

ANÁLISIS POR SIMULACIÓN CAE Y EXPERIMENTAL DE UN NUEVO MATERIAL
POLIMÉRICO MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA Y SU
RESPECTIVO ANÁLISIS AMBIENTAL

D.I. GERMAN ENRIQUE VARGAS LINARES



UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANAS

MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE

MANIZALES

2019

ANÁLISIS POR SIMULACIÓN CAE Y EXPERIMENTAL DE UN NUEVO MATERIAL
POLIMÉRICO MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA Y SU
RESPECTIVO ANÁLISIS AMBIENTAL

Propuesta de investigación para optar el título de
MAGISTER EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE

GERMAN ENRIQUE VARGAS LINARES

Director

M. Sc. ALEJANDRO ECHEVERRI RUBIO

UNIVERSIDAD DE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANAS

MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE

MANIZALES

2019

DEDICATORIA

A Dios, quien me sigue mostrando el camino y acompañando bajo su protección. A mi esposa Astrid que con su apoyo, amor y motivación me acompañaron en la finalización del proyecto. A mis padres, hermanos y demás familiares por esas voces de ánimo y en especial a mi hermano Martin quien me apoyó en los momentos cruciales del proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi director de tesis M.Sc. Alejandro Echeverri Rubio quien con su paciencia, experiencia y conocimiento me oriento en el proceso investigativo. Al profesor Jhon Faber Archila por su apoyo y consejos brindados durante el desarrollo del proyecto.

Agradezco a los todos docentes y al programa de Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales que con su conocimiento y apoyo motivaron a crecer profesionalmente.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1 descripción del problema	15
1.2 pregunta de investigación.....	16
1.3 hipótesis de investigación	16
1.4 Justificación.....	16
1.5 Objetivo General.....	18
1.6 Objetivos Específicos	18
2 MARCO TEORICO.....	19
2.1 Antecedentes.....	19
2.2 Materiales y Desarrollo sostenible.....	19
2.3 Materiales Compuestos	20
2.4 Impacto ambiental del bagazo de caña	26
2.5 Simulación CAE.....	28
2.5.1 <i>Método de elementos finitos (MEF)</i>	28
3 MATERIALES Y METODOS.....	32

3.1	Tipo de Investigación.....	32
3.2	Localización de la zona objeto del estudio.....	32
3.3	Estructura y composición del bagazo de caña.....	34
3.3.1	Estructura.....	34
3.4	Pruebas de laboratorio.....	36
3.4.1	Propiedades mecánicas por evaluar.....	37
3.4.2	Referencias normativas para el desarrollo de los ensayos mecánicos.....	38
3.4.3	Características de las probetas y ensayos.....	41
3.4.4	Diseño experimental.....	42
3.5	Simulación CAE.....	45
3.5.1	Características dimensionales de la probeta.....	46
3.5.2	Preparación de las probetas y ensayos.....	47
3.5.3	Modelado y simulación mecánica.....	49
3.5.4	Procedimiento de la simulación.....	50
4	RESULTADOS.....	52
4.1	RESULTADOS DE ESTUDIOS SIMILARES.....	52
4.2	Pruebas Experimentales.....	53
4.2.1	Tabulación de los datos experimentales obtenidos.....	53
4.3	Simulación CAE.....	55
4.3.1	Simulación de pieza flexión resina epoxi sin carga.....	55
5	ANALISIS DE RESULTADOS.....	63
5.1	Pruebas de Laboratorio.....	63
6	ANALISIS DE SOSTENIBILIDAD.....	66

6.1	Huella de Carbono	67
6.2	Energía total consumida.....	68
6.3	Acidificación atmosférica (aire).....	69
6.4	Eutrofización del agua.....	70
7	CONCLUSIONES	72
8	RECOMENDACIONES	74
	BIBLIOGRAFIA.....	75
	ANEXO	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Composición física del bagazo de caña	35
Tabla 2 Composición Morfológica del bagazo de caña.....	35
Tabla 3 Composición Química del bagazo de caña	35
Tabla 4 Información general de las pruebas experimentales	36
Tabla 5. Características de las probetas para pruebas de flexión.....	41
Tabla 6. Características de las probetas para pruebas de flexión simulación	46
Tabla 7 Propiedades mecánicas de la resina epoxi sin carga	49
Tabla 8 Propiedades mecánicas del bagazo de caña.....	51
Tabla 9 Ensayos físico-mecánicos a composites de PEr + FBD	52
Tabla 10 Resistencia máxima a la flexión para resina epóxica reforzada con bagazo de caña de azúcar	54
Tabla 11 Módulo de elasticidad a la flexión para resina epóxica reforzada con bagazo de caña de azúcar	54
Tabla 12 Deformación en el punto de resistencia máxima a la flexión para resina epóxica reforzada con bagazo de caña de azúcar	55
Tabla 13 Información del modelo de simulación	57
Tabla 14 Propiedades mecánicas del modelo de simulación	58
Tabla 15 Aplicación de cargas del modelo de simulación.....	58
Tabla 16 Fuerzas resultantes del modelo de simulación.....	59
Tabla 17 Características del producto.....	66
Tabla 18 Indicadores huella de Carbono	67
Tabla 19 Consumo de energía.....	68
Tabla 20 Acidificación Atmosférica.....	69
Tabla 21 Eutrofización del agua	70

LISTA DE FIGURAS

Figura1 Fibra de vidrio	23
Figura 2 Fibra de Carbono	24
Figura 3 Fibra de Kevlar	25
Figura4 Fibra de Lino	26
Figura5 Modelo 3D generado en un sistema CAD	29
Figura6 Modelo 3D, proceso de mallado.....	30
Figura7 Modelo 3D resultado del análisis de deformaciones	31
Figura 8 Ubicación del municipio del Socorro,	33
Figura 9 Metodología del desarrollo de la investigación.....	34
Figura11 Máquina de ensayos, pruebas de flexión.....	37
Figura12 Distribución de cargas, pruebas de flexión.....	39
Figura13 Apoyo de cargas y soportes, pruebas de flexión	40
Figura14 Probetas experimentales	43
Figura 15 Procedimiento de reducción del tamaño de la fibra	44
Figura 16 Simulación de pruebas de flexión.....	45
Figura17 Dimensionamiento de las probetas	47
Figura 18 Modelado de las probetas	48
Figura 19 Simulación de cargas por flexión	49
Figura20 Probeta con bagazo de caña.....	51
Figura 21 Modelo de simulación	56
Figura22 Aplicación de cargas, prueba de flexión.....	57
Figura23 Pieza flexión-Análisis estático -Tensiones	60
Figura24 Pieza flexión-Análisis estático -Deformaciones unitarias	61
Figura25 Pieza flexión-Análisis estático -Factor de seguridad.....	62
Figura 26 Resistencia máxima de las pruebas experimentales	64
Figura 27 Módulo de elasticidad pruebas experimentales	65
Figura28 Comparativo Huella de Carbono	68

Figura29 Comparativo Consumo de energía	69
Figura30 Comparativo Acidificación Atmosférica.....	70
Figura31 Comparativo Eutrofización del agua	71

RESUMEN

Este estudio presenta un análisis de los resultados numéricos obtenidos por simulación CAE (Computer Aided Engineering) y experimentales con el fin de comparar las diferentes metodologías y así comprobar la relación que existe en la deformación elástica sufrida al aplicar una fuerza mediante pruebas de flexión; también evaluar el impacto ambiental resultante al incorporar fibras naturales a compuestos poliméricos. Para el desarrollo de este estudio se implementaron tecnologías CAE para simular las pruebas de laboratorio mediante pruebas de elementos finitos y análisis de cargas, además el estudio pretende generar alternativas de uso a los desechos generados del proceso de la obtención de la panela, actualmente estos residuos se utilizan como fuente combustible para alimentar hornos produciendo grandes cantidades de CO₂, las fibras del bagazo de caña poseen características de rigidez y dureza que son útiles como material de refuerzo en compuestos poliméricos, mejorando sus propiedades mecánicas, disminuyendo el impacto ambiental y ofreciendo alternativas de uso para estos residuos. La metodología de elementos finitos permitió obtener resultados por simulación de las pruebas de flexión muy confiables, las probetas con la inserción del bagazo experimentas mejoras en la resistencia a la tensión comparada con la prueba de material de resina epoxi sin carga, estos resultados son coherentes con las pruebas experimentales practicadas en laboratorio donde las muestras que presentaron mejores resultados en el módulo de elasticidad fueron los compuestos de resina epoxi reforzados con bagazo de caña al 30% en masa con un valor de 2,41 MPa, en comparación con las demás muestras obteniéndose un compuesto de mayor rigidez.

PALABRAS CLAVES: Bagazo de caña de azúcar, Materiales compuestos, Fibras naturales, propiedades mecánicas, Simulación CAE, Sostenibilidad.

ABSTRAC

This article presents an analysis of the numerical results by CAE simulation (Computer Assisted Engineering) and experiments in order to compare the different methodologies and also the relationship that exists in the elastic deformation suffered to apply a force by means of bending tests; also assess the environmental impact as a consequence of natural fibers and polymeric compounds. For the development of this study CAE technologies were implemented to simulate laboratory tests through finite element tests and load analysis, in addition to panela results. It is used as a fuel source to feed furnaces producing large quantities of CO₂, cane bagasse fibers, stiffness characteristics and hardness that are like the reinforcement material in polymeric compounds, improving their mechanical properties, decreasing the environmental impact and the alternatives of use for that waste.

The finite element methodology allowed to obtain results by simulation of the very reliable bending tests, the specimens with the bagasse insert experienced improvements in tensile strength compared to the no-load epoxy resin material test, these results are consistent with the experimental tests carried out in the laboratory where the samples that presented the best results in the modulus of elasticity were the epoxy resin compounds reinforced with 30% cane bagasse with a value of 2.41 MPa, in comparison with the other samples obtained a compound of greater rigidity.

KEY WORDS: Sugar cane bagasse, Composite materials, Natural fibers, Mechanical properties, CAE simulation, Sustainability

INTRODUCCIÓN

El uso de fibras naturales como material de refuerzo va en aumento (Sood & Dwivedi, 2017), Su uso permite generar alternativas para su implementación y disminuir los desechos en los procesos productivos contribuyendo a la reducción del impacto ambiental. Para el presente estudio se analizó las fibras del bagazo de caña como material de refuerzo las cuales poseen propiedades y características similares a las fibras de madera dura. Se utilizó una resina termoestable (resina epoxi) la cual se mezcló con las fibras mencionadas modificando sus propiedades mecánicas para lo cual se aplicó como método de ensayo las pruebas de flexión que nos permiten obtener el módulo de elasticidad y el porcentaje de deformación de la probeta. Se aplicó prueba de flexión en tres puntos, apoyado en dos puntos y aplicando la fuerza de forma vertical en un punto, estas propiedades se pudieron evaluar mediante pruebas experimentales y simulación CAE.

Es fundamental cuantificar los esfuerzos y deformaciones a los que son sometidos los productos o estructuras y conocer sus límites de resistencia los cuales son vitales en el diseño de un producto que durante su uso son sometidos a diferentes tipos de cargas y esfuerzos los cuales pueden ocasionar algún tipo de fisura, fractura o rompimiento en el elemento llevando al fracaso el desarrollo del proyecto. Para determinar estas características que sufren los elementos bajo estos esfuerzos fue necesario experimentar y/o simular para evaluar los efectos generados, se aplicó pruebas de flexión en tres puntos desde diferentes metodologías, las pruebas experimentales y por el método de elementos finitos (MEF), estas no permiten apreciar el fenómeno de transición de la zona plástica a la elástica del material y comparar los resultados experimentales y por simulación.

En el uso de nuevos materiales la sostenibilidad es un factor primordial, siendo necesario evaluar el impacto medio ambiental del producto en todas las etapas del ciclo de vida comparando los beneficios de incluir fibras naturales como material de refuerzo y comprobar la disminución

de la huella de carbono, consumo de energía, etc. Permitiendo el desarrollo de materiales más amigables con el medio ambiente.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En el proceso de extracción de la caña de azúcar se produce una gran cantidad de bagazo como residuo (BCA). El uso más común para el BCA entre los productores de la región Santandereana es como combustible orgánico, debido al gran porcentaje de fibras de celulosa que este contiene y la falta de propuestas alternativas para otras aplicaciones, no obstante, el uso del BCA como combustible es ineficiente y genera contaminación. (Becerra, Buitrago, & Pinto, 2016a) nos comenta que el residuo más significativo del procesamiento de la caña de azúcar en los ingenios azucareros del Valle del Cauca es el bagazo que representa el 30% de la caña molida, el cual, para el 2015 generaron 7261528 toneladas, de las cuales el 15% (1089229 toneladas) es llevada a la generación de papel y el 85% restante (6172297 toneladas) se queda en los ingenios para la cogeneración de energía.

Las fibras de bagazo son rígidas y cortas, de características comparables a las fibras de las maderas duras, lo que plantea la posibilidad de su utilización en la producción de materiales compuestos alternativos que reduzcan el impacto ambiental de algunos materiales comerciales. Un creciente interés en la incorporación de fibras naturales como agentes reforzantes de materiales compuestos en el desarrollo de nuevas alternativas de uso, que buscan la reducción del impacto ambiental, la reducción en los costos de producción y el mejoramiento de las propiedades mecánicas. (Taborda-rios, Cañas-mendoza, & Tristancho-reyes, 2017) en su estudio utilizan la resina poliéster reforzada con fibra de bambú como sustituto de la fibra de vidrio, en la investigación se llevó a cabo una caracterización mecánica de los dos tipos de materiales compuestos realizando ensayos a tracción, flexión e impacto, entre las conclusiones se pudo encontrar que “ cuando se requieran materiales compuestos con alta flexibilidad, se pueden utilizar resina poliéster reforzada con fibra de bambú o fibra de vidrio. Así mismo, cuando se requiera un material rígido, con bajas exigencias en cuanto a su resistencia a la tracción, se pueden utilizar

fibras de bambú, disminuyendo el costo de materias primas y permitiendo el aprovechamiento de materiales biodegradables.”

El bagazo de caña se ha utilizado como refuerzo en materiales compuestos de concreto mejorando las propiedades mecánicas en pruebas de comprensión, principalmente en probetas de 0,5 y 2,5 % en relación al peso según (S. J. A. Osorio, Aristizabal, & Herrera, 2007). También se ha utilizado las fibras naturales como sustitutos de la fibra de vidrio en aplicaciones donde se requiere materiales de bajo peso y buena resistencia mecánica lo que ha propiciado el uso de diferentes resinas reforzadas con fibras naturales esto debido a su fácil obtención, bajo costo, aspectos ambientales y de salud (Gómez, 2009), siendo necesario la evaluar los niveles de resistencia de los diferentes compuestos y variedad de refuerzos naturales.

1.2 Pregunta de Investigación

¿Cómo varían las propiedades mecánicas de un nuevo material polimérico mediante la inclusión del bagazo de caña?

1.3 Hipótesis de Investigación

La resistencia mecánica para materiales poliméricos reforzados con bagazo de caña debe aumentar en un 20% con relación al polímero sin carga

1.4 Justificación

Este proyecto pretende buscar alternativas de uso para el material de desecho (bagazo de caña) generado en el proceso productivo de la panela, convirtiéndolo en un material sustituto que reemplace las fibras sintéticas de refuerzo en materiales compuestos, además identificar las propiedades mecánicas del nuevo compuesto polimérico. Gran parte de este material de desecho se utiliza como combustible orgánico para alimentar las calderas propias del proceso productivo de la región, esto conlleva a la generación de altos volúmenes de ceniza y dióxido de carbono siendo procesos energéticos ineficientes e impactando negativamente el medio ambiente.

