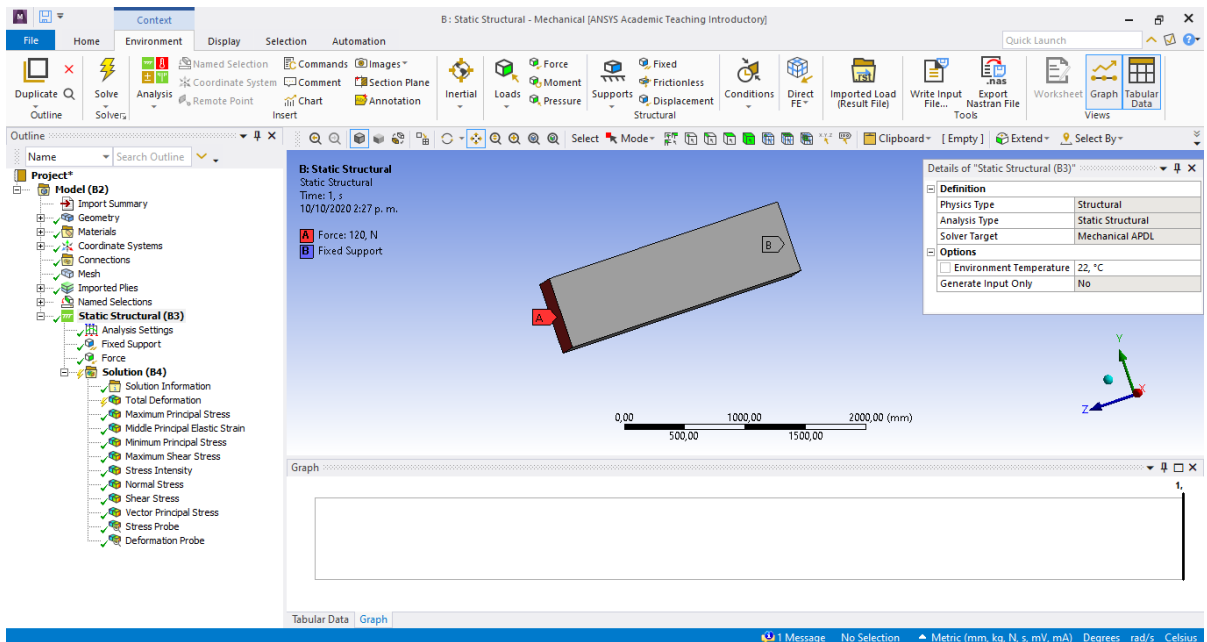
Fig. 59 Esfuerzo equivalente



Fuente: Autores

En otro orden de ideas, se presentan a continuación los resultados para la valoración que se realizó a la geometría del material compuesto de Bioepoxi SuperSap 100/1000 y fibra de guadua, sobre la cual se aplicó un soporte y una fuerza perpendicular al plano XY como se aprecia en la figura 59 en la sección Static Structural (B3)

Fig. 60 Soporte y una fuerza perpendicular al plano XY

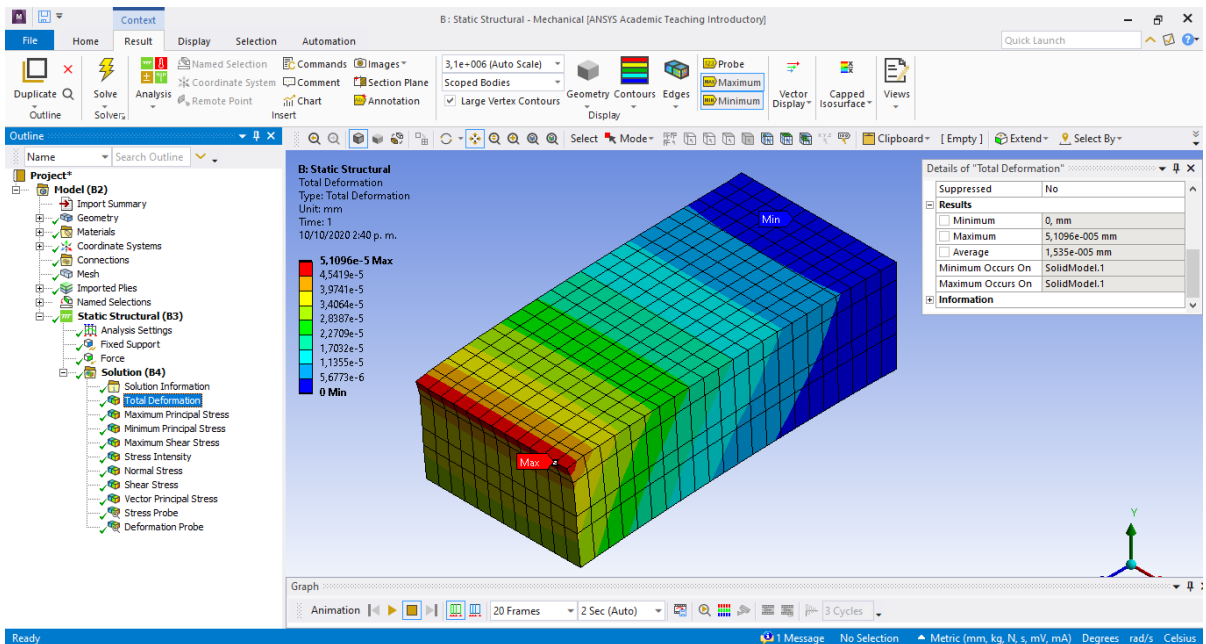


Fuente: Autores

Definida las variables de entrada para la simulación de la tracción aplicada a la mencionada geometría, se especificaron en la sección Solution (B4) las variables de solución (resultados) tal como se muestra en la figura 59, de las cuales se muestran los resultados a continuación con sus gráficos y resultados numéricos.

