



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DEL **CARIBE**

**SIMULACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE UN
MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADO CON
FIBRAS NATURALES (*Polietilentereftalato PET (pet)-fibras de coco*).**

RAFAEL ARTURO BERDEJO NIEVES

**FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA
BARRANQUILLA**

2022



**SIMULACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE UN
MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADO CON
FIBRAS NATURALES (*polietileno- tereftalato (pet)-fibras de coco*).**

RAFAEL ARTURO BERDEJO NIEVES

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar por el título de:
Magíster en**

Director

HENRY SANTAMARIA DE LA CRUZ.

Co-director

JORGE MENDOZA .

Universidad Autónoma del Caribe

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Mecánica

Barranquilla, Colombia

2022



Nota de Aceptación:

Firma Coordinador de Opción de Grado

Firma del Jurado

Firma del Jurado



Agradecimientos

Mi Profundo Agradecimiento a: mis directores de trabajo de grado **HENRY SANTAMARIA Y JORGE MENDOZA**, por compartir sus grandes conocimientos, por su apoyo y asesoramiento en todas las etapas de la elaboración de mi proyecto: *Evaluación de las propiedades térmicas, mecánicas y de biodegradabilidad de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales (polietileno-tereftalato (pet)-fibras de coco).*

A la universidad de Autónoma del Caribe y sus profesores les agradezco su digna labor, profesionalidad por fomentar la educación, por compartir sus capacidades y conocimientos científicos que han inculcado valores y sembrando grandes conocimientos que hoy nos hacen mejores ciudadanos. De manera especial agradecemos a la facultad de ingeniería y al departamento de Ingeniería Mecánica, por contribuir y fortalecer los cimientos de nuestra vida profesional

.

.

Resumen

Este trabajo se centró en la elaboración de simulaciones de las propiedades físicas, mecánicas y térmicas para un conjunto de materiales compuestos, de matriz de PET y fibras naturales de coco, en concreto la incorporación del 30, 40 y 50 por ciento de fibras en volumen de material, respectivamente, se configuró y establecieron los parámetros generales de los materiales simulados. Se resalta que la simulación fue realizada empelando elementos finitos con mallas formadas a partir de elementos hexaédricos se encontró que la adición de fibras naturales de coco, genera un beneficio importante las propiedades mecánicas del material compuesto simulado, conforme aumenta el volumen de fibras, mientras que las propiedades térmicas como es el caso de la conductividad y la difusividad térmica. Los resultados permitieron simular y obtener materiales con tres tipos de características que pueden ser propuestos para un rango amplio de aplicaciones.

Palabras claves: Material compuesto, fibras naturales, ensayo de tensión y análisis térmico

Abstract

This work focused on the development of simulations of the physical, mechanical and thermal properties for a set of composite materials, PET matrix and natural coconut fibers, specifically the incorporation of 30, 40 and 50 percent of fibers by volume of material, respectively, the general parameters of the simulated materials were configured and established. It is highlighted that the simulation was carried out using finite elements with meshes formed from hexahedral elements, it was found that the addition of natural coconut fibers generates an important benefit in the mechanical properties of the simulated composite material, as the fiber volume increases, while thermal properties such as conductivity and thermal diffusivity. The results allowed to simulate and obtain materials with three types of characteristics that can be proposed for a wide range of applications.

Keywords: Composite material, natural fibers, tensile test and thermal analysis

2 Contenido

Resumen	V
Lista de símbolos	IX
Lista de Figuras.....	X
Lista de Tablas	XII
Introducción.....	1
Planteamiento del problema.....	3
Justificación del trabajo	4
Antecedentes	6
Materiales compuestos	6
Materiales compuestos reforzados con fibras naturales.....	7
Estado del arte del uso de fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos.	11
El coco como fibra de refuerzo	16
Propiedades mecánicas.....	18
El módulo elástico.....	20
Modelos teóricos relacionados con la simulación empleando métodos de elementos finitos.....	21
La etapa de pre-proceso:	22
La etapa de la solución:	25
La etapa del post-procesado:.....	25
Objetivos	27
Metodología experimental.....	28
Creación del banco de propiedades generales de los materiales iniciales.....	28
Estructura y diseño del material compuesto fibras unidireccionales aleatorios. 30	
Creación de geometrías para las diferentes pruebas y ensayos.	33
Simulación propiedades mecánicas (Ensayo de resistencia mecánica).	34
Simulación propiedades térmicas (Estudio del comportamiento térmico).	34
Resultados y discusión: Propiedades mecánicas.....	37
Computación de los módulos de elasticidad	37
Procedimiento de tracción sobre probeta plana	39
Resultados y discusión: Propiedades Térmicas	50
Estudio térmico centrado en flujo de calor en estado estacionario	52