En el desarrollo de nuevos materiales para la fabricación de productos es necesario conocer las propiedades mecánicas del material para evitar que este falle o se fracture en el desarrollo de un proyecto, este tipo de análisis se pudo realizar por medio de pruebas experimentales o simulación CAE de flexión, que nos permitan calcular el grado de resistencia del material ante un determinado esfuerzo.

Es necesario conocer el ciclo de vida de un producto, desde el proceso de extracción de la materia prima, pasando por los procesos fabricación, uso y disposición final, el impacto ambiental generado en estas etapas afecta nuestros recursos y contamina el ambiente. Es prioritario mediar en el ciclo de vida de los productos evaluando el impacto ambiental y determinando en qué etapas del ciclo de vida se puede intervenir y hacer comparativos entre diferentes materiales y establecer cual afecta en menor valor el medio ambiente.

En Colombia el cultivo de caña de azúcar ocupa el segundo lugar en extensión después del café, dado que los precios de la panela han disminuido lo cual afecta la situación económica de un gran número de familias (Mojica-Pimiento & Paredes-Vega, 2004), en el proceso de extracción se producen desechos denominado bagazo siendo utilizado como alimento para animales o abono, de los usos más comunes es como combustible para la producción de energía en las calderas, siendo un proceso altamente contaminante (Becerra, Buitrago, & Pinto, 2016b) generando grandes emisiones de SO₂, NO₂ y CO (Morales, Trujillo, 2011) y problemas respiratorios en los trabajadores expuestos a las emisiones gaseosas al igual que incremento en problemas oculares y rinitis (Vásquez, Lucía, Amaya, & Ricardo, 2013) este tipo de situaciones afectan las condiciones socio-económicas de colectividades que dependen de este producto y las condiciones ambientales. Siendo necesario desarrollar alternativas de uso del bagazo de caña que permita a las comunidades campesinas una alternativa de ingreso al igual que la disminución del impacto ambiental.

1.5 Objetivo General

Determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas por simulación CAE (Ingeniería Asistida por Computador) y experimental en pruebas de flexión de un nuevo material polimérico mediante la incorporación del bagazo de caña

1.6 Objetivos Específicos

- Establecer las características del modelo para las probetas de los ensayos CAD (Diseño Asistido por Computador) y experimental
- Estudiar del comportamiento mecánico del compuesto polimérico reforzado con bagazo de caña mediante herramientas CAE en pruebas de flexión.
- Determinar las propiedades mecánicas del compuesto polimérico reforzada con bagazo de caña, mediante pruebas de flexión en laboratorio
- Evaluar la sostenibilidad del nuevo material mediante la utilización de herramientas CAE

2 MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes

En estudios previos se analizó por el método de Elementos finitos probetas fabricadas de materiales compuestos de fibra de yute, el estudio se llevó a cabo con el software ANSYS TM, donde se obtuvo valores de las tensiones y los desplazamientos al igual que características físico mecánicas del compuesto reforzado con fibras y su dependencia del contenido de la fibra, como resultado del estudio se podrán diseñar y analizar por el método de elementos finitos piezas fabricadas con materiales compuestos de fibras naturales sustituyendo materiales mayormente empleados como el plástico por un material menos costoso, biodegradable y con resistencia mecánica similar a los materiales tradicionales. (Roberto & Ochoa, 2011)

2.2 Materiales y desarrollo sostenible

Los nuevos materiales compuestos tienen una creciente importancia en el desarrollo de un país, la mayoría de los países industrializados están invirtiendo grandes sumas de dinero en el desarrollo de estos, debido a su gran papel estratégico en la economía global. Según (Rodríguez, 1999) la creciente participación de estos materiales en la economía mundial como factor de competitividad debe estar ligada primordialmente a la conservación del medio ambiente y la búsqueda permanente de la calidad.

En el proceso de selección de materiales sustentables puede variar ampliamente y es importante tener en cuenta que existe una gran variedad de materiales verdes unos más sustentables que otros y resulta dificultoso encontrar un material que pueda definido como totalmente verde. La elección responsable de materiales se basa en criterios de uso sostenibles los cuales prácticamente señalan

como materiales y productos sostenibles aquellos que reducen al mínimo el uso de recursos, tiene un bajo impacto ecológico, representa un riesgo bajo a la salud humano y al medio ambiente y son compatibles con estrategias sostenibles. (Borsani, 2011)

Estrategias para disminuir el impacto ambiental de los materiales. En el proceso de selección de materiales para el desarrollo de un proyecto existen criterios que nos pueden facilitar la toma de decisiones y contribuyen a reducir significativamente los impactos ambientales, entre las acciones se tienen:

Materiales que minimizan el uso de recursos. Minimizar el uso de recursos naturales vírgenes en la producción y en el uso puede reducir sustancialmente los impactos ambientales.

Materiales con bajo impacto ambiental. Los materiales pueden causar efectos negativos a los ecosistemas y al medio ambiente durante todas las etapas del ciclo de vida, siendo necesario una evaluación de todos los impactos ambientales en todas las etapas del ciclo de vida para tener con certeza el daño ocasionado al medio ambiente.

Materiales con riesgo para la salud del ser humano y del ambiente nulos o bajos. Tener cuidado a las exposiciones a materiales tóxicos pueden provocar efectos negativos a la salud de los seres humanos. Sustancias y químicos tóxicos se pueden encontrar durante todas las fases del ciclo de vida de un material y muchas de estas sustancias son el resultado de procesos de manufactura, etapa de uso y disposición final.(Borsani, 2011)

2.3 Materiales Compuestos

Un material compuesto se caracteriza por tener dos o más materiales constituyentes o fases con una significativa diferencia en su comportamiento macroscópico y una clara interfaz entre cada constituyente. (Olmedo, 2008), los materiales compuestos existen de forma natural como la madera que está conformada por fibras de celulosa flexible cubiertas por la lignina que es rígida,

o los huesos que los componen colágeno suave y el mineral duro y frágil apatita. Pero la gran mayoría de los materiales compuestos son diseñados y fabricados por el hombre.

La combinación de materiales tiene como objetivo aprovechar al máximo las características de cada uno y la combinación de sus propiedades como la flexibilidad y el peso de un polímero y la resistencia de una fibra. “Por ejemplo, en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades éstas que rara vez se dan juntas; por lo que se “diseña” un material según la aplicación para la cual se necesitan.” (Stupenengo, 2011)

Como elemento característico de los materiales compuestos se pueden identificar dos componentes bien definidos: la matriz (fase continua) y el elemento de refuerzo (fase discontinua)

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda inmerso. Tanto materiales metálicos, cerámicos o resinas orgánicas pueden cumplir con este papel. A excepción de los cerámicos, el material que se elige como matriz no es, en general, tan rígido ni tan resistente como el material de refuerzo, sus principales funciones son:

- Definir las propiedades físicas y químicas;
- Transmitir las cargas al refuerzo,
- Protegerlo y brindarle cohesión.

Propiedades

- Transfiere la carga a las fibras fuertes,
- Las protege de sufrir daños durante su manufactura y uso;
- Evita la propagación de grietas en las fibras a todo lo largo del compuesto.
- La matriz, por lo general, es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.

Material de refuerzo es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto agregándole a la matriz alguna propiedad que no posee. En general el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas, pero, también, se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión. El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras. Como regla general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra.

En la mayoría de los compuestos reforzados son con fibras, éstas son resistentes, rígidas y de poco peso, las fibras más utilizadas son las de vidrio, carbono y aramida (orgánicas). Estos tres materiales poseen una resistencia a la tracción extremadamente alta. (Stupenengo, 2011)

Fibras de Vidrio son las más comúnmente utilizadas, en principio porque su costo es menor a las de carbono o aramídicas. Las matrices más comunes son las resinas de poliéster. Tienen una densidad y propiedades a la tracción comparable a las fibras de carbono y aramida pero menor resistencia y módulo de tensión, aunque pueden sufrir mayor elongación sin romperse.

Figura1 Fibra de vidrio



Fuente: https://www.castrocompositesshop.com/880-tm_large_default/mat-de-hilos-cortados-de-fibra-de-vidrio-e-450-gm2.jpg

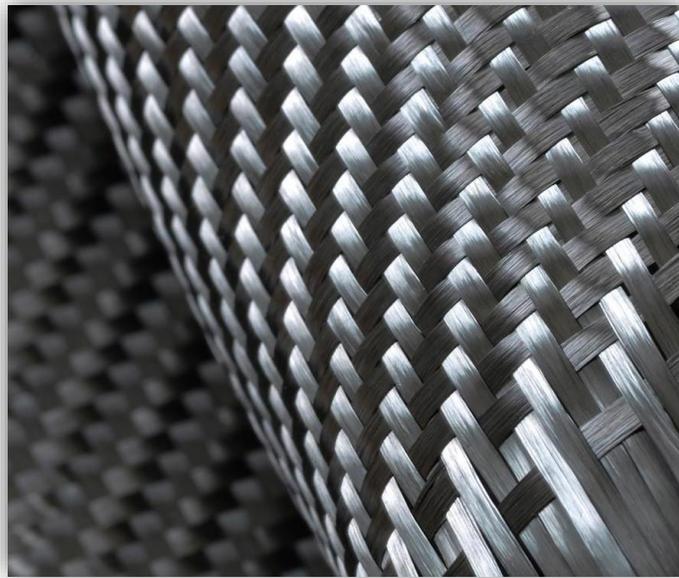
Las aplicaciones más comunes son:

- Carrocerías de automóviles y barcos
- Recipientes de almacenaje
- Industria del transporte en general.

Fibras de carbono su estructura atómica es similar a la del grafito, consiste en láminas largas y delgadas de átomos de carbono arreglados en un patrón regular hexagonal, los fajos de estas cintas se empaquetan entre sí para formar las fibras esto hace que, ante una tensión de tracción, las hojas se “traben” unas con otras, previniendo su corrimiento entre capas e incrementando, grandemente su resistencia. Las fibras de carbono tienen alta resistencia mecánica y alta rigidez,

pero son poco resistentes al roce y al impacto de baja energía. Es muy utilizada en la industria aeronáutica para disminuir el peso de los aviones, pero su elevado precio limita las aplicaciones en la industria del automóvil.

Figura 2 Fibra de Carbono



Fuente: https://i.blogs.es/319bcd/fibra-de-carbono/1366_2000.jpg

Fibras orgánicas (Aramidas) es un filamento orgánico que proviene de ciertos derivados del petróleo. Su nombre se deriva de las funciones orgánicas que poseen: aromático y amida. Se utilizan en estructuras compuestas, como en las fibras de Kevlar el cual tiene una estabilidad y resistencia térmica y a las llamas muy altas. Sus propiedades de tracción son superiores a las de las fibras textiles normales debido a un alto grado de orientación molecular resultante de sus moléculas lineales rígidas y de su propensión a formar cristales líquidos durante la fricción en solución. Se utilizan, ampliamente, en los composites más ligeros que aislantes eléctricos que se basan en fibra de carbono. Sus propiedades mecánicas suelen ser inferiores. Su coeficiente específico de tracción es alto y cercano al de los composites de fibra de carbono, pero su resistencia a la compresión es bastante débil.

Figura 3 Fibra de Kevlar



Fuente: https://www.adesivisicurezza.it/3096-large_default/tela-kevlar-aramid-fibra-240-g-m-llanura-1-m-para-la-armadura-de-cuerpo.jpg

Las fibras de aramida tienen una alta resistencia al impacto y la corrosión y son extremadamente resistentes al ataque químico, exceptuando ácidos fuertes y bases a altas concentraciones, sus aplicaciones incluyen ropa de protección, chalecos antibalas, productos de fricción, cables, cuerdas y telas de las velas de barcos.

Fibras naturales En la actualidad cada vez se utilizan más materiales reforzados con fibras que sean más económicas y de menor impacto medioambiental. Para ello, se están reforzando muchos polímeros con fibras provenientes de productos naturales como el lino o la fibra de coco; con el fin de que gran porcentaje del producto sea reutilizable. Además, si las fibras de refuerzo provienen de vegetales, el impacto medioambiental total en la fabricación de las piezas es mucho menor.

Figura4 Fibra de Lino



Fuente: https://www.ropalino.com/blog/wp-content/uploads/2015/05/Flax_Linen_Fibre.jpg

En la actualidad se están dedicando grandes esfuerzos en proyectos de investigación en la fabricación de materiales compuestos completamente “ecológicos” o “verdes”. En ellos se refuerza la matriz del polímero natural (p. ej. celulosa) con fibras de origen vegetal (p. ej. fibra de lino). Ya existen polímeros comerciales completamente “verdes” y se prevé que su producción aumente en el futuro y su precio disminuya. (Duffo, 2011)

2.4 Impacto ambiental del bagazo de caña

En el proceso de molienda, además del jugo, también se obtiene un residuo sólido llamado “bagazo verde” cuya humedad depende del grado de extracción del jugo, que fluctúa entre 50% y 60%. Este bagazo es llevado y almacenado en cobertizos llamados bagaceras hasta que alcance una humedad inferior al 30%, para ser utilizado en las hornillas como combustible. Para alcanzar este porcentaje de humedad, se debe almacenar en pilas altas dejando un espacio entre montón y montón para que circule el aire y seque el bagazo. (G. Osorio, 2007)

Además, en referencia al impacto medioambiental las emisiones atmosféricas generadas en los procesos de combustión debido al alto contenido de humedad del bagazo producen cambios importantes en la calidad del aire. El mayor contaminante de los ingenios azucareros es el material particulado y sus concentraciones pueden variar por el uso de caña mal lavada o preparada inadecuadamente, ya que se aumenta el contenido de cenizas del bagazo por el tipo de caldera utilizada y por la eficiencia del turbogenerador. Para minimizar los niveles de este contaminante, los ingenios azucareros de la región se han acogido a la suscripción de convenios de producción más limpia. (Becerra Quiroz, 2016)

(Salazar, 2016) Establece en su estudio la importancia de darle, además de la producción de calor o energía, otro tipo de usos ya que la cantidad de bagazo que se produce después de la molienda es considerable (aproximadamente el 50% del total de la caña procesada) ocupando mucho espacio y tiempo de secado, lo que trae problemas por almacenamiento excesivo, olores (debido al proceso de fermentación que produce gases como el anhídrido carbónico) y además genera contaminación si se desecha como un residuo sólido, si no se almacena adecuadamente atrae insectos, roedores y carroñeros, porque estos animales traen consigo microorganismos que ocasionan enfermedades al consumidor final y deterioran su presentación, lo que constituye un riesgo para la inocuidad alimentaria del producto, la panela es considerada un alimento de consumo humano.