Deformación total. En la figura 60 se presenta la deformación sufrida por la geometría en su totalidad como consecuencia de la acción de una fuerza de tracción aplicada sobre la superficie XY alcanzando valor máximo $5,1096e-005$ mm, mínimo 0, mm, y promedio $1,535e-005$ mm.

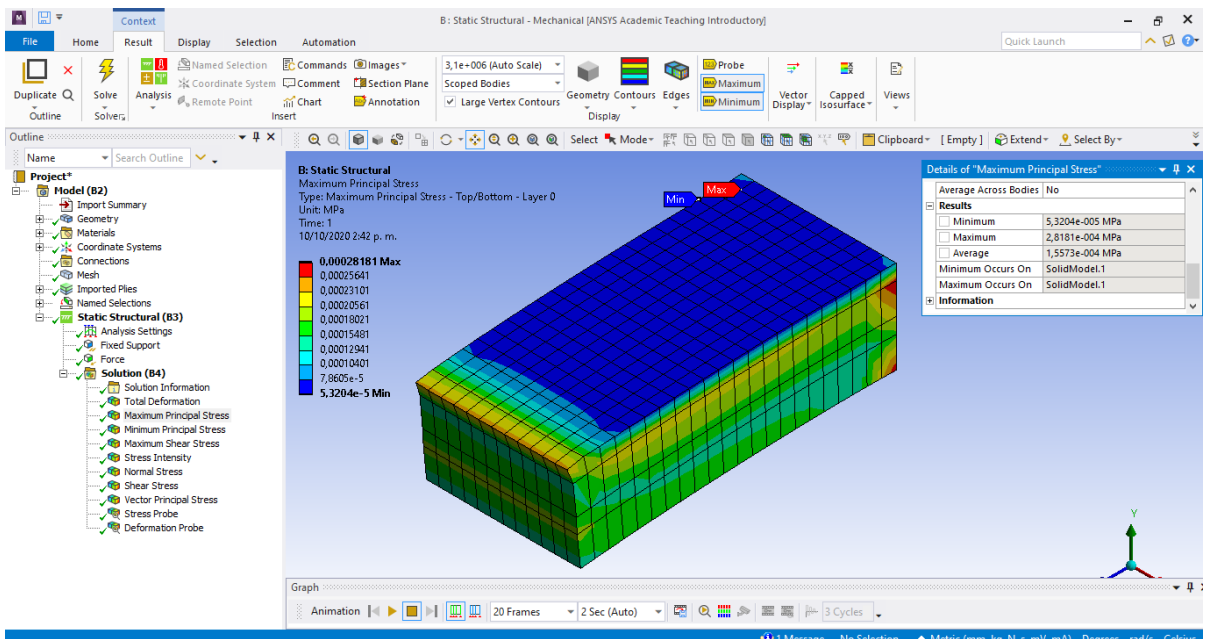
Fig. 61 Deformación total



Fuente: Autores

Máximo esfuerzo principal. Como se aprecia en la figura 61, los valores alcanzados en la simulación para este tipo de esfuerzo fueron máximo 2,8181e-004 Mpa, mínimo 5,3204e-005 Mpa y promedio 1,5573e-004 Mpa, considerando como objeto de análisis la geometría y como sub análisis cada capa, mostrándose las zonas rojas como aquellas donde se produjo el máximo esfuerzo principal.

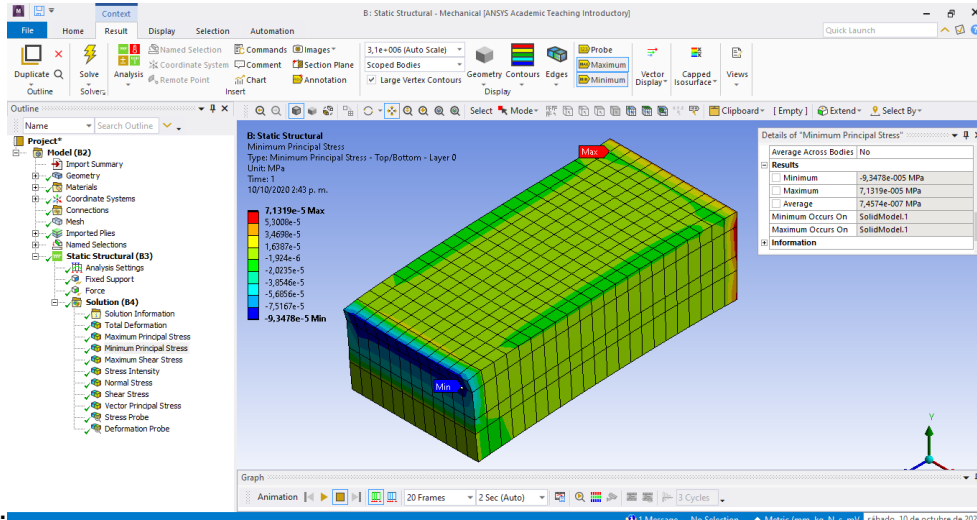
Fig. 62 Máximo esfuerzo principal



Fuente: Autores

Mínimo esfuerzo principal. Los valores registrados fueron el máximo $7,1319\text{e-}005$ Mpa, mínimo $-9,3478\text{e-}005$ Mpa y promedio $7,4574\text{e-}007$ Mpa, los cuales se ven reflejados en la figura 62 siendo la zona azul donde ocurrió el mínimo esfuerzo principal en la geometría de acuerdo a cada capa.