Estudio térmico centrado en flujo de calor en estado transitorio	55
Conclusiones.....	64
Recomendaciones a futuro.....	65
REFERENCIAS.....	66

Lista de símbolos

Símbolo	Término	Unidad SI
D	Difusividad térmica	
E	Módulo elástico	Pa
ρ	Densidad	$\frac{\text{mg}}{\text{cm}^3}$
G	Módulo cortante	Pa
T	Temperatura	°C
σ	Esfuerzo	Pa
δ	Deformación	mm/mm
κ	Conductividad térmica	W/m*K
C_P	Calor específico a presión constante	J/kg*K
Q	Flujo de calor	W/m ²

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales)
MCP	Materiales compuestos de matriz polimérica
RVE	Modelo de diseño de tipo material compuesto de fibras unidireccionales aleatorias
MC	Material compuesto
CO	Material reforzado con fibras de coco
PET	Tereftalato de polietileno
EF	Elementos finitos

Lista de Figuras

Figura 1: Estructura de un material compuesto de matriz polimérica.....	6
Figura 2: Tipos de fibras naturales empleadas como refuerzos en materiales compuestos [11].....	9
Figura 3: Producción de coco en Colombia para 2017 para los diferentes departamentos, comparados con los mayores productores a nivel mundial [28]. .	18
Figura 4: Ejemplo de simulación de la flexión presentada por una fibra embebida en una matriz polimérica (izquierda) y la presencia de una fibra sin refuerzo (derecha) [32].	20
Figura 5: Proceso de análisis por elementos finitos [36].	22
Figura 6: Estructuras que se emplean en el pre-procesado.....	23
Figura 7: Elementos del mallado de tipo hexaédricos (figura a la izquierda) y tetraédricos (figura a la derecha) [2].....	24
Figura 8: Interfaz inicial del software ANSYS AIM 18.0.....	28
Figura 9. Recopilación del marco general de propiedades empleadas para el PET.	29
Figura 10. Compilación de propiedades generales para las fibras de Coco.....	30
Figura 11. Esquema tridimensional del modelo RVE para materiales compuestos de fibras unidireccionales aleatorias.	31
Figura 12. a) Opciones de parametrización de las fibras y b) Construcción del mallado del material compuesto PET/Coco.	32
Figura 13. a) Proceso de solución y b) Tabla ejemplificada de las propiedades consolidada del material compuesto.	33
Figura 14. Ejemplo de la geometría utilizada para la simulación de propiedades térmicas del material compuesto [58], [59].....	35
Figura 15. Evidencia del modelo y distribuciones de la deformación total en las muestras luego de la tracción a) PET 0CO b) 30CO c) 40CO y d) 50CO.	41
Figura 16. Resultados de la deformación equivalente elástica de cada muestra a) PET b) 30CO c) 40CO y d) 50CO.	42
Figura 17. Resultados de la deformación elástica equivalente en función del tiempo de la simulación (gráfica semiLog en el eje Y).	44
Figura 18. Resultados de la simulación, valores de esfuerzo para las muestras a) PET b) 30CO c) 40CO y d) 50CO.	46
Figura 19. Resultados compilados del esfuerzo máximo a la tracción para las muestras analizadas.	46
Figura 20. Resultados de esfuerzo y deformación equivalente	47
Figura 21. a) Comportamiento de la magnitud energético del error durante el proceso de la situación, b) cambio del momento en la estabilidad del proceso de simulación para la muestra con 30% de fibra de coco.	48
Figura 22. Energía del error y convergencia del momento de una fuerza en el tiempo para las muestras a. y b. 40CO y c. y d. para la muestra de 50CO.	49
Figura 23. Distribución de temperatura para las diferentes muestras a) 30CO, b) 40CO y c)50CO.....	53
Figura