En Brasil, la industria de la caña de azúcar genera grandes cantidades de cenizas de bagazo de caña de azúcar, y una cuestión clave es encontrar un uso adecuado de este material de desecho sólido. En el presente artículo determina las características químicas, físicas y mineralógicas de una muestra de cenizas de bagazo de caña de azúcar e investigar su uso en la producción de baldosas de cerámica, demostrando que el cuarzo podría ser reemplazado con hasta 2.5% de desechos de cenizas de bagazo de caña de azúcar en la producción de baldosas (Schettino & Holanda, 2015), Las fibras vegetales se están convirtiendo en una alternativa realmente llamativa para aplicaciones industriales por su bajo costo, peso ligero y por ser una materia prima renovable

con propiedades superiores a otros materiales cuando se utiliza como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica (Velásquez Restrepo, Pelaéz Arroyave, & Giraldo Vásquez, 2016)

2.5 Simulación CAE

Las herramientas de simulación son de gran importancia para el análisis numérico, se pueden desarrollar bajo la aplicación de elementos finitos. Esta herramienta permite generar la simulación del ensayo de la prueba de flexión en tres puntos y obtener los resultados numéricos para hacer una validación de los resultados experimentales, obteniendo resultados con errores bajos el cual cae dentro de la tolerancia de error por el MEF. (Rusell, 2010). En la investigación “Caracterización y simulación por el método de elementos finitos de la aleación WIRON® light fundida por inducción eléctrica aplicable al diseño de pilares para implantes Dentales” se apoya de la simulación para determinar las propiedades mecánicas por medio de análisis de elementos finitos, con esta metodología se pudo determinar el esfuerzo máximo y el factor de seguridad validando la hipótesis de estudio (Laguado & Archila, 2010). El método de elementos finitos utilizando como apoyo el software de simulación ANSY permitió el desarrollo y análisis del comportamiento de una viga de perfil W12x40, simplemente apoyada y sometida a una carga uniformemente distribuida (Prada & Rojas, 2017)

2.5.1 Método de elementos finitos (MEF)

El análisis de elementos finitos es un método de análisis numérico donde un cuerpo sólido es dividido por líneas o superficies imaginarias en un número finito de elementos. Estos elementos son interconectados por medio de un número discreto de nodos situados en sus fronteras. El análisis estructural se realiza aplicando un vector fuerza en un elemento de la geometría, y un modelo matemático que contiene información sobre las propiedades del material calcula los esfuerzos y las deformaciones generadas en todos los nodos. (Laguado Villamizar, 2011)

Esta metodología permite reproducir de forma virtual a un componente o elemento en situación de trabajo real, el cual ofrece reducir costos, tiempo e infraestructura al suplir los prototipos y las pruebas de ensayo y error. En la actualidad el método ha logrado desarrollarse en casi todas las áreas de la ingeniería por lo que un análisis con elementos finitos puede aplicarse a casi todos los problemas de la industria. Ya no es necesario un conocimiento profundo en matemática y física, el desarrollo de software y hardware permite tener este método de fácil alcance, existe gran variedad de programas disponibles para un análisis de elementos finitos de fácil operabilidad con el requisito de conocer la metodología para producir resultados óptimos. (Jiménez Rodríguez, 2010)

Análisis mediante elementos finitos. Es una técnica numérica para la resolución de problemas descritos como un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales. Utilizando el método de elementos finitos se puede analizar cualquier forma. Independiente de la complejidad del proyecto la secuencia para análisis por MEF son siempre los mismos. El punto de partida es el modelo geométrico (ver Figura5), para este modelo se asignará propiedades de material y se definirán cargas y restricciones. (Jiménez Rodríguez, 2010)

Figura5 Modelo 3D generado en un sistema CAD



Fuente: (Jiménez Rodríguez, 2010)

Posteriormente el modelo pasará por un proceso de mallado, el cual divide la geometría del modelo en entidades relativamente pequeñas y de formas simples llamadas elementos finitos (ver Figura6).

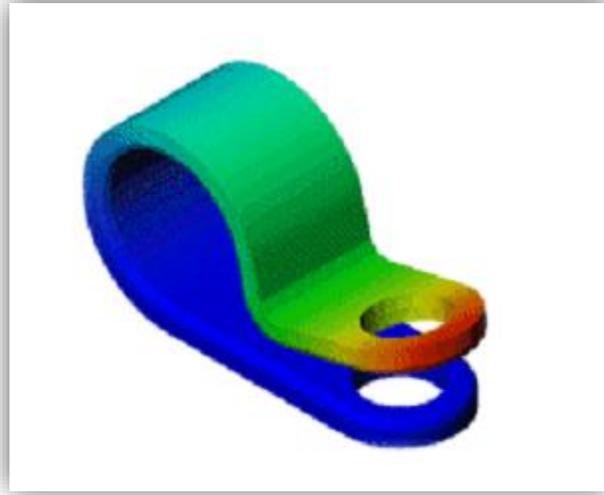
Figura6 Modelo 3D, proceso de mallado



Fuente: (Jiménez Rodríguez, 2010)

Cuando se trabaja con elementos finitos, el motor de cálculo del MEF se aproxima a la solución deseada (por ejemplo, deformaciones o tensiones) para todo el modelo mediante el “ensamblaje” de soluciones simples para elementos individuales (ver Figura7).

Figura7 Modelo 3D resultado del análisis de deformaciones



Fuente: (Jiménez Rodríguez, 2010)

Desde la perspectiva de la metodología del MEF, se puede considerar los siguientes pasos:

- Construcción del modelo matemático
- Construcción del modelo de elementos finitos
- Resolución del modelo de elementos finitos
- Análisis de los resultados

3 MATERIALES Y METODOS

3.1 Tipo de Investigación

Investigación de tipo experimental. Según Colciencias es un tipo de investigación experimental ya que se realizará un trabajo sistemático que aprovecha los conocimientos existentes y está dirigido a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos

3.2 Localización de la zona objeto del estudio

Socorro es un municipio del departamento de Santander. Está localizado a 121 kilómetros de Bucaramanga. Sus límites territoriales son: al norte, con los Municipios de Cabrera y Pinchote; al sur, con Confines y Palmas del Socorro; al oriente, con Páramo; al occidente, con Simacota y Palmar. Posee una extensión de 122,1 km². La base de la economía del municipio es la producción agropecuaria, los productos agrícolas más relevantes son: La caña de azúcar, café, cítricos, frijol, maíz y tabaco entre otros.

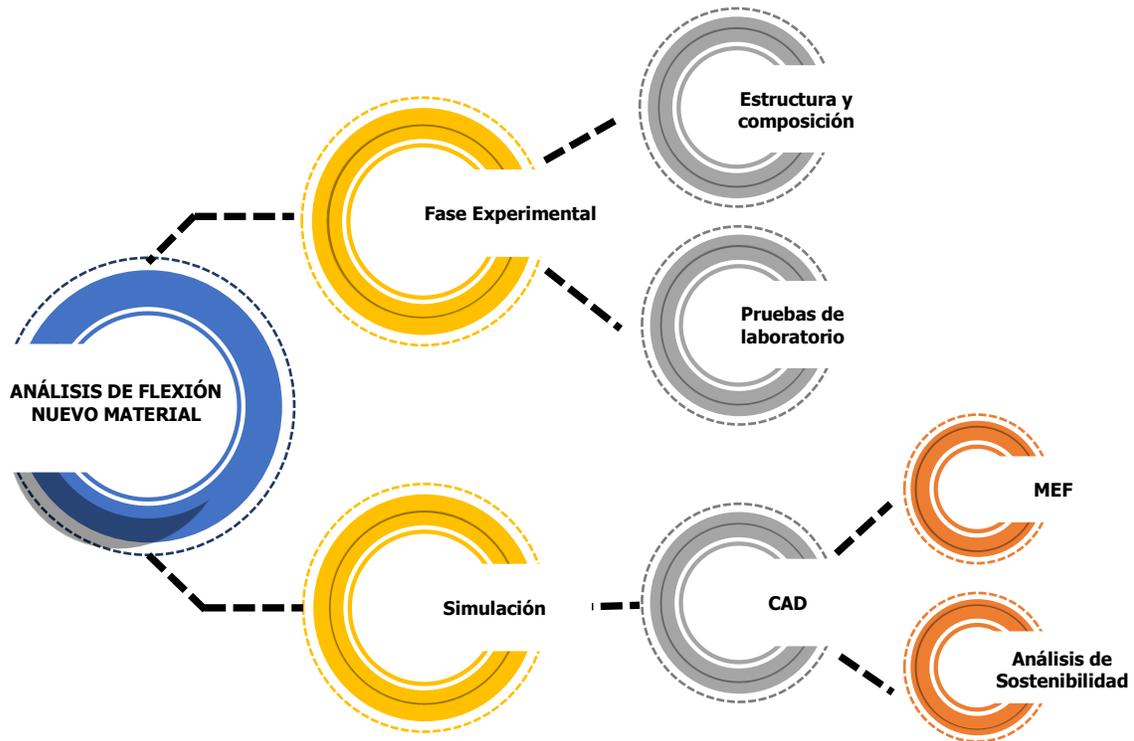
**Figura 8 Ubicación del municipio del Socorro,
Santander (Colombia)**



Fuente: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/dc/Colombia_-_Santander_-_El_Socorro.svg/250px-Colombia_-_Santander_-_El_Socorro.svg.png

En este estudio la metodología presentada en el diagrama de bloques de la Figura 9, nos muestra la secuencia en el desarrollo de la investigación, el análisis de las pruebas de flexión del nuevo material se dividió en dos etapas una fase experimental para la cual se estudió la estructura y composición del bagazo de caña y las pruebas experimentales aplicadas y la fase de simulación que por medio de tecnología CAD se pudo evaluar las propiedades mediante el método de elementos finitos y un análisis de sostenibilidad.

Figura 9 Metodología del desarrollo de la investigación



Fuente: El Autor 2019, Metodología del desarrollo de la investigación

3.3 Estructura y composición del bagazo de caña

Para el empleo de el bagazo de caña como materia prima es necesario una adecuada identificación de la estructura y composición, determinar las características químicas, físicas y morfológicas son necesarias para una correcta aplicación en los diferentes procesos productivos

3.3.1 Estructura

Composición física y morfológica. Físicamente el bagazo de caña está constituido por cuatro partes como lo podemos observar en la tabla 1, los porcentajes pueden tener alguna variación dependiendo de los procesos productivos de extracción del jugo de caña.(Olmo et al., 2008)

Tabla 1 Composición física del bagazo de caña

Bagazo de caña	45%	Fracción sólida orgánica insoluble en agua, compuesta por fibra y meollo de la caña
Sólidos no solubles	2 - 3 %	Formada por sustancias inorgánicas, piedras, tierra, materiales extraños, etc.
Sólidos solubles	2 - 3 %	Sacarosa y ceras que se disuelven en agua
Agua	51 – 49 %	Agua presente en el bagazo mantenida por fuerzas de capilaridad y tensión superficial

Fuente: (Olmo et al., 2008)

Tabla 2 Composición Morfológica del bagazo de caña

Componentes	Proporción, %
Fibras	50
Parénquima	30
Vasos	15
Epidermis	5

Fuente: (Olmo et al., 2008)

Composición Química del bagazo de caña se representa en la tabla 2

Tabla 3 Composición Química del bagazo de caña

Carbono	47%
----------------	------------

Hidrógeno	6,5%
Oxígeno	44%
Cenizas	2,5 %

Fuente: https://www.ecured.cu/Bagazo_de_ca%C3%B1a#Composici.C3.B3n7

3.4 Pruebas de laboratorio

A continuación, en la tabla 4 se describen los parámetros para el desarrollo de la etapa experimental del proyecto.

Tabla 4 Información general de las pruebas experimentales

PRUEBAS EXPERIMENTALES	
Responsable de aplicación de la técnica.	Maestrante
Sujetos o muestra a quien se aplica la técnica.	Probetas de resina epoxi con diferentes concentraciones con material de refuerzo bagazo de caña al 10, 20 y 30%
Tiempo de aplicación de la prueba piloto y de la técnica.	Se realizaron 5 probetas por cada tipo de prueba (10%, 20% y 30%)
Lugar de aplicación.	Laboratorios de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander
Registro de ejecución	31 de octubre del 2018
Equipo	MTS (multi test system) Bionix modelo 370

Fuente: El autor, 2019

Las pruebas de laboratorio tienen como finalidad:

- Preparar las probetas del compuesto Resina Epoxi y bagazo de caña en las diferentes proporciones para la prueba experimental.
- Calcular las propiedades mecánicas de los compuestos bajo la norma ASTM
- Evaluar los resultados obtenidos de los ensayos y compararlos, analizando ventajas y desventajas.

3.4.1 Propiedades mecánicas por evaluar

Figura10 Máquina de ensayos, pruebas de flexión



Fuente: El Autor, 2019

Las propiedades mecánicas permiten obtener características de un material compuesto son la resistencia máxima ante una determinada fuerza, esta propiedad se puede obtener mediante pruebas de flexión, tracción o compresión y también se puede obtener el módulo de elasticidad y el porcentaje de deformación.

Dado que es material que se va a generar, puede considerarse isotrópico, es decir, que se va a comportar de manera similar ante diferentes tipos de cargas, podrían considerarse cualquiera de los ensayos descritos para su determinación de propiedades; o un par de ensayos para analizar justamente el cambio del comportamiento con el cambio de la dirección de la carga, y de esta manera establecer el nivel de anisotropía del material propuesto.

3.4.2 Referencias normativas para el desarrollo de los ensayos mecánicos

La norma de referencia para el desarrollo de las pruebas de flexión es la **ASTM D7264** Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials (Método de prueba estándar para las propiedades de flexión de los materiales compuestos de matriz polimérica)(ASTM-D7264, 2010). Algunas consideraciones de la norma para tener en cuenta son las siguientes:

Alcances de la norma

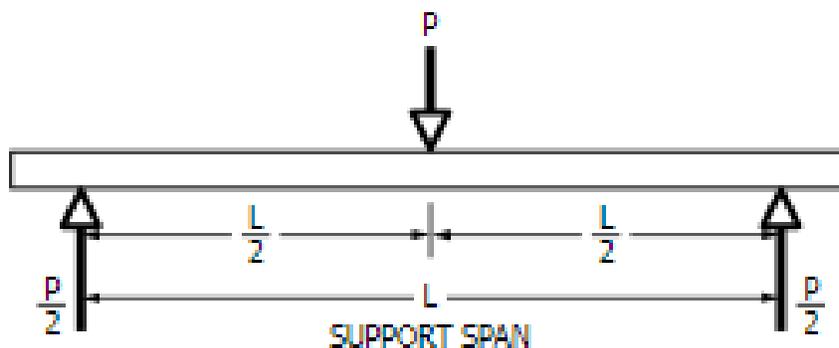
- Este método de prueba determina las propiedades de rigidez y resistencia a la flexión de los materiales compuestos de matriz polimérica.
- Sistema de carga de tres puntos que utiliza una carga en el centro en una viga simplemente soportada.

Resumen de la prueba

- Una barra de sección transversal rectangular, soportada como una viga, se desvía a una velocidad constante de la siguiente manera:

La barra descansa sobre dos soportes y la carga se ejerce por medio de una punta en medio de los dos soportes, Ver Figura12

Figura11 Distribución de cargas, pruebas de flexión



Fuente: Norma ASTM D7264

La fuerza aplicada a la muestra y la deflexión de la muestra resultante en el centro del tramo se miden y registran hasta que se produce el fallo en cualquiera de las superficies externas, o la deformación alcanza un valor predeterminado.