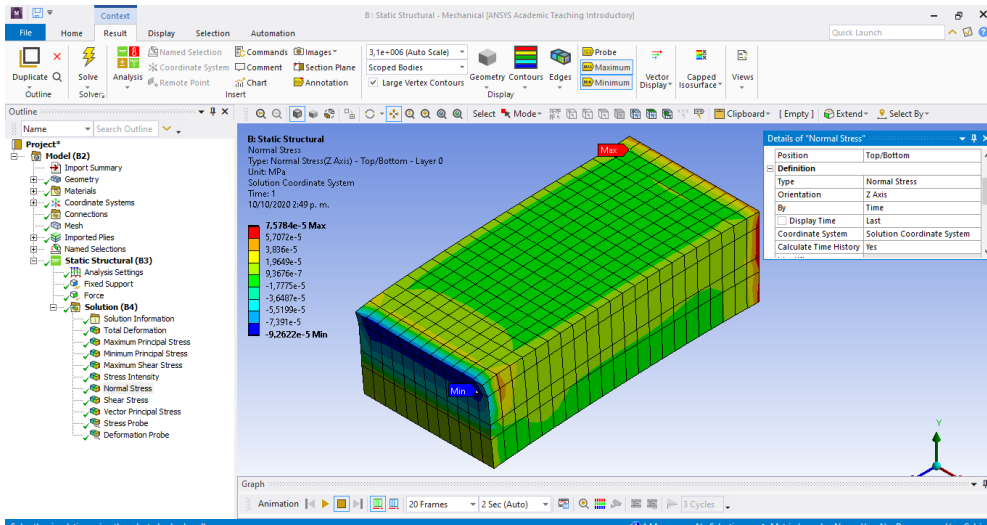
Fig. 63 Mínimo esfuerzo principal.



Fuente: Autores

Esfuerzo normal. De acuerdo con la figura 63, el máximo esfuerzo llegó a registrarse en $7,5784\text{e-}005$ Mpa, el mínimo en $-9,2622\text{e-}005$ Mpa para un promedio de $2,7433\text{e-}006$ Mpa. Siendo el alcance la geometría con un subalcande de cada capa, de tal forma que la leyenda junto a la geometría describe las zonas con sus respectivos colores y valores del esfuerzo en cuestión.

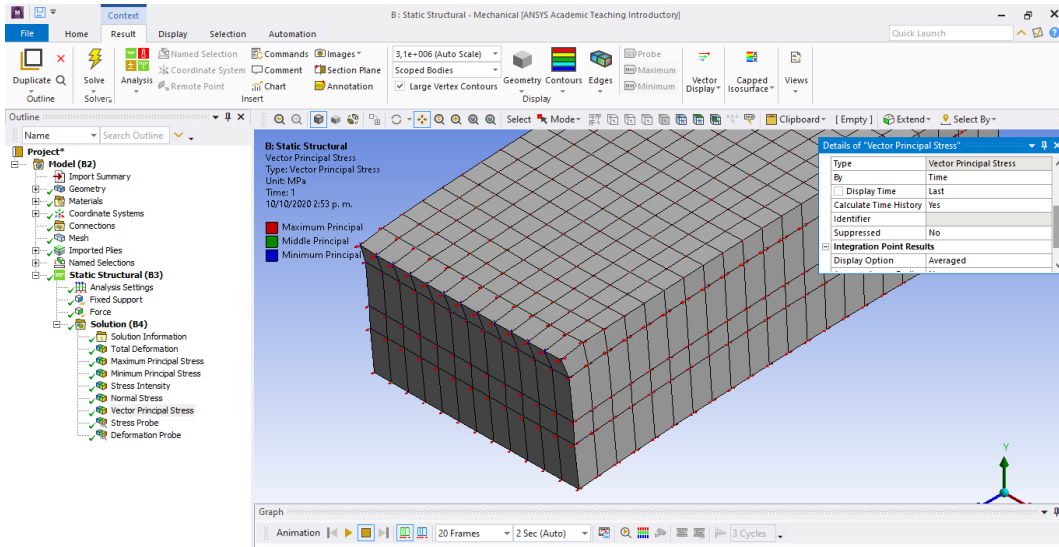
Fig. 64 Esfuerzo normal



Fuente: Autores

Vector del esfuerzo principal. En la figura 64 se aprecia el vector del esfuerzo principal representado en cada nodo y cada capa a lo extenso de la geometría indicando la dirección y sentido del mismo, tanto en su valor máximo, mínimo y promedio con flechas de colores rojo azul y verde respectivamente.