Uso

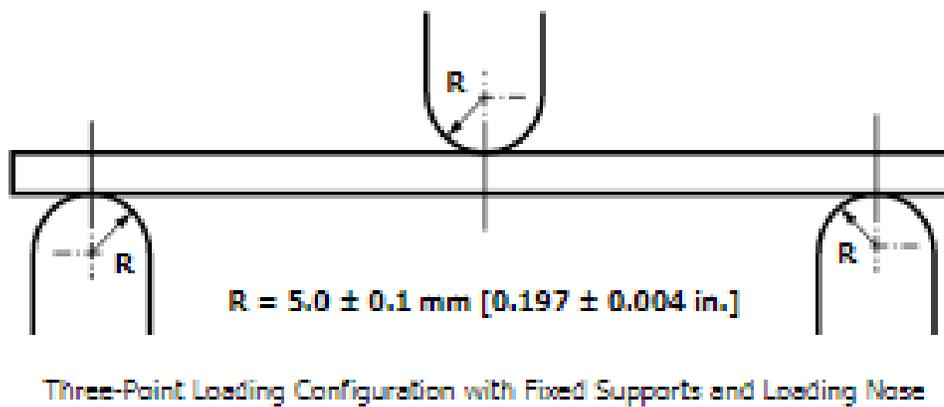
Este método de prueba determina las propiedades de flexión (incluida la resistencia, la rigidez y el comportamiento de carga / deflexión) de los materiales compuestos de matriz polimérica en las condiciones definidas

- Las propiedades de flexión determinadas por estos procedimientos se pueden usar para fines de especificación y control de calidad, y pueden encontrar aplicaciones de diseño.

Equipo

- El equipo de prueba debe estar calibrada correctamente, que puede operarse a una tasa constante de movimiento de la cruceta
- Apoyos de carga y soportes: los apoyos de carga y los soportes deben tener superficies de contacto cilíndricas con una dureza ≥ 55 HRC y deben tener superficies finamente rectas libres de indentaciones y rebabas, con todos los bordes afilados aliviados. El radio de la punta de carga y los soportes deben ser de 5.0 ± 1.0 mm [0.197 ± 0.004 in.], (Ver Figura13)

Figura12 Apoyo de cargas y soportes, pruebas de flexión



Fuente: Norma ASTM D7264

- Medición de la deflexión: la deflexión de la muestra en el centro de carga se medirá con un dispositivo calibrado correctamente que tenga una precisión de $\pm 1\%$ o más del desplazamiento máximo esperado. El dispositivo registrará automática y continuamente la deflexión durante la prueba.

Numero de pruebas

- Probar al menos cinco muestras por condición de prueba, a menos que se puedan obtener resultados válidos mediante el uso de menos muestras, como en el caso de un experimento diseñado

Procedimiento

- Acondicionar las muestras según sea necesario. Almacenar las muestras en el ambiente acondicionado hasta el tiempo de prueba.
- Después del mecanizado final de la muestra y cualquier acondicionamiento, pero antes de la prueba, mida y registre el ancho y el espesor de la muestra en la sección media de la muestra y la longitud de la muestra, con la precisión especificada.
- Velocidad de la prueba: establezca la velocidad de la prueba a una velocidad de movimiento de la cruceta de 1.0 mm / min [0.05 in. /min] para una muestra con dimensiones estándar

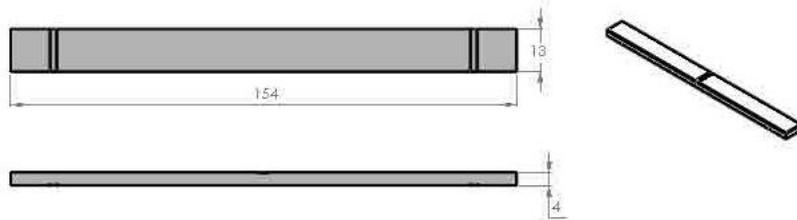
3.4.3 Características de las probetas y ensayos

Las características dimensionales de las probetas están establecidas bajo la norma ASTM de referencia, al igual que el protocolo de los ensayos, la cual se describe a en la tabla 5:

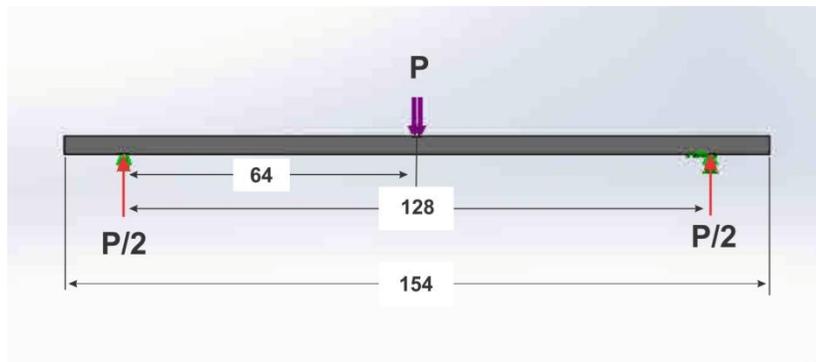
Tabla 5. Características de las probetas para pruebas de flexión

<i>PRUEBAS DE FLEXIÓN</i>	
<i>NORMA</i>	<i>NOMBRE</i>

D7264			STANDARD TEST METHOD FOR FLEXURAL PROPERTIES OF POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS	
<i>DIMENSIONES (MM)</i>			VELOCIDAD DE PRUEBA	NÚMERO DE PRUEBAS
154	13	4	1 mm/min	5



DISTRIBUCIÓN DE CARGAS



Fuente: El autor, 2019

3.4.4 *Diseño experimental*

Figura13 Probetas experimentales



Fuente: El autor, 2019

Para el desarrollo experimental es necesario realizar una adecuada preparación de las fibras del bagazo de caña y una adecuada proporción en los contenidos en masa en relación a la matriz polimérica, se espera un mejoramiento en las propiedades mecánicas con la inclusión de las fibras como refuerzo polimérico, un ejemplo de ello es la utilización de residuos del agro como refuerzo alternativo en termoplásticos.(Cerqueira, Baptista, & Mulinari, 2011)

Para el presente estudio se proponen dos contenidos de masa de carga o refuerzo del bagazo de caña, 10% y 20% (peso/peso), como patrón de referencia se utilizó una probeta de resina epoxi sin carga como refuerzo, se calcula el peso inicial y se establece las cantidades de fibra de bagazo de caña que se agregaran a la mezcla

3.4.4.1 Preparación de las fibras del bagazo de caña

Las fibras solo tendrán un proceso de **reducción de tamaño** mediante elementos mecánicos y cual tiene como propósito la reducción y la obtención de una fibra homogénea, para la reducción de la geometría se realizó mediante herramientas de corte básicas de carpintería como por ejemplo sierras sin fin, tijeras de jardinería hasta obtener una fibra aproximada de 15 mm, posteriormente las fibras se someten al corte ejercido en un molino de cuchillas donde la fibra se reducirá en fragmentos alrededor de los 4mm, este proceso de corte genera partículas de diferentes dimensiones siendo necesario tamizar para separar las fibras y obtener el tamaño deseado.

Figura 14 Procedimiento de reducción del tamaño de la fibra



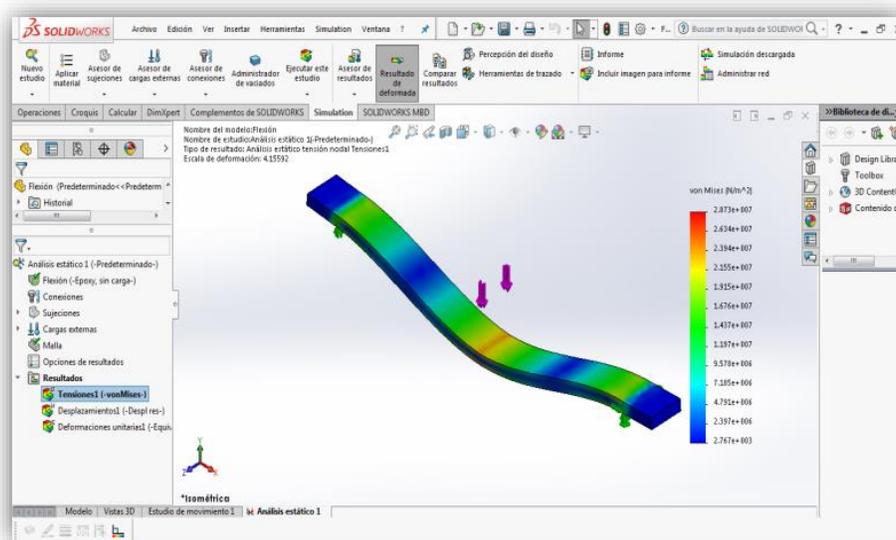
Fuente: El autor, 2019

Para este estudio no se realizará ningún tipo de tratamiento químico que elimine los rastros de la hemicelulosa y lignina contenida en su superficie de las fibras del bagazo de caña.

3.5 Simulación CAE

A continuación, se describen los parámetros para el desarrollo de la etapa de simulación por ordenador.

Figura 15 Simulación de pruebas de flexión



Fuente: El autor, 2019

Las pruebas CAE tienen como objetivo:

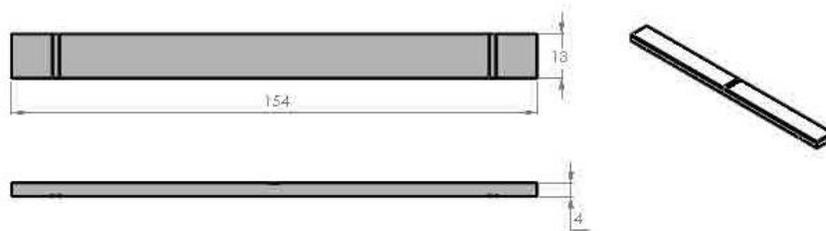
- Modelar las probetas del compuesto Resina Epoxi y bagazo de caña en las diferentes proporciones para las pruebas de simulación.
- Generar la simulación del ensayo y obtener resultados numéricos que nos permitan validar las pruebas experimentales

3.5.1 Características dimensionales de la probeta

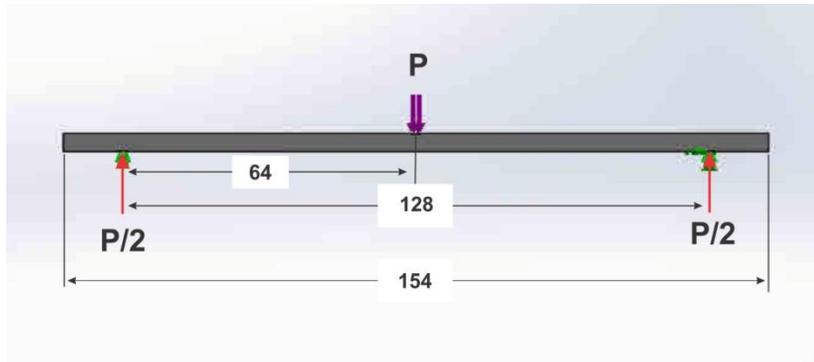
Las características dimensionales de las probetas están establecidas bajo la norma ASTM de referencia, las cuales se referencian en la tabla 6.

Tabla 6. Características de las probetas para pruebas de flexión simulación

<i>PRUEBAS DE FLEXIÓN</i>				
<i>NORMA</i>			<i>NOMBRE</i>	
<i>D7264</i>			Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials	
<i>DIMENSIONES (MM)</i>			<i>NÚMERO DE PRUEBAS</i>	
<i>154</i>	<i>13</i>	<i>4</i>	1	



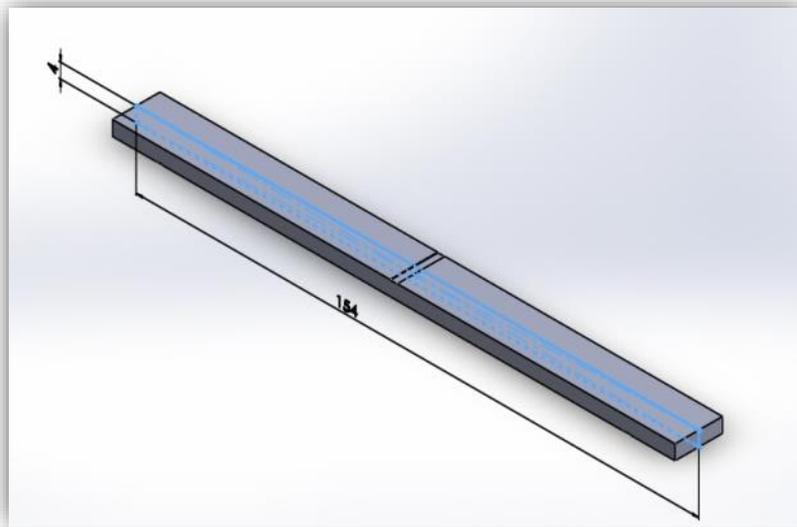
DISTRIBUCIÓN DE CARGAS



3.5.2 Preparación de las probetas y ensayos

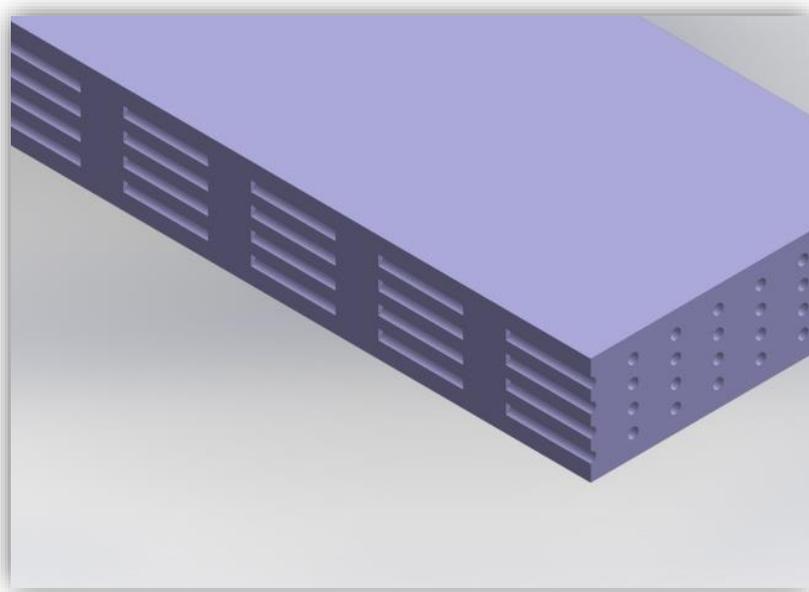
La preparación de las probetas se realiza de forma digital mediante el modelado tridimensional en un software de ingeniería (ver Figura 17-18) (SolidWorks), basándose en la norma ASTM D7264 para pruebas de flexión de materiales compuestos poliméricos, aplicando geometría de referencia básica para el modelado de la pieza

Figura16 Dimensionamiento de las probetas



Fuente: El Autor, 2019

Figura 17 Modelado de las probetas



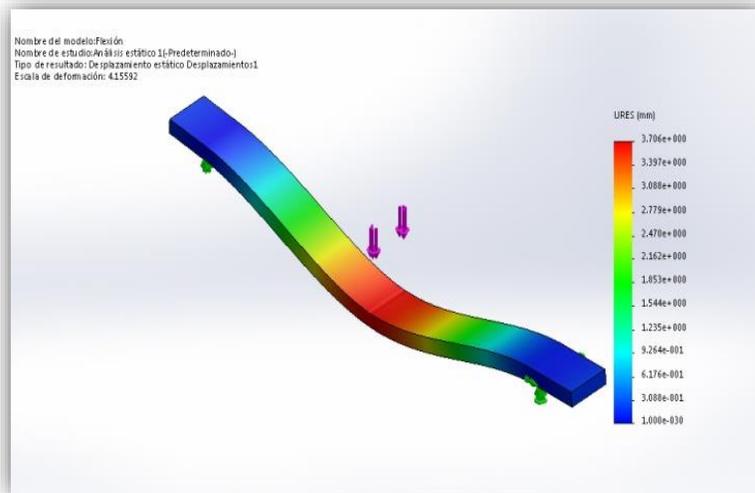
Fuente: El autor, 2019

Se modelaron diferentes probetas que nos permitieron una amplia gama de posibilidades, inicialmente la probeta patrón compuesta del 100% de resina epoxi, una vez definido los parámetros base del estudio se procedió a realizar modificaciones para insertar el bagazo de caña en las diferentes proporciones, esta inserción de fibra para la generación del material compuesto se realizó mediante la generación de un modelo y así utilizar la aplicación ensamble de pieza que nos permite simular las concentraciones del material ver Figura18. Las fibras de bagazo de caña se elaboraron a partir de la geometrización de la fibra, las dimensiones de las fibras del bagazo de caña se obtuvieron del proceso mecánico descrito anteriormente en el proceso de experimentación en laboratorios, si aproximamos los valores a un proceso geométrico las dimensiones aproximadas de las fibras después de pasar por el proceso de tamizaje serán de 4mm de longitud x 0,3mm de diámetro

3.5.3 Modelado y simulación mecánica

En el presente estudio evalúa la resistencia mecánica de las probetas con diferentes concentraciones de fibra, para las pruebas de flexión se efectuaron utilizando el complemento de SolidWorks Simulation, el cual permite realizar un análisis estático con tres puntos de apoyo, la carga necesaria para la deformación del material es aplicada en el centro de la probeta, el cual se apoya en dos puntos ver Figura23, simulando la flexión del material. El software simula la fuerza ejercida en el modelo y por medio de un diagrama de colores representa la deformación de la pieza, al igual que los valores de deformación obtenidos por el sistema.