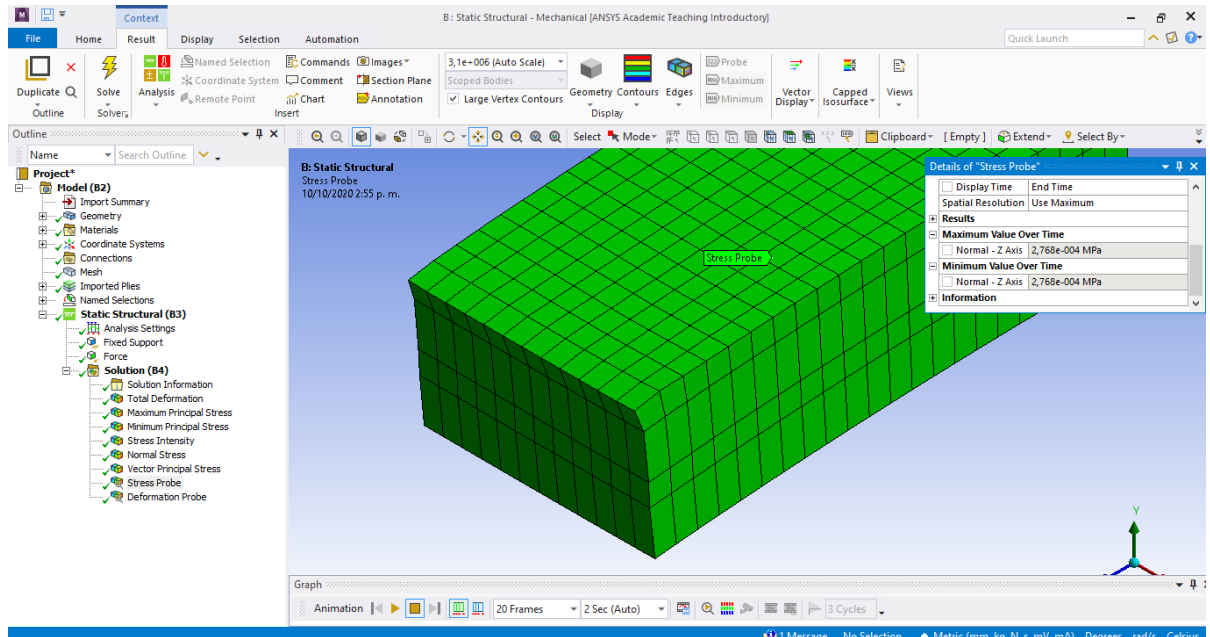
Fig. 65 Vector del esfuerzo principal



Fuente: Autores

Prueba de esfuerzo. El programa Ansys contiene una prueba de esfuerzo, en la cual se evalúa el esfuerzo con respecto al tiempo, según figura 65 para lo cual se obtuvo en la orientación Z el máximo valor de $2,768 \times 10^{-4}$ Mpa y el mínimo de $2,7433 \times 10^{-6}$ Mpa, prueba que se realizó sobre la geometría completa. El valor del tiempo empleado fue 1 segundo.

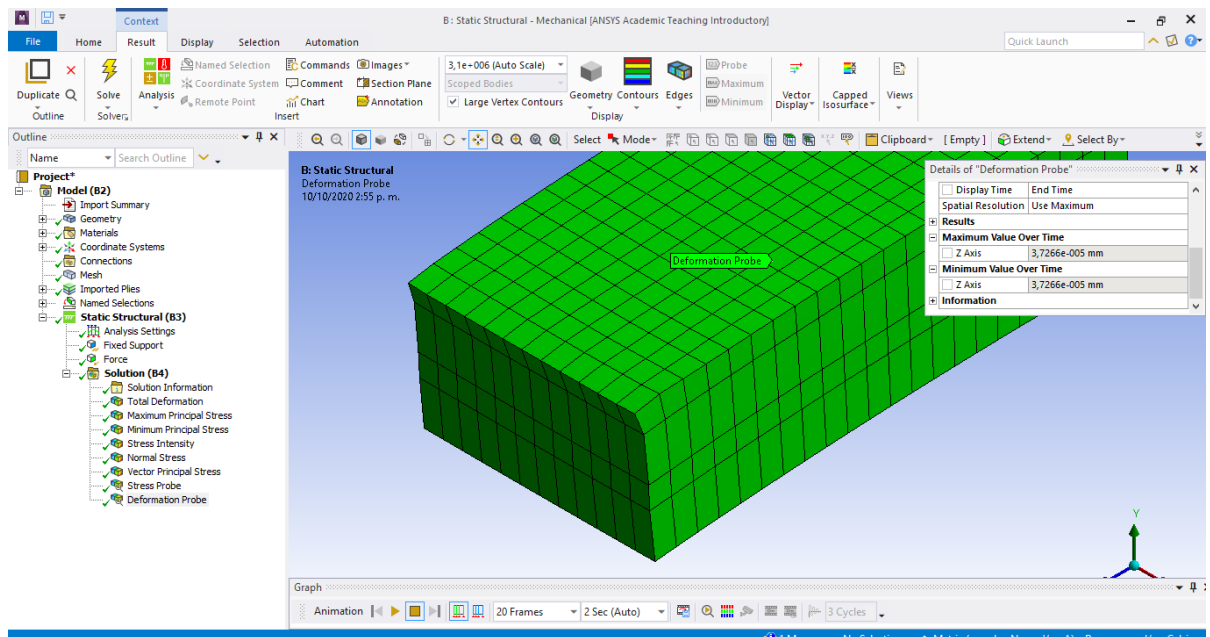
Fig. 66 Prueba de esfuerzo.



Fuente: Autores

Prueba de deformación. El programa Ansys incluye una prueba de deformación la cual se aplicó en la orientación Z, según figura 66. obteniendo el máximo y mínimo valor del esfuerzo con respecto al tiempo de $2,768e-004$ mm y $3,7266e-005$ mm respectivamente. El valor del tiempo empleado fue 1 segundo.

Fig. 67 Prueba de deformación.



9.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El empleo de la herramienta computacional Ansys permitió la construcción en dimensiones reales de una geometría constituida por un material compuesto Bioepoxi SuperSap 100/1000-fibra de guadua, cuyas organización y disposición de las capas fue logrado mediante Ansys ACP, lo que permitió configurar un material con características propias tanto mecánicas como polares y a su vez ser evaluada ante la aplicación de fuerzas que crearon las condiciones de flexión y de tracción, lo que permitió adquirir experiencia de manera rápida con un bajo costo y sin poner en riesgo la geometría construida, prediciendo cómo se comportará sin la necesidad de tenerla físicamente para probarla, disminuyendo Costos y tiempo y ofreciendo resultados apegados a las condiciones reales de la geometría que podría colocarse en funcionamiento, en tal caso se logró un prototipo físico y ver lo que sucedió ante los esfuerzos de flexión y torsión antes de entrar a formar parte de una estructura, de tal manera que el beneficio radicó en evaluar opciones digitalmente para que al llegar a dicha etapa sea posible reducir la posibilidad de que se presenten defectos.

En tal sentido el material Compuesto obtenido, se constituyó por cuatro capas alternas de Bioepoxi SuperSap 100/1000 y Fibra de Guada, la primera de 0,1 mm y la segunda de 0,2 mm de espesor y con igual valor de ángulos entre capas, cuyas características ante los esfuerzos de flexión y tracción fueron las que se aprecian en las tablas 8 y 9.

Tabla 8 Propiedades obtenidas ante el comportamiento de flexión promedio

Deformación total 1,3229e-005 mm
Deformación direccional:
X= -5,6651e-011 mm
Y= -1,2865e-005 mm
Z= -1,316e-010 mm
Esfuerzo cortante
Plano XY: 1,7144e-009 Mpa
Plano YZ: 7,6154e-009 Mpa
Plano XZ: -6,1227e-010 Mpa
Máximo esfuerzo cortante: 2,2066e-005 Mpa
Módulo de rotura: 3,9852e-005 Mpa
Esfuerzo Normal: -6,5406e-004 Mpa
Máximo esfuerzo principal: 6,2829e-005 Mpa
Mínimo esfuerzo principal: -1,013e-004 Mpa

Esfuerzo equivalente: 1,2765e-004 Mpa

Fuente: Autores

Tabla 9 Propiedades obtenidas ante el comportamiento de tracción promedio

Deformación total: 1,535e-005 mm

Máximo esfuerzo principal: 1,5573e-004 Mpa

Mínimo esfuerzo principal: 7,4574e-007 Mpa

Esfuerzo normal: 2,7433e-006 Mpa

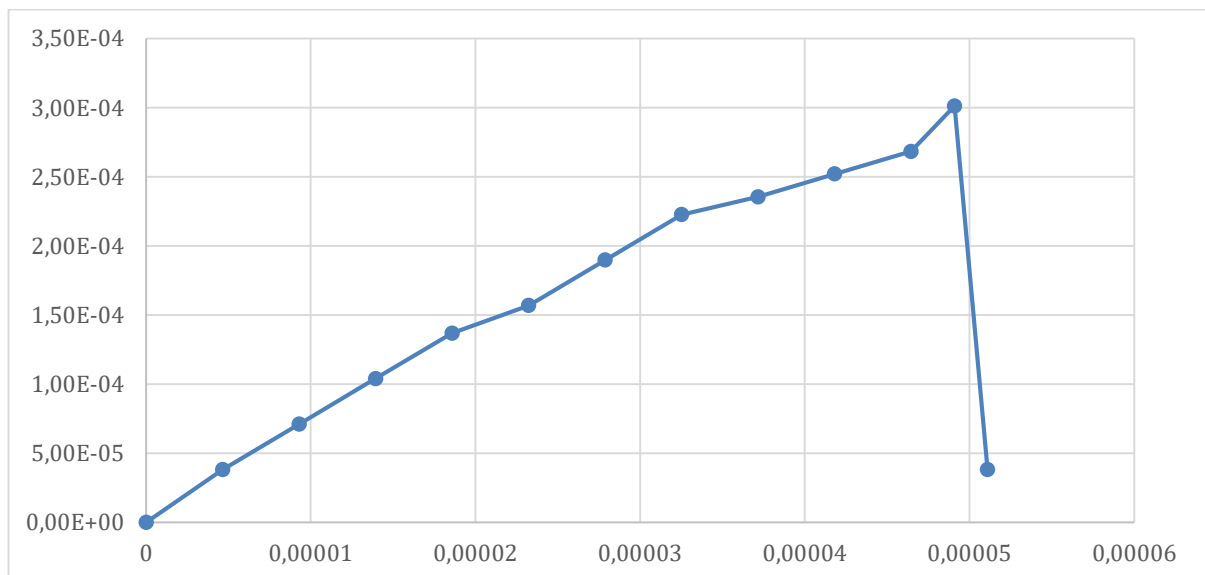
Prueba de esfuerzo: 2,7433e-006 Mpa en 1 s

Prueba de deformación: 3,7266e-005 mm en 1 s

Fuente: Autores

Así, Partiendo de las propiedades de esfuerzo y deformación obtenidas con el programa Ansys, se construyó la curva esfuerzo-deformación para el material compuesto Bioepoxi SuperSap 100/1000-fibra de guadua, tal como se presenta en la Gráfica 1, donde el esfuerzo último antes de la fractura corresponde a 3,8267E-05 Mpa. Adicionalmente conociendo las dimensiones de la geometría y el esfuerzo aplicado se calculó el módulo de Young $E = \sigma / \epsilon$, donde σ es tensión uniaxial o fuerza uniaxial por superficie de la unidad, en pascal y ϵ es deformación o deformación proporcional (esto quiere decir el cambio de longitud dividido por la longitud original), obteniendo $E = 4,3056E+06$

Gráfica 1 Curva Esfuerzo-Deformación



Fuente: Autores

De esta forma, el material se comporta con las características de deformación comunes de los materiales epóxicos con fibras naturales, de tal forma que en el análisis de flexión se obtuvo el módulo de rotura y en el de tracción el módulo de Young así como la curva esfuerzo-deformación, sin embargo el mayor aporte del programa Ansys en la caracterización del material compuesto de Bioepoxi SuperSap 100/1000 - fibra de guadua es que al analizar el comportamiento mecánico, el resultado gráfico indica las zonas donde se aplican los esfuerzos y deformaciones con indicadores de colores, lo que facilita interpretar las interacciones con mayor precisión en lugar de orientar el diseño con valores puntuales obtenidos de una probeta en laboratorio.