Figura 18 Simulación de cargas por flexión



Una vez modelada la probeta con las características se valida incorporando las propiedades mecánicas de la resina epoxi sin carga obtenidas de la base de datos de materiales que incluye el programa SolidWorks. Tabla 7

Tabla 7 Propiedades mecánicas de la resina epoxi sin carga

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
<i>Módulo elástico</i>	2415	N/m m²
<i>Coefficiente de poisson</i>	0.35	N/d
<i>Densidad de masa</i>	1100	Kg/m³
<i>Límite de tracción</i>	28	N/mm²
<i>Límite de comprensión</i>	104	N/mm²
<i>Conductividad térmica</i>	0.188	W/(m*k)

3.5.4 Procedimiento de la simulación

En esta etapa se realiza el proceso de simulación utilizando el software *SolidWorks Simulation*, inicialmente se trabaja con la probeta 100% resina epoxi, se incorporan las propiedades mecánicas y se somete a una carga de inicial de flexión de 20N tomada como referencia y se incrementara o disminuye hasta que el factor de seguridad sea igual o menor a 1, que es la carga máxima que puede soportar la pieza antes de fracturarse.

posteriormente se analizó el material compuesto, se definió dos probetas (10% y 20%) con la fibra del bagazo de caña incorporado (Figura20), para este proceso se simula la fibra de forma geométrica y se incorporarán las propiedades mecánicas del bagazo de caña tabla 8 y mediante la aplicación ensamble se determinó la resistencia a la flexión para el material compuesto, para esta etapa se trabajarán las fibras de manera unidireccional en el sentido de la longitud de la probeta

Figura19 Probeta con bagazo de caña

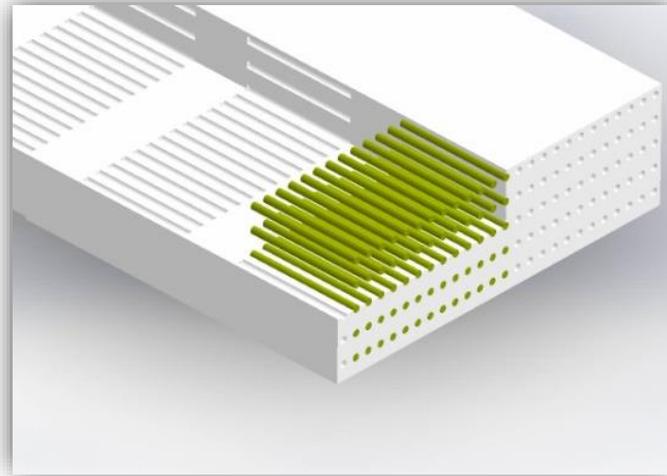


Tabla 8 Propiedades mecánicas del bagazo de caña

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
<i>Longitud</i>	26	mm
<i>Diámetro promedio</i>	0,24	mm
<i>Resistencia ultima</i>	196.4	MPa
<i>Módulo de elasticidad</i>	16.9	GPa
<i>Resistencia a la adherencia</i>	0.84	MPa

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de estudios similares

Los resultados de la sustitución de matrices plásticas utilizadas en la inyección y moldeo de envases de acopia, reemplazando el 30% por fibras de bagazo de caña de azúcar analizando la carga y el tamaño de las fibras para alcanzar el resultado propuesto al igual que los aditivos necesarios para lograr una buena compatibilidad fibra – matriz, donde las propiedades mecánicas resultaron satisfactorias para el uso deseado. En la tabla 9 se evidencia los resultados para las pruebas físico – mecánicas, representados por los valores promedios de las 10 pruebas por cada ensayo.

En los valores del esfuerzo de flexión y tracción en la rotura para las diferentes muestras, se observa que el aumento en la relación del peso de las fibras en las mezclas (B), (C) y (D), provoca variaciones en los resultados de cada ensayo disminuyendo los valores de flexión y tracción con respecto al PEr (Polietileno reciclado) solo. Sin embargo, la dureza de los materiales composites ensayados aumenta cuando son reforzados con las diferentes cargas de fibras. El compuesto con mejores propiedades son las muestras con tipo un 20% de fibras y dependiendo de la prestación del servicio que se desee es posible implementar porcentajes mayores. (Brown-Gómez, Adolfo; Álvarez-Delgado, Amaury; Leal-Alfonso, Juan A.; Gómez-Estévez, Andrés; Renté-Zamora, Arletis; Rodríguez-Dorrego, María E.; Pajes-Castro, Reinaldo; Matellanes-Iglesias, Lina; Villamil-Nuñez, 2011)

Tabla 9 Ensayos físico-mecánicos a composites de PEr + FBD

Muestra	Flexión (N/mm ²)	Modulo en Flexión (N/mm ²)	Tracción (N/mm ²)	Modulo en tracción. (N/mm ²)	Dureza (HB)	
A	PEr	31	3137	35	3171	111
B	PEr + 20% FBD	29	4000	30	3161	168
C	PEr + 20% FBD	26	3567	28	2839	125
D	PEr + 20% FBD	24	3349	24	2526	118

También se obtuvieron buenos resultados en la utilización del bagazo de caña de azúcar tratada con silicato de sodio como refuerzo en una matriz de cemento, donde se obtuvo un material

compuesto con propiedades mecánicas aceptables para ser utilizados en sistemas de construcción de bajo costo, se utilizó una carga del 10% de fibra en relación del peso total del cemento permitiendo reducciones en la densidad del compuesto entre un 9,655 a 10,72% a los 28 días de curado. La resistencia a la comprensión es inversamente proporcional al porcentaje de fibra añadida y a la longitud de esta. (Fernández-rodríguez & Díaz-Hernández, 2017)

4.2 Pruebas Experimentales

Una vez finalizadas las pruebas mecánicas el equipo de laboratorio arroja un informe con todos los valores e instantes de la experimentación, la cual se procedió a tabular y así obtener las características mecánicas necesarias de las diferentes mezclas del compuesto reforzado.

El proceso estadístico tiene como finalidad la representación de los datos de manera clara, de fácil interpretación y apoyada de gráficos que permiten ser atractivas visualmente y de rápida lectura. Se realiza una tabulación por medio de tablas simples de fácil lectura que nos permiten una adecuada distribución de la información y obtener la característica de interés.

La técnica de análisis a utilizar es un método descriptivo simple que permite obtener un resumen de los datos obtenidos, descripción del promedio y desviaciones estándar. Para la obtener la información requerida nos apoyamos de una herramienta sistemática (Excel) que nos permite realizar el proceso de análisis de una manera adecuada ya que el volumen de datos no es voluminoso.

4.2.1 Tabulación de los datos experimentales obtenidos

En las tablas 8, 9 y 10 se muestran los resultados de la resistencia máxima a la flexión para compuestos poliméricos reforzados con bagazo de caña de azúcar.

En la tabla 10 se muestran los resultados de la resistencia máxima a la flexión para compuestos poliméricos reforzados con bagazo de caña de azúcar.

Tabla 10 Resistencia máxima a la flexión para resina epóxica reforzada con bagazo de caña de azúcar

BCA	10%	20%	30%
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	37,4026165	38,0769508	38,7400502
2	37,77396	39,5825758	38,0520904
3	37,4887879	42,8929946	33,9227484
4	38,7574407	41,7540441	30,9561051
5	38,514894	40,3928631	35,2052
Promedio	37,99	40,54	35,38
Desv. est	0,61	1,87	3,17

Fuente: El Autor, 2019

La tabla 11 muestran los resultados del módulo de elasticidad a flexión para compuestos poliméricos reforzados con bagazo de caña de azúcar sin tratamiento

Tabla 11 Módulo de elasticidad a la flexión para resina epóxica reforzada con bagazo de caña de azúcar

BCA	10%	20%	30%
1	2,10455049	1,96560267	2,33419808
2	2,23136607	1,74016816	2,37410801
3	2,21935338	2,08554558	2,4163307
4	2,22081638	2,35535498	2,42945863

5	2,61208309	2,3037619	2,49884763
Promedio	2,28	2,09	2,41
Desvest	0,19	0,25	0,06

Fuente: El Autor, 2019

La tabla 12 muestra los resultados de la deformación máxima a flexión para compuestos poliméricos reforzados con bagazo de caña de azúcar.

Tabla 12 Deformación en el punto de resistencia máxima a la flexión para resina epóxica reforzada con bagazo de caña de azúcar

BCA	10%	20%	30%
1	0,01734573	0,01903195	0,01896219
2	0,01721999	0,02358288	0,01774347
3	0,01671839	0,0209566	0,01555761
4	0,01708614	0,0173376	0,01390234
5	0,01422626	0,0172482	0,01477101
Promedio	0,0165	0,0196	0,0162
Desvest	0,0013	0,0027	0,0021

Fuente: El Autor, 2019

4.3 Simulación CAE

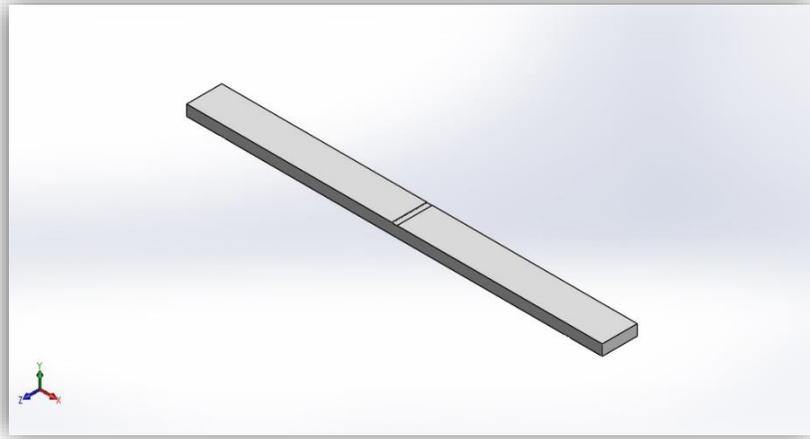
Los resultados obtenidos mediante las pruebas de simulación CAE aplicada a las probetas de resina epoxi definidas con anterioridad arrojaron los siguientes resultados para una carga de 39N, que es la carga que puede soportar la probeta antes de fallar (factor de seguridad igual a 1)

4.3.1 Simulación de pieza flexión resina epoxi sin carga

Descripción

La información que se describe a continuación es el resultado de las pruebas de flexión a la probeta de resina epoxi sin carga. (Figura 21).

Figura 20 Modelo de simulación

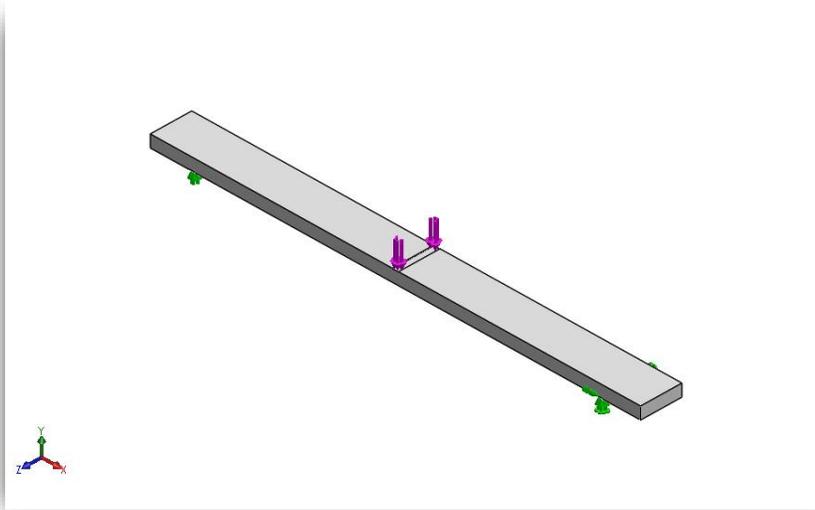


Fuente: El autor, Simulación SolidWorks

Instrumento: SolidWorks

Tipo de análisis: Análisis estático

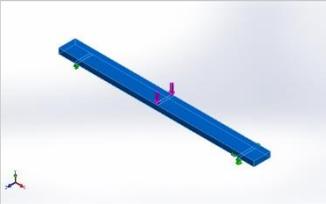
Figura21 Aplicación de cargas, prueba de flexión



Fuente: El autor, Aplicación SolidWorks

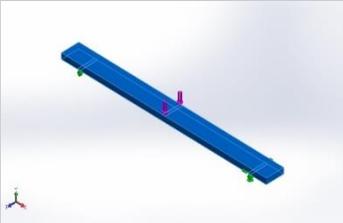
Información del modelo. En la tabla 13 representamos las características físicas del modelo a evaluar.

Tabla 13 Información del modelo de simulación

<i>Nombre de documento y referencia</i>	<i>Tratado como</i>	<i>Propiedades volumétricas</i>
Flexión 	Sólido	Masa:0.0088004 kg Volumen:8.00037e-006 m ³ Densidad:1100 kg/m ³ Peso:0.086244 N

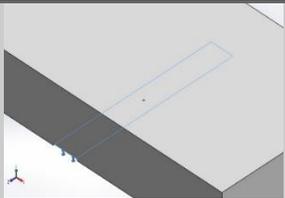
Propiedades del material. En la tabla 14 se describen las propiedades mecánicas del modelo proceso de simulación

Tabla 14 Propiedades mecánicas del modelo de simulación

<i>Referencia de modelo</i>	<i>Propiedades</i>		<i>Componentes</i>
	Nombre:	Epoxy, sin carga	Sólido (pieza flexión)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico	
		lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Desconocido	
	Límite de tracción:	2.8e+007 N/m²	
	Límite de compresión:	1.04e+008 N/m²	
	Módulo elástico:	2.415e+009 N/m²	
	Coefficiente de Poisson:	0.35	
Densidad:	1100 kg/m³		

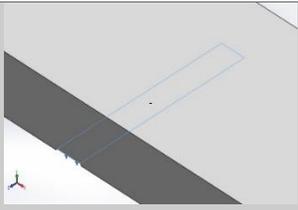
Carga y sujeciones. En la tabla 15 se representa las cargas aplicadas al modelo de simulación

Tabla 15 Aplicación de cargas del modelo de simulación

<i>Nombre de sujeción</i>	<i>Imagen de sujeción</i>	<i>Detalles de sujeción</i>	
Fijo-1		Entidades:	1 cara(s)
		Tipo:	Geometría fija

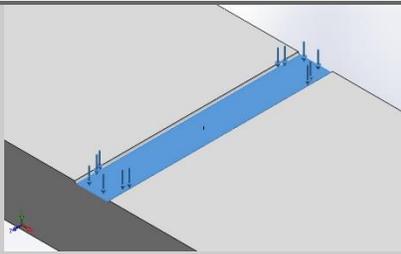
Fuerzas resultantes

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0.00166702	19.5752	-5.126e-005	19.5752
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

Rodillo/Control deslizante-1		Entidades: Tipo:	1 cara(s) Rodillo/Control deslizante
---------------------------------	---	-----------------------------------	---

Fuerzas resultantes

Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0	19.3566	0	19.3566
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

<i>Nombre de carga</i>	<i>Cargar imagen</i>	<i>Detalles de carga</i>
Fuerza-1		Entidades: Tipo: Valor: 1 cara(s) Aplicar fuerza normal 39 N

Fuerzas Resultantes

Tabla 16 Fuerzas resultantes del modelo de simulación

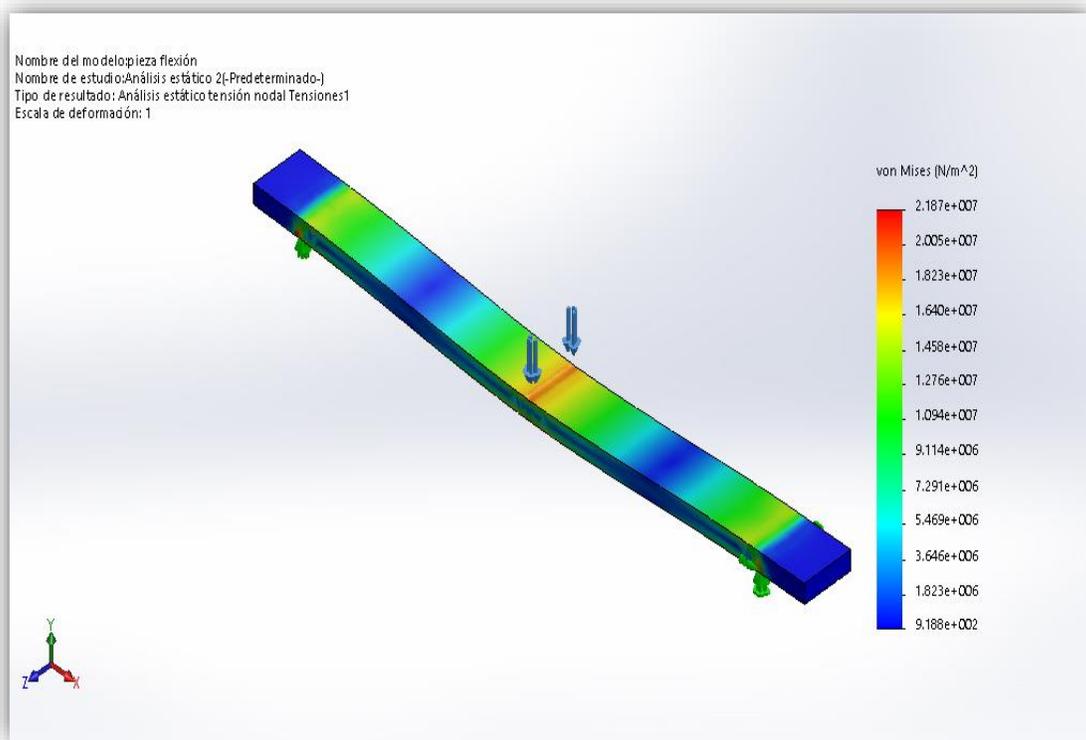
<i>Conjunto de selecciones</i>	<i>Unidades</i>	<i>Sum X</i>	<i>Sum Y</i>	<i>Sum Z</i>	<i>Resultante</i>
Todo el modelo	N	-0.00166702	38.9319	-5.126e-005	38.9319

Resultados del estudio. Una vez caracterizado el modelo de simulación, la aplicación de carga y las reacciones generadas por el esfuerzo, se obtuvo los siguientes resultados.

Tensiones

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	9.188e+002N/m ² Nodo: 863	2.187e+007N/m ² Nodo: 3691

Figura22 Pieza flexión-Análisis estático -Tensiones



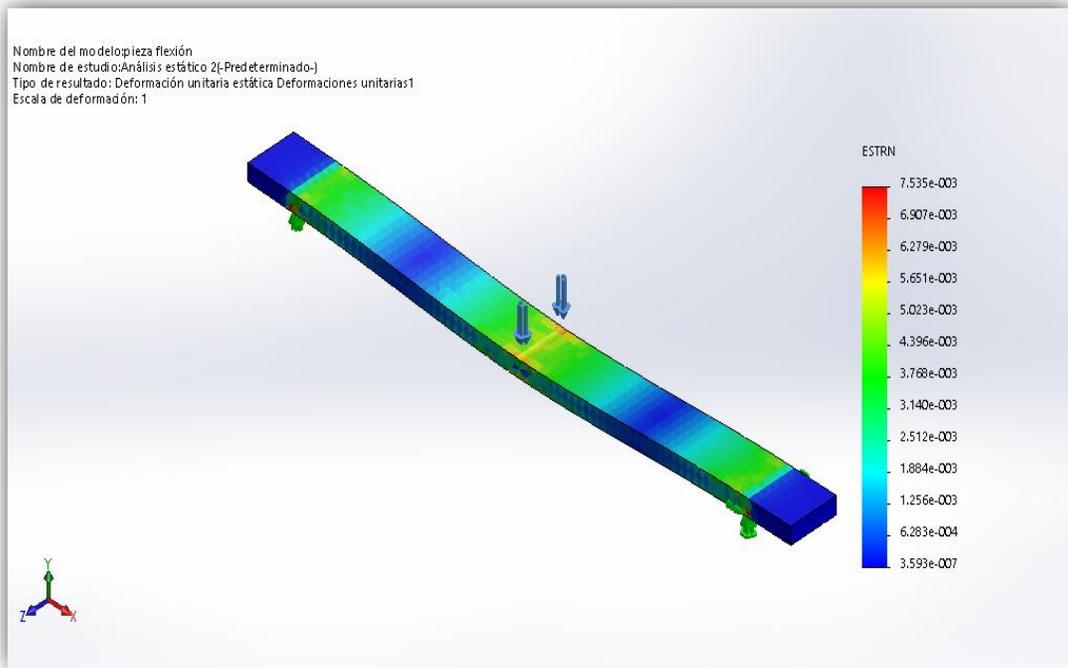
Fuente: El Autor, Aplicación SolidWorks 2019

El esfuerzo máximo fue de 22 MPa en el centro de la probeta donde se aplica la carga y un esfuerzo mínimo de 0,00091 MPa en los extremos de la probeta (Figura23)

Deformaciones

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	3.593e-007	7.535e-003
		Elemento: 2924	Elemento: 2056

Figura23 Pieza flexión-Análisis estático -Deformaciones unitarias



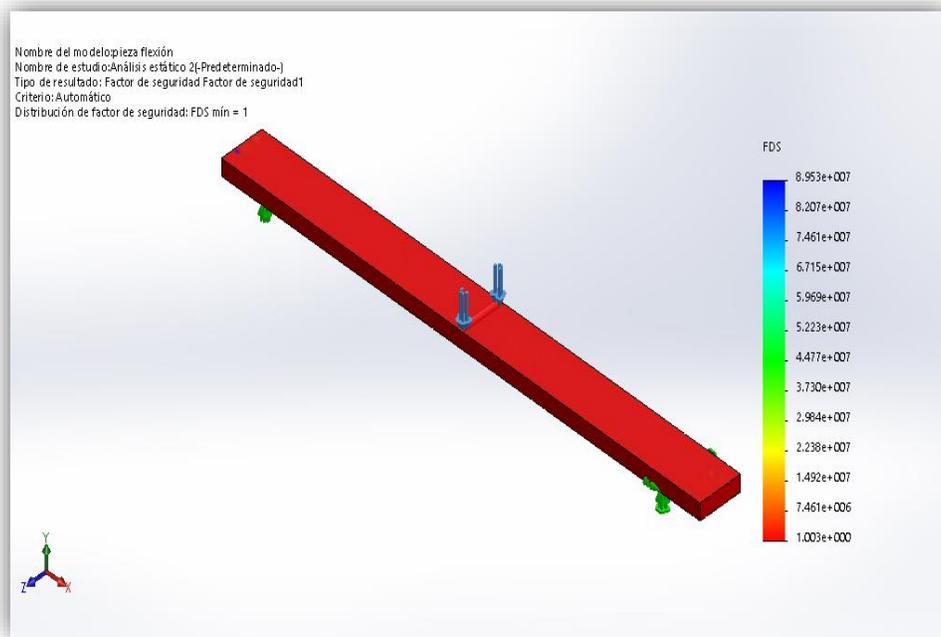
Fuente: El autor 2019, Aplicación SolidWorks

Deformación máxima de 3mm en el centro de la probeta y en los puntos de apoyo no hubo desplazamiento

Factor de Seguridad

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
Factor de seguridad1	Automático	1.003e+000	8.953e+007
		Nodo: 5954	Nodo: 5080

Figura24 Pieza flexión-Análisis estático -Factor de seguridad



Fuente: El autor 2019, Aplicación SolidWorks

Factor de seguridad es 1 como límite de fluencia del material

5 ANALISIS DE RESULTADOS

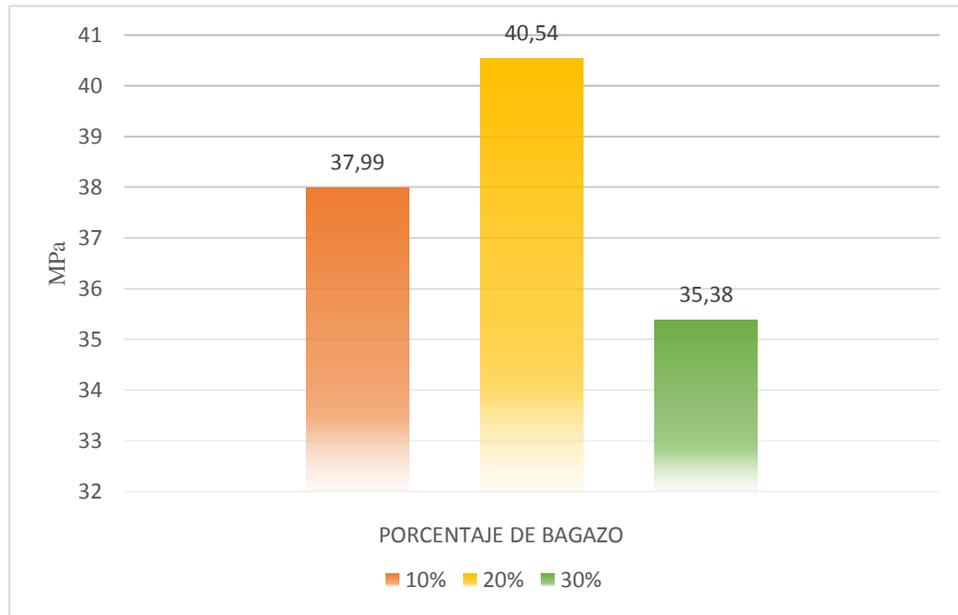
Una vez obtenidos los resultados de las pruebas se procedió a el análisis de los datos para determinar las conclusiones del estudio, se realizará un procedimiento adecuado a los resultados generados en los diferentes tipos de pruebas. En primer lugar, se analizarán los resultados obtenidos de en los ensayos de laboratorio para los tres tipos de probetas con diferentes concentraciones de bagazo y las pruebas por el método de elementos finitos (MEF) con el programa *SolidWorks Simulation*. Pese a tratarse de un material compuesto se trató de realizar una aproximación lo más cercana a la realidad como las características de homogeneidad de la fibra.

5.1 Pruebas de Laboratorio

Como primera instancia se describe los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y el comportamiento de la probeta al utilizar el bagazo de caña como material de refuerzo en la resina epoxi.

Resistencia máxima que es la propiedad del material de soportar un esfuerzo antes de fallar (módulo de ruptura)

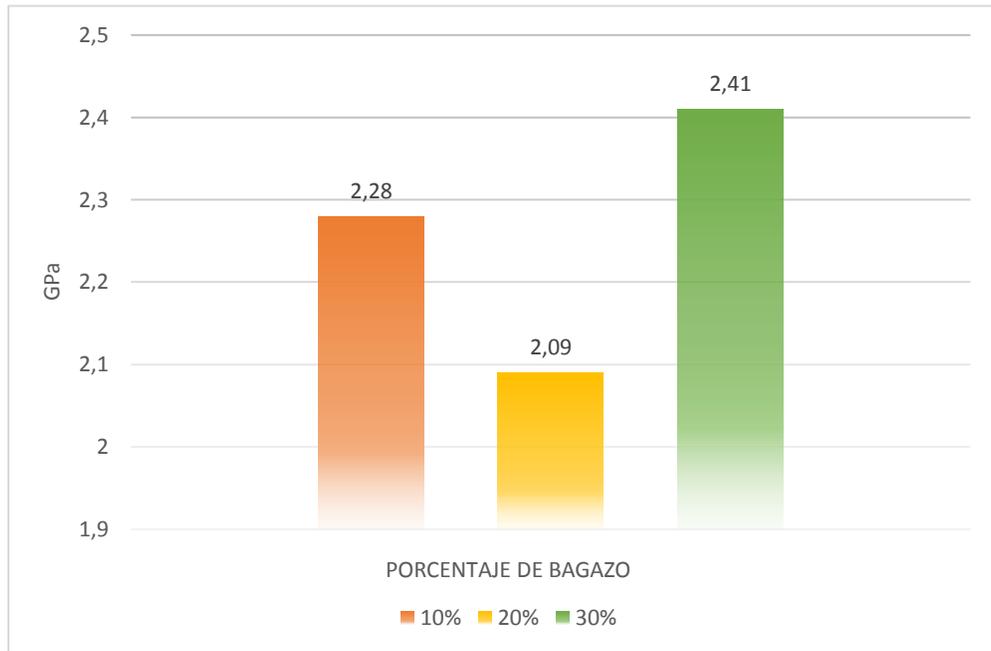
Figura 25 Resistencia máxima de las pruebas experimentales



Al incorporar las fibras de bagazo de caña como material de refuerzo a la resina epoxi se puede observar un incremento a la resistencia a la flexión, esto nos permite concluir que las fibras afectan positivamente la resistencia mecánica, siendo el compuesto al 20% la de mejor comportamiento al soportar una carga de 40, 54 MPa antes de la falla.