Al estudiar el comportamiento de flexión, se aprecia que la zona de mayor deformación es en el plano ZX donde se aplica la fuerza flexora y en todas las capas, mientras la mayor deformación direccional en X y Z sólo se presenta en la capa del plano 0, correspondiente a Bioepoxi SuperSap 100/1000 pero la máxima deformación en Y se presenta en todas las capas de la superficie XY. En tanto el máximo esfuerzo principal se ve distribuido en toda la geometría siendo su menor valor en la superficie ZX donde se aplica la fuerza flexora apreciándose su vector en esa zona con esfuerzos de compresión en cada nodo de la malla, mientras en el plano contrario se aprecia tracción en los nodos concentrándose en esta zona la mayor intensidad del esfuerzo principal.

Por otra parte, para el comportamiento a tracción de la geometría se apreció la mayor deformación en la arista superior del plano XY, correspondiente al plano 0 capa de Bioepoxi SuperSap 100/1000, sin embargo, allí, el esfuerzo máximo principal obtuvo un valor cerca de su promedio, cuyo vector indica entre las capas esfuerzos de compresión y tracción, mientras el mínimo esfuerzo principal y el esfuerzo normal encontraron su menor valor en esa zona. Por otra parte, las pruebas de deformación y esfuerzo permitieron tener la referencia en el tiempo de 1 del comportamiento del material.

10. ESTRATÉGIAS DE TRANSFERENCIA DE RESULTADOS

La presente investigación busca fortalecer la formación en investigación de estudiantes y profesores fomentando la generación y transferencia de conocimiento. Para ello propone las siguientes estrategias:

- Apoyar en la investigación de tesis y trabajos de grados de estudiantes fomentando la inclusión de los resultados y análisis de los mismos.
- Incitar a la formulación y ejecución de proyectos de innovación en Ingeniería mediante softwares.
- Participación en congresos como el Coniiti 2021 con el fin de compartir conocimiento a los interesados.

11. CONCLUSIONES

Luego de determinar los métodos que hacen parte de la metodología y para continuar con la simulación del material compuesto, a partir de la revisión bibliográfica se seleccionó el software ANSYS basado en que: a) muchos estudios de materiales compuestos se realizan con este software, b) permite solucionar problemas complejos de ingeniería estructural, c) permite tomar mejores decisiones de diseño y además, de forma rápida y d) al decidir el uso del método de elementos finitos para el análisis de calidad del material, este software lo usa para la simulación, mediante la producción de forma virtual de la geometría para someterlas a cargas y restricciones. Con lo anterior se pudo concluir que este sistema aporta ventajas tales como resultados rápidos y confiables para muchas aplicaciones de ingeniería, permitiendo así reducir costos, especialmente para en los ensayos físicos.

De la misma forma, con el análisis realizado por elementos finitos mediante el software ANSYS se puede concluir que, se lograron obtener resultados más precisos y con este se comprobó la acción que cumplen las fibras de Guadua en una matriz polimérica, siendo un material que ayuda a otros materiales a mejorar características, como la resistencia, pensando en una aplicación real. De acuerdo con lo anterior se puede concluir que las fibras de guadua tienen muy buenas propiedades para reforzar otros materiales, pero con la investigación numérica que aquí se presentó.

El programa Ansys resulta una herramienta efectiva para la constitución de nuevos materiales compuestos, como en esta oportunidad permitió configurar las capas de material logrando obtener un material nuevo con propiedades particulares, que a su vez fueron medidas de acuerdo al método de elementos finitos en el cual se basa dicho programa.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente se concluye que es de gran importancia la utilización e investigación de nuevos materiales compuestos a partir de fibras de Guadua Angustifolia Kunth ya que pueden llegar a contribuir en la mitigación del impacto ambiental.

Finalmente se concluye que las fibras de Guadua Angustifolia Kunth son elementos naturales con un alto comportamiento estructural y se recomienda su uso para conformar materiales compuestos, dando así la oportunidad de mejorar la industria colombiana con la reducción de emisiones contaminantes producidas por los materiales usados actualmente en los proyectos de ingeniería y lo expuesto en el párrafo anterior.

12.RECOMENDACIONES

Después de conocer las propiedades del material compuesto de fibras de Guadua Angustifolia Kunth y de realizar la simulación en el software, se sugiere revisar la posibilidad de implementar este material de manera sostenible en proyectos de ingeniería. Especialmente, hacer los análisis iniciales mediante el uso de la simulación a través del software especializado que permitan determinar el comportamiento mecánico de un material compuesto sin necesidad de realizar ensayos de laboratorio, disminuyendo así los costos de estos ensayos. Se puede decir que la metodología aplicada para este caso es empleable para futuros trabajos o para otros tipos de materiales compuestos similares.

Se recomienda realizar una prueba de laboratorio con las especificaciones mencionadas en el trabajo de investigación, con el objetivo de comprobar los resultados obtenidos en la simulación y concluir así si es posible o no, la utilización de este material compuesto de fibras de guadua Angustifolia Kunth en futuros proyectos de ingeniería. Para esto es importante contar con equipos de laboratorio que permitan validar de una mejor manera los procesos de simulación en diferentes problemas, así se garantiza que la simulación obtenida del software es fiable.

Se recomienda realizar más investigaciones con resina epóxica reforzada con fibras de guadua Angustifolia kunth. pero con diferentes porcentajes de adición, es decir, que se adicionen más del 1% de fibras, para comprobar si con más cantidad sea viable este material compuesto.

También se recomienda incluir como refuerzo fibras de Guadua Angustifolia Kunth en otros materiales compuestos que puedan ser utilizados en obras de ingeniería y realizar la comparación de características resultantes, e incluso usar los valores relacionados en el presente proyecto para comparar y proponer mejores compuestos.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. S. Á, «Desarrollo de un material compuesto de fibras de henequén utilizando una matriz termofija,» Scielo, 2014.
- [2] N. Consultans, «Materiales Copuestos,» Le 4 pages des Statistiques Industrielles , 2002.
- [3] A. Besednjak, «Los materiales compuestos,» 2012.
- [4] Á. C. García, «Materiales poliméricos,» Málaga, 2012.
- [5] J. M. M. B. & M. V. B. R. Jordi Payá Bernabeu, «Materiales compuestos 05,» Valencia, 2005.
- [6] A. S. I. Z. María P. Lucena, «DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DE FIBRAS DE BAMBU PARA,» 2009.
- [7] H. P. y. J. L. Kong C, « Study on structural design and analysis of flax natural fiber composite tank manufactured by vacuum assisted resin transfer molding,» 2014, Materials Letters.
- [8] M. S. J. L. V. & D. D. B. Angel Rodriguez Soto, «Fabricación de compuesto de matriz epoxi reforzado con fibras largas de henequén orientadas aleatoriamente,» 2015.
- [9] J. D. S. Benitez, «Simulación del estado de orientación de fibras cortas de Guadua de un Biomaterial compuesto: PP-GAK modelado por inyección mediante sistemas CAD-CAE,» Universidad Politécnica Salesiana , Cuenca, 2015.
- [10] G. Mirlisenna, «Blog ESSS,» 22 01 2016. [En línea]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>. [Último acceso: 04 06 2020].
- [11] A. Jiménez Pérez Mitre, «Análisis y optimización con interacción de Dummy, de la carrocería del automóvil “Tubolare SAND CAR” de Tecnoidea SA de CV, en impacto frontal empleando el método de elementos finitos en ALGOR FEA, mediante la simulación de eventos mecánicos.,» Universidad de las Américas Puebla, 2004.
- [12] M. A. Maleque, «MECHANICAL PROPERTIES STUDY OF PSEUDO-STEM BANANA FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITE,» 2006.
- [13] A. M. L. Llanes, «Compuesto de fibra de fique reforzado con resina epóxica,» Universidad de los Andes, Bogotá, 2010.
- [14] J. S. Gómez, «DISEÑO DE UN MATERIAL COMPUESTO CON FIBRA NATURAL PARA SUSTITUIR LA UTILIZACIÓN DE LA FIBRA DE VIDRIO,» DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO, Medellín, 2009.

- [15] S. M. V. Restrepo y G. J. P. A. & D. H. G. Vásquez, «Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos,» Informador técnico , Colombia, 2016.
- [16] J. S. G. P, «Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio,» Universidad Eafit, Medellín, 2009.
- [17] E. B. R. Ramirez, «Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de la guadua *Angustifolia Kunth* como material estructural de eje para prótesis transtibial».
- [18] B. Gardiner, P. Berry y B. Moulia, *Bamboo (Guadua angustifolia 'Kunth') show*, Researchgate, 2016.
- [19] J. Osorio, J. Vélez y H. Ciro, «Determinación de la relación de Poisson de la guadua *angustifolia kunth* a partir de procesamientos de imágenes y su relación con la estructura interna.,» *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 60, nº 2, pp. 4067-4076, 2007.
- [20] J. A. OSORIO, M. J. VÉLEZ y H. J. CIRO, *Estructura interna de la guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas*, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2019.
- [21] W. Guo, F. Bao y Z. Wang, *Biodegradability of wood fiber/poly(lactic acid) composites*, Journal of Composite Materials, 2012.
- [22] Terraguadua, «Características Morfológicas,» 2012. [En línea]. Available: <https://terraguadua.webnode.es/la-guadua/morfologia/>.
- [23] Universidad del Tolima, «Guadua,» [En línea]. Available: http://maderas.ut.edu.co/transformacion/pagina_tra_especie.php?especie=GUADUA.
- [24] C. Aguirre, *Efectos de la radiación UV en presencia de humedad y temperatura en la guadua*, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2018.
- [25] J. Gonzalez, *Cultivo del Bambú*, Agrotendencia, 2018.
- [26] Arquigráfico, «El Bambú en la Construcción,» [En línea]. Available: <https://arquigrafico.com/el-bambu-en-la-construccion/>.
- [27] G. Teneche, «Guadua Bambu Colombia,» 19 03 2013. [En línea]. Available: <https://guaduabambucolombia.com/2013/03/19/partes-de-la-guadua-angustifolia-kunth/>.
- [28] F. R. y. A. M. y. J. C. M. Estrada, «Caracterización mecánica de las fibras del bambú colombiano,» 2019. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/281294505_Caracterizacion_mecanica_de_las_fibras_del_bambu_colombiano_Guadua_angustifolia.
- [29] EcoHabitar, «EcoHabitar,» 2019. [En línea]. Available: <https://ecohabitar.org/la-guadua-una-maravilla-natural-de-grandes-bondades/>.