Módulo de elasticidad (Módulo de Young) es el comportamiento de un material elástico de acuerdo con la dirección de aplicación de una fuerza e indica la rigidez de un material, cuanto mayor sea el valor mayor de módulo de elasticidad más rígido es el material.

Figura 26 Módulo de elasticidad pruebas experimentales



La incorporación de fibras de bagazo de caña influye en el módulo de elasticidad generando un material de mayor rigidez, siendo el compuesto al 30% la de mayor valor

6 ANALISIS DE SOSTENIBILIDAD

Mediante la implementación de la herramienta *SolidWorks Sustainability* se evaluó el impacto medioambiental en el desarrollo de un objeto a lo largo del ciclo de vida, con la finalidad de tener productos más sostenibles con una menor huella de carbono, menor consumo energético y menor contaminación del aire y del agua. Mediante estas pruebas se pudo medir el impacto ambiental en las diferentes etapas del ciclo de vida como el tipo de material, proceso de fabricación, transporte, el uso y la disposición final. El software incluye parámetros medio ambientales que es un conjunto de datos que se han conseguido mediante experimentación científica y resultado empíricos obtenidos en campo que se asignan al material o proceso de fabricación para la medición de las huellas, este tipo de estudio nos permite realizar comparaciones de los productos y obtener un mejor diseño ambiental

En el desarrollo del análisis de sostenibilidad es necesario definir una serie de características del producto a evaluar, entre los usos de la resina epoxi se encuentran elementos decorativos esto debido a la elevada resistencia, brillo y dureza, por tal motivo se evalúa el tablero de una mesa fabricada en resina epoxi según la información relacionada en la tabla 17, el peso del producto se relación al tamaño de la probeta utilizado en las pruebas mecánicas y se establecido que la región de fabricación y utilización del producto sean las misma para que el transporte no sea un valor influyente en los resultados del impacto medioambiental.

Tabla 17 Características del producto

<i>Información General</i>	
<i>Peso</i>	8.80 g
<i>Proceso de fabricación</i>	Moldeo por inyección
<i>Construido para durar</i>	40 años

<i>Utilización durante</i>	15 años
<i>Región de fabricación</i>	Suramérica
<i>Región de utilización</i>	Suramérica

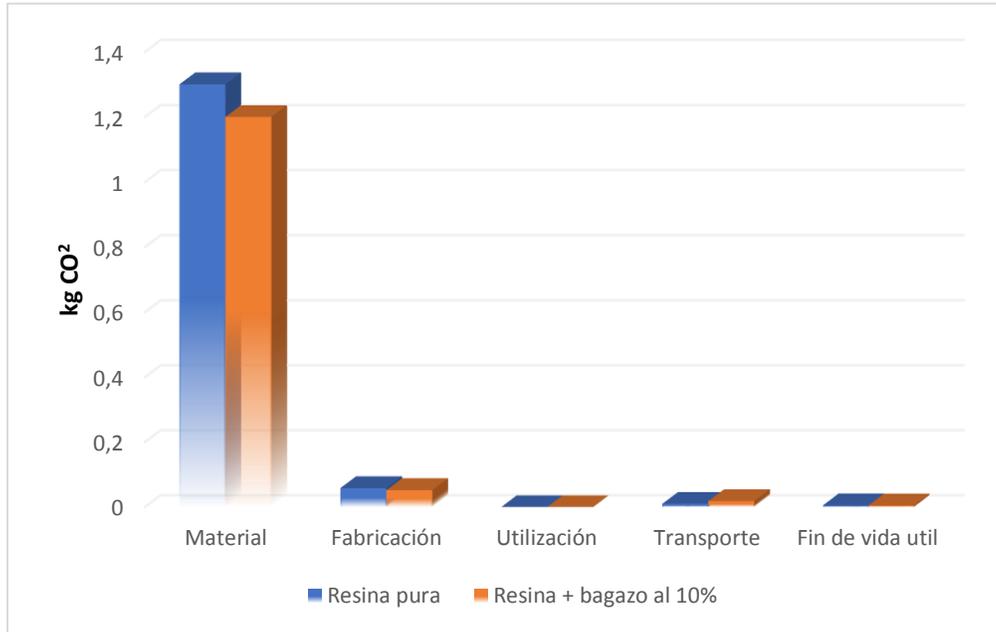
6.1 Huella de Carbono

Es la medida de dióxido de carbono y otras emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen a incrementar la temperatura media de la tierra, estas emisiones, mayoritariamente generadas por la combustión de combustibles fósiles, son las responsables en gran medida del cambio climático. Los resultados de la huella de carbono del producto fabricado en resina epoxi sin refuerzo comparada con la resina con bagazo de caña se muestran en la tabla 18.

Tabla 18 Indicadores huella de Carbono

	Resina	Resina + Bagazo
<i>Material</i>	0.079 kg	0.071 kg
<i>Fabricación</i>	0.012 kg	0.011 kg
<i>Utilización</i>	0.00 kg	0.00 kg
<i>Transporte</i>	7.0E-4 kg	1.3E-3 kg
<i>Fin de la vida útil</i>	7.0E-3 kg	6.5E-3 kg
Total	0,098 kg CO₂	0,089 kg CO₂

Figura27 Comparativo Huella de Carbono



6.2 Energía total consumida

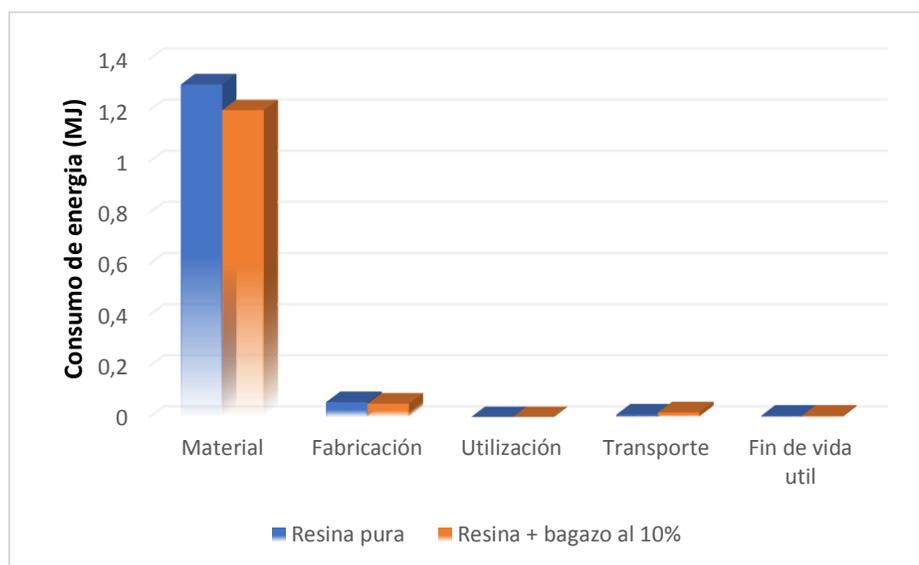
Medida expresada en mega julios (MJ) de las fuentes de energía no renovables asociadas con el ciclo de vida del producto analizado. No sólo incluye la electricidad y los combustibles utilizados durante el ciclo de vida del producto, sino también la energía necesaria para obtener y procesar dichos combustibles. Los resultados de la energía consumida del producto fabricado en resina epoxi sin refuerzo comparada con la resina con bagazo de caña se muestran en la tabla 16

Tabla 19 Consumo de energía

	Resina	Resina + Bagazo
Material	1,3	1,2
Fabricación	0,058	0,052
Utilización	0	0

<i>Transporte</i>	0,0095	0,018
<i>Fin de la vida útil</i>	0,0051	0,0048
Total	1,3 (MJ)	1,2 (MJ)

Figura28 Comparativo Consumo de energía



6.3 Acidificación atmosférica (aire)

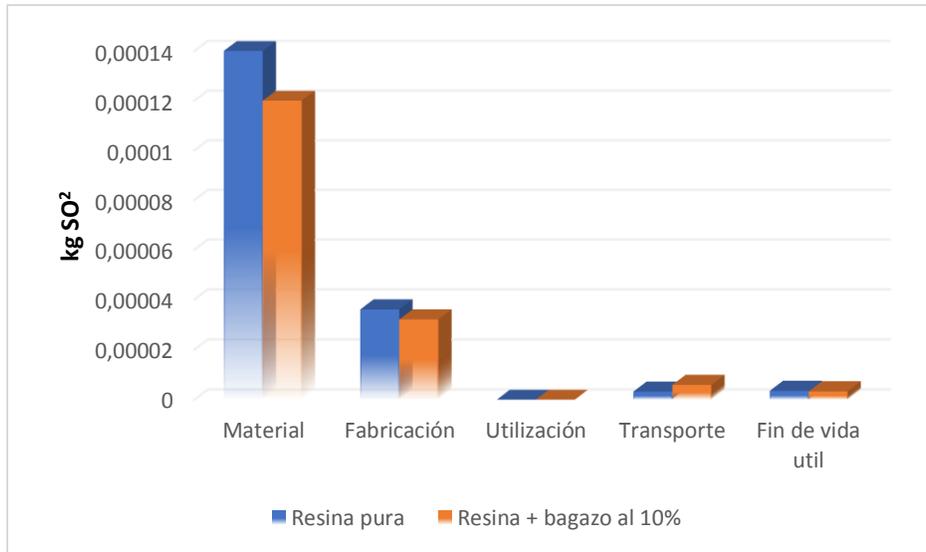
El dióxido de azufre, el óxido de nitrógeno y otras emisiones ácidas incrementan la acidez del agua de lluvia que, a su vez, acidifica suelos y lagos. Estos ácidos contaminan tierra y agua, y son tóxicos para la flora y fauna acuática. Este impacto medioambiental se mide en unidades de kg equivalentes de dióxido de azufre (SO₂). Los resultados de la acidificación atmosférica del producto fabricado en resina epoxi sin refuerzo comparada con la resina con bagazo de caña se muestran en la tabla 18.

Tabla 20 Acidificación Atmosférica

	Resina	Resina + Bagazo
<i>Material</i>	0,000140	0,000120
<i>Fabricación</i>	0,000036	0,000032

<i>Utilización</i>	0	0
<i>Transporte</i>	0,0000032	0,0000059
<i>Fin de la vida útil</i>	0,0000035	0,0000033
Total	0,0001827 kg (SO₂)	0,0001612 kg (SO₂)

Figura29 Comparativo Acidificación Atmosférica



6.4 Eutrofización del agua

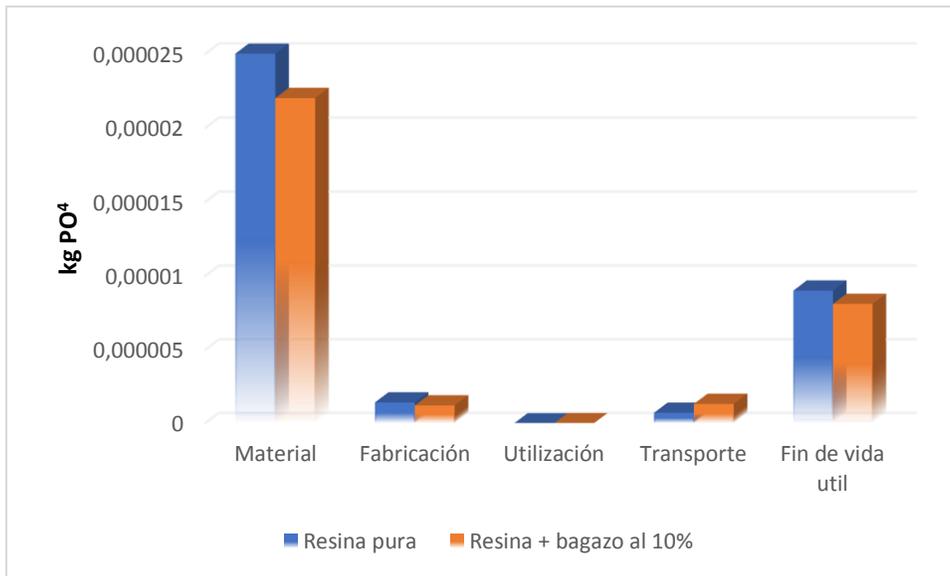
La eutrofización del agua se produce al agregar un exceso de nutrientes en un ecosistema acuático. El nitrógeno y el fósforo de aguas residuales y fertilizantes agrícolas generan una abundancia de algas que agota el oxígeno del agua y aniquila la flora y fauna. Normalmente, este impacto medioambiental se mide en fosfato equivalente a kg (PO₄) o en nitrógeno (N). Los resultados de la eutrofización del agua del producto fabricado en resina epoxi sin refuerzo comparada con la resina con bagazo de caña se muestran en la tabla 19.

Tabla 21 Eutrofización del agua

	Resina	Resina + Bagazo
<i>Material</i>	0,000025	0,000022

<i>Fabricación</i>	0,0000014	0,0000012
<i>Utilización</i>	0	0
<i>Transporte</i>	0,0000007	0,0000013
<i>Fin de la vida útil</i>	0,0000009	0,0000081
<i>Total</i>	0,0000361 kg (PO₄)	0,0000326 kg (PO₄)

Figura30 Comparativo Eutrofización del agua



La inclusión de fibras naturales en los materiales compuestos disminuye el impacto ambiental favoreciendo diferentes etapas del ciclo de vida, disminuyendo factores con la huella de carbono, consumo de energía, acidificación atmosférica y eutrofización del agua, donde las fases más representativas es la materia prima y fin de vida útil del producto.

7 CONCLUSIONES

En la revisión de la literatura se identificó que grandes volúmenes de bagazo de caña, residuo del proceso de la caña de azúcar son utilizados como cogeneración de energía en procesos productivos, aproximadamente el 85% del residuo total generado es utilizado como combustible, solo en el valle del cauca estos residuos ascienden a 6'172.297 toneladas, generando grandes cantidades de CO₂ y cenizas producto del proceso de combustión.

El uso de fibras del bagazo de caña como material de refuerzo en el desarrollo de materiales compuestos poliméricos mejoran las propiedades mecánicas, comprobando un incremento a la resistencia a la flexión. Los materiales compuestos de resina epoxi con bagazo de caña al 20% afectaron positivamente la resistencia mecánica según lo expuesto en la tabla 10.

Las muestras que presentaron mejores resultados en el módulo de elasticidad que es el comportamiento de un material elástico de acuerdo con la dirección de aplicación de una fuerza e indica la rigidez de un material, fueron los compuestos de resina epoxi reforzados con bagazo de caña al 30% en masa, en comparación al 20% y al 10%.

La metodología de elementos finitos permitió obtener resultados muy confiables mediante simulación de las pruebas de flexión, las probetas con la inserción del bagazo experimentan mejoras en la resistencia a la tensión comparada con la prueba de material de resina epoxi sin refuerzo, estos resultados son coherentes con las pruebas experimentales practicadas en laboratorio.

Incluir fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos para el desarrollo de productos permite mejora los aspectos medioambientales, se comprobó que adicionar un 10% de fibra de

bagazo disminuyó la huella de carbono en como materia prima en un 9,2%, los indicadores de consumo de energía, acidificación atmosférica y eutrofización del agua también disminuyeron significativamente.

8 RECOMENDACIONES

El desarrollo de materiales compuestos a base de resinas naturales se encuentra en etapas incipientes, realizar estudios para la creación de nuevos materiales compuestos 100% naturales, con excelentes características mecánicas es una necesidad que aportaría significativamente al medio ambiente y su campo de acción se diversificaría.

Se recomienda el aprovechamiento de los residuos naturales generados de los procesos productivos en el desarrollo o fortalecimiento de nuevos materiales como una alternativa viable técnicamente, los nuevos materiales compuestos permiten cumplir las exigencias funcionales y estéticas con un gran beneficio ambiental.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM-D7264. (2010). Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1. *Annual Book of ASTM Standards, i*, 1–11. <https://doi.org/10.1520/D7264>
- Becerra, A., Buitrago, A., & Pinto, P. (2016a). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. *Ingeniería Solidaria, 12*(20), 133–149. <https://doi.org/10.16925/in.v12i20.1548>
- Becerra, A., Buitrago, A., & Pinto, P. (2016b). Sostenibilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. *Ingeniería Solidaria, 12*(20), 133–149. <https://doi.org/10.16925/in.v12i20.1548>
- Becerra Quiroz, A. P. (2016). Evaluación de la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia - Colombia a partir del Análisis de Ciclo Vida. *Ingeniería Solidaria, 12*(20), 133–149. <https://doi.org/10.16925/in.v12i20.1548>
- Borsani, M. S. (2011). Materiales Ecológicos. Estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles. *UPC*.
- Brown-Gómez, Adolfo; Álvarez-Delgado, Amaury; Leal-Alfonso, Juan A.; Gómez-Estévez, Andrés; Renté-Zamora, Arletis; Rodríguez-Dorrego, María E.; Pajes-Castro, Reinaldo; Matellanes-Iglesias, Lina; Villamil-Nuñez, W. (2011). Fibras de bagazo como refuerzo en materiales termoplásticos. *Instituto Cubano de Investigaciones de Los Derivados de La Caña de Azúcar*.
- Cerqueira, E. F., Baptista, C. A. R. P., & Mulinari, D. R. (2011). Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites. *Procedia Engineering, 10*, 2046–2051. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.339>
- Duffo, G. (2011). Materiales y materias primas. *Materiales y Materias Primas*, (Capítulo 10), 43. <https://doi.org/789.C1229ACE>
- Fernández-rodríguez, J., & Díaz-hernández, N. (2017). Evaluación de un material compuesto

reforzado con fibras de bagazo en matriz de cemento. *Instituto Cubano de Investigaciones de Los Derivados de La Caña de Azúcar*.

Gómez, J. (2009). Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio. *Medellin: Universidad EAFIT*, 2(5), 255. Retrieved from ???

Jiménez Rodríguez, R. M. (2010). Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de discos cerámicos. *Cataluña: UPC*, 1–59. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/8943>

Laguado, L. A., & Archila, J. F. (2010). Caracterización y simulación por el método de elementos finitos de la aleación WIRON® Light fundida por inducción eléctrica aplicable al diseño de pilares para implantes dentales. *Viña Del Mar: Iberomet XI*, 3–10.

Laguado Villamizar, L. A. (2011). *Caracterización y simulación por el método de elementos finitos del comportamiento estructural de pilares para implantes dentales utilizando la aleación Wiron light® fundida por inducción eléctrica*. Universidad Industrial de Santander. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8082.2011.06.013>

Mojica-Pimiento, A., & Paredes-Vega, J. E. (2004). El cultivo de la caña panelera y la agroindustria panelera en el departamento de Santander. *Ensayos Sobre Economía Regional ; No. 17, (7)*. Retrieved from <http://repositorio.banrep.gov.co/handle/20.500.12134/2023>

Morales, Trujillo, J. (2011). Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación, 69.

Olmedo, J. (2008). *Diseño de estructuras tipo cáscara basadas en materiales compuestos laminares, utilizando el método de elementos finitos*. Escuela Politécnica Nacional. Retrieved from file:///C:/Users/HOGAR/Downloads/CD-2042.pdf

Olmo, O. A. del, Gutierrez, aracelia H., Herrera, M. A. B., Cabo, O. C., Polo, G. N. A., & Rodriguez, N. F. (2008). El bagazo de la caña de azucar. propiedades, constitución y potencial. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*. Retrieved from http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS_TECNICAS/032/New/Documentación/Parte V/Parte V.pdf

Osorio, G. (2007). *En la Produccion de Caña y Panela*. Medellín: Corporación Colombiana de

Investigación Agropecuaria.

- Osorio, S. J. A., Aristizabal, V. F., & Herrera, M. J. A. (2007). Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *Medellín: Dyna*, 69–79.
- Prada, D., & Rojas, J. F. (2017). Análisis comparativo entre el modelo teórico y una aproximación de elementos finitos utilizando ANSYS, de la deformación de una viga de perfil W12x40. *Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander*, (June).
- Roberto, D., & Ochoa, H. (2011). Análisis por el método de elementos finito de materiales compuestos de fibra de yute. *Bayamo: Universidad de Holguin*, (April).
- Rodriguez, W. (1999). Importancia estratégica de los nuevos materiales en el desarrollo sostenible y como alternativa de competitividad. *Revista de La Facultad de Ingeniería*.
- Rusell, L. (2010). Análisis por elementos finitos y experimental de flexión en tres puntos. *Nuevo León: Memorias Del XVI Congreso Internacional Anula de La Somim*.
- Salazar, C. (2016). *Manejo del bagazo en la agroindustria de la caña panelera en el nordeste antioqueño a partir de la gestión integral de residuos: Estudio de caso municipio de Yolombo*. Universidad de Manizales.
- Schettino, M. A. S., & Holanda, J. N. F. (2015). Characterization of Sugarcane Bagasse ash Waste for Its Use in Ceramic Floor Tile. *Procedia Materials Science*, 8, 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.063>
- Sood, M., & Dwivedi, G. (2017). Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review. *Egyptian Journal of Petroleum*. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.11.005>
- Stupenengo, F. (2011). Materiales y materias primas. *Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.*, (Capítulo 10).
- Taborda-rios, J. A., Cañas-mendoza, L. A., & Trisancho-reyes, J. L. (2017). Comparative study of the mechanical properties of the polyester resin reinforced with bamboo fiber as the substitute material Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú , como material sustituto de, *84(202)*, 35–41.

<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n202.57334>

Vásquez, V., Lucía, M., Amaya, A., & Ricardo, L. (2013). Diagnóstico de las condiciones de trabajo, en los trapiches del municipio de Chitaraque (Boyacá). *El Hombre y La Máquina*, (41), 45–55.

Velásquez Restrepo, S. M., Pelaéz Arroyave, G. J., & Giraldo Vásquez, D. H. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica : una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos Use of vegetable fibers in polymer matrix composites : a review. *SENA Centro Nacional de Asistencia Técnica a La Industria*, 77–86.

ANEXO

VISITA DE CAMPO

La visita de campo tiene como finalidad observar el proceso por el cual se obtiene el agente de refuerzo objeto del estudio, en este caso el bagazo de caña el cual es el residuo generado en la fabricación de panela.

A continuación, se describe los pasos observados en el proceso de producción de la panela a partir de la caña de azúcar en el municipio de Socorro del departamento de Santander y Colombia en general.

Información de la visita

Visita de Campo, Producción de panela

VISITA DE CAMPO	
<i>Responsable de aplicación de la técnica.</i>	Maestrante
<i>Sujetos o muestra a quien se aplica la técnica.</i>	Producción de panela
<i>Tiempo de aplicación de la prueba piloto y de la técnica.</i>	Observación directa, tiempo de la visita 2 horas, charla informal con los trabajadores y encargado del proceso
<i>Lugar de aplicación.</i>	Trapiche hacienda Majavita
<i>Registro de ejecución</i>	21 de noviembre del 2017

El cultivo de caña de azúcar genera empleo, contribuye al desarrollo económico, aporta en la estabilidad social y se convierte en uno de los cultivos que trabaja y está comprometido con el cuidado del medio ambiente y la sostenibilidad. De la caña de azúcar no se desperdicia nada. Sus hojas y bagazo son utilizadas en alimento para animales como ganado y porcinos dependiendo de cada productor.

La fibra de caña de azúcar sirve para la fabricación de papel entre otros usos. Esta fibra tiene la característica de ser biodegradable, compostable y reciclable. Es importante recalcar que en los cultivos de caña se hace control biológico, logrando que el uso de insecticidas sea mínimo o ya no se utilice.

La nueva alternativa que surge a partir de la Ley 1715 del 2014 (fomento a las energías renovables) que está siendo reglamentada por el ministerio de Minas y Energía, abre una nueva acción y es que los cultivadores de caña puedan generar energía en su finca a partir de la combustión del bagazo

Mediante un proceso de destilación de las mieles se fábrica etanol, combustible vehicular, considerado como la gran alternativa en la absorción de CO₂, contribuyendo así con el cuidado del medio ambiente. En Colombia se producen 120 toneladas de caña por hectárea, y de residuo quedan entre 40 y 60 toneladas.

A continuación, en este documento se hablará explícitamente de los pasos observados en el proceso de producción de la caña de azúcar en el municipio de Socorro del departamento de Santander y Colombia en general.

Proceso de producción de panela

Proceso de producción de la panela, Hacienda Majavita, Socorro, Santander



Fuente: El autor 2017

Molienda

Subproductos de la molienda:

- Jugo de caña de azúcar (GUARAPO)

- Bagazo de caña de azúcar (USO: COMBUSTIÓN)

Molienda de caña de azúcar



Fuente: El Autor, 2017

Extracción del guarapo y generación del residuo



Fuente: El autor, 2017

La extracción del jugo de la caña se lleva a cabo en el molino. El molino es una máquina con tres rodillos estriados (mazas) por los cuales se pasa la caña para *hacer la extracción del jugo o guarapo y separarlo del bagazo*. Existen diversos tipos de molinos:

- ✓ Molinos verticales: Tienen el engranaje en la parte superior de sus tres mazas. Son movidos generalmente por tracción animal, son muy populares en la pequeña industria panelera del país.
- ✓ Molinos horizontales: Pueden ser movidos por motor, rueda hidráulica o turbina. Generalmente son de tres mazas, pero los hay de cinco y hasta de ocho mazas en los Ingenios Paneleros con producciones superiores 150000 Kg de panela por semana.

Las mazas son los elementos que realizan el trabajo de molienda, un molino típico de cinco mazas consta de una unidad de molienda previa, de dos mazas, llamadas desmenuzadores y de un molino de tres mazas. El rayado y calibración de las masas, así como la correcta revolución del motor, garantizan un buen porcentaje de extracción de jugo o guarapo que luego será almacenado en tanques para finalmente pasarlo al tanque descachazador por medio de bombas o por gravedad.

En este caso es importante resaltar que el molino identificado en la visita al trapiche del socorro Santander, hace parte de la clasificación de molinos verticales.

Clarificación o limpieza

Clarificación del guarapo



Fuente: El Autor, 2017

La limpieza del jugo se efectúa tradicionalmente en fondos de acero inoxidable., los cuales se encuentran ubicados al final de la hornilla, con una temperatura aproximada de 40-60oC, donde se da inicio al descachazado. Actualmente se está introduciendo el uso de pre limpiadores. Su diseño consiste en un tanque de forma rectangular, de un metro de largo por 30 cms. de ancho y 60 de altura, con fondo en forma de V y una tabla retenedora de impurezas cercana a un extremo.

Las impurezas más pesadas como la arena y el lodo se van al fondo, los residuos livianos y el bagacillo flotan formando un colchón, el cual es retirado manualmente; el jugo limpio sale por la parte intermedia.

El jugo obtenido de la molienda de la caña en la fabricación de panela tiene entre 18-22 °Brix (% de sólidos solubles), generalmente.

Además del pre limpiador, se adiciona al jugo extractos mucilaginosos provenientes de la corteza macerada de árboles como el guásimo (*Guazuma ulmifolia lamark*), el balso (*Ochroma lagopus sw*) y el cadillo (*Triumfetta lapull*).

Estos agentes clarificantes en presencia de agua tibia forman una baba la cual, al adicionarse al jugo, forma con los sólidos en suspensión y otras impurezas del jugo un producto aglutinado, llamado cachaza, que al flotar permite separarla manualmente por medio de cucharones.

En algunos trapiches es común la adición de cal, pero no precisamente como un clarificante, se utiliza principalmente para ajustar el pH de los jugos, que generalmente debe encontrarse entre 5.2 y 5.6, para que el producto sea de óptima calidad. Cuando el jugo presenta un pH ácido, la cal neutraliza dicha acidez y forma grumos espumosos de impurezas que son eliminadas manualmente mediante el uso de cucharones metálicos de fondo perforado colocado al extremo de una vara en el proceso denominado "descachazado". Esta cachaza debe eliminarse antes de que el jugo comience a hervir. La adecuada separación de cachaza garantiza un producto de mejor calidad.

Concentración y filtrado

Concentración



Fuente: El Autor, 2017

Esta fase consiste en elevar el contenido de azúcar en el jugo, de 20 a 70 °Brix aproximadamente. En esta etapa es importante un manejo adecuado de la miel, ya que este proceso es incide directamente en la textura final de la panela. Cuando el pH del jugo es bajo, se favorece la formación de azúcares reductores que modifican la consistencia final del producto y pueden llegar a impedir su cristalización.

La concentración se efectúa en hornos quemadores que utilizan el bagazo de la misma caña para calentar uno o varios recipientes en los cuales se limpian, clarifican, evaporan y concentran los jugos de la caña hasta obtener la meladura o las mieles que permiten fabricar la panela. Esta concentración se efectúa en un tren de 3-4 recipientes circulares.

El horno está compuesto por: Cámara de combustión, el cenicero, ducto de humos, chimenea, y fondos. Durante la concentración es conveniente la adición de cera de laurel para evitar la formación excesiva de espuma y evitar que el jugo se derrame de los fondos.

El Punteo: Es la fase mediante la cual se da el punto final a la miel para obtener la panela. Se verifica en la última paila. El punto de la panela lo establece el operario experto de varias formas:

Se toma una muestra y se introduce en agua, agitando constantemente, hasta que forme una melcocha transparente, la cual se compacta en forma de esfera, ésta es lanzada contra una superficie, si rebota está en el punto se observa formación de hilos con el remellón (cucharón) durante el escurrido. En los dos casos, los °Brix oscilan entre 89 y 91 y la miel alcanza temperaturas alrededor de 118 a 125°C

Batido

Batido de la melcocha



Fuente: El Autor, 2017

Una vez terminado el proceso de filtrado, la materia resultante que se asemeja a una melcocha es depositada en una batea en este caso de un aluminio inoxidable donde se procede a batir para enfriar dicho producto y obtener una contextura más maleable.

Moldeo

Moldeo de la panela líquida



Fuente: El Autor, 2017

Moldeo de la panela líquida



Fuente: El Autor, 2017

Se vierte la panela líquida sobre un conjunto de moldes cuadrados hechos en madera, proceso que es realizado con la ayuda de dos espátulas para una mejor distribución de dicho líquido, una vez hecho esto, se espera hasta que tome la típica contextura sólida de la panela.

Empaque

Empaque de la panela



Fuente: El Autor, 2017

Una vez solidificadas las panelas, se retiran los moldes, pasan por una empacadora dándoles una cubierta plástica sellada para luego ser guardadas en cajas de 30 unidades y ser llevadas a la bodega.

A pesar de la búsqueda del aprovechamiento del bagazo utilizándolo como combustible, la emisión de grandes cantidades de contaminantes por la quema es evidente, darle un mejor uso al bagazo podría dar un ingreso extra al trapiche, ingreso con el que se financiaría un combustible limpio y disminuir el impacto ambiental.