- [30] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, «Norma Técnica E 100 Bambú,» Perú.
- [31] Reyes, Irina, «El bambú: Recurso renovable y sostenible para el diseño y construcción,» Santa Clara. Villa Clara. Cuba, 2013.
- [32] F. M. Azcarate, «Blogger,» 2015. [En línea]. Available: <https://programadetextilizacion.blogspot.com/2015/01/capitulo-5-maria-de-perinat-1997-2000.html>. [Último acceso: 03 06 2020].
- [33] P. G. Velásquez, « Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos,» Informador técnico (Colombia), Antioquia, 2016.
- [34] A. F. G. Aponte, «Caracterización físico-mecánica de la guadua en el municipio de guaduas-cundinamarca,» 2016.
- [35] S. H. Riveros, «ESTANDARIZACION DEL PROCESO DE OBTENCION DE FIBRA DE ANGUSTIFOLIA KUNTH COMO MATERIA PRIMA PARA MATERIAL COMPUESTO,» 2017. [En línea]. Available: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/10718/2018Hurtadosergio.pdf?sequence=1>.
- [36] C. F. R. Gálvez, «Análisis de las Propiedades Mecánicas de la Guadua Expuesta y no Expuesta a Rayos UV mediante Técnicas Estadísticas,» 2019. [En línea]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24351/1/An%C3%A1lisis%20de%20las%20propiedades%20mec%C3%A1nicas%20de%20la%20guadua%20expuesta%20y%20no%20expuesta%20a%20rayos%20UV%20mediante%20t%C3%A9cnicas%20estad%C3%ADsticas.pdf> .
- [37] J. V. y. H. C. J. Osorio, «Estructura Interna de la Guadua y su Incidencia en las Propiedades Mecánicas,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n153/a09v74n153.pdf> .
- [38] J. Isaac, «Determinación del estado de orientación de fibras cortas, mediante procesamiento digital de imágenes en un compuesto termoplástico polipropileno/bambú. Modelado por inyección,» [En línea].
- [39] N. Pantoja, «RESISTENCIA AL CORTE PARALELO A LA FIBRA DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA,» 2006. [En línea]. Available: https://www.usmp.edu.pe/centro_bambu_peru/pdf/Resistencia_corte_paralelo_fibra.pdf.
- [40] L. O. y. E. D. L. R. L. Moreno, «Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de guadua angustifolia,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/852/85202009.pdf> .
- [41] A. Gil, «Resinas de Poliéster,» Eafit, Bogotá, 2012.
- [42] C. L, «Resinas Castro L,» 2012.
- [43] Construmática, «Resina fenólica,» 2020.

- [44] M. Escobar, «Materiales compuestos: Resinas epoxi como matriz,» nanotubo, 2020.
- [45] EpoxeMex, «Resinas epóxicas,» 2020.
- [46] R. Forero, «TÉCNOLOGÍA DEL PLÁSTICO,» Agosto 2007. [En línea]. Available: <http://www.plastico.com/temas/Las-fibras-naturales-en-los-materiales-plasticos-compuestos+3057872?pagina=2>.
- [47] Ingenemecánica, «Estudio de los materiales compuestos,» 2018.
- [48] L. E. V. Jaramillo, «Obtención experimental de un material biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de guadua angustifolia proveniente del ecuador,» 2013.
- [49] ASTM, «ASTM 3039,» 2017.
- [50] Civilgeeks, «Civilgeeks.com,» 27 09 2011. [En línea]. Available: <https://civilgeeks.com/2011/09/27/ciencia-geek-i-elasticidad-y-plasticidad/>. [Último acceso: 03 06 2020].
- [51] E. M. Bejarano, «Guia de laboratorio mecánica de materiales,» 2018.
- [52] J. Riveros, «Ensayo de flexión en vigas,» Consuas Ingeniería, 2014.
- [53] Tesina, «Comportamiento mecánico del ensayo a flexión,» 2009.
- [54] Zwick, «Ensayos de compresión,» Barcelona, España, 2014.
- [55] EcuRed, «Ensayo a la compresión,» 2013.
- [56] Ibertest, «Ensayo a compresión,» 2012.
- [57] P. A. L. & C. C. Nossa, «ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA DE UN BIOCOMPOSITO REFORZADO CON FIBRAS DE GUADUA AUNGUSTIFOLIA PARA LA FABRICACIÓN DE UNA FÉRULA PARA EL TRATAMIENTO DEL SÍNDROME DEL TÚNEL CARIPIANO EN ETAPA INTERMEDIA,» Universidad del Bosque, 2019.
- [58] C. García, *Resistencia a la flexión del concreto*, 2012.
- [59] Areatecnología, «Ensayo de tracción,» 2018.
- [60] D. Wood, «Study.com,» 2003-2020. [En línea]. Available: <https://study.com/academy/lesson/simulations-definition-uses.html>.
- [61] M. Cerrolaza, *El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas*, Caracas: Universidad central de Venezuela, 2007.
- [62] E. Araujo, «Métodos numéricos para simulación en la ingeniería,» Blog ESSS, 2017.
- [63] Eifelmuppet, «Hot air streaming upward through the packed bed to heat the particles, which dependent on position and size experience different heat transfer rates.,» 2012.
- [64] M. M. Quispe, «Formulación de elementos finitos y elementos discretos,» Centro de investigación en matemáticas, centro internacional de métodos numéricos en Ingeniería, 2013.

- [65] J. Osses, «El método de volúmenes finitos,» Blog ESSS, 2016.
- [66] I. 2020 ANSYS, «ANYSIS INC®,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/structures>.
- [67] DrDalyO, «ANSYS 17.0 Tutorial - 3D Bridge Truss with Surface Body Platform,» 12 Junio 2015. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=J0cCA1PAINU>.
- [68] 3DCadPortal, «3D CAD PORTAL,» CADCAMCAE, 2020. [En línea]. Available: <http://www.3dcadportal.com/comsol.html>.
- [69] D. Systèmes, «Simulía,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>.

Karen Daniela Roberto Caicedo
COD 506317

Angie Carolina Lozada Garavito
COD 506259

Ing. Martin Eduardo Espitia Nery
Fecha (25/01/2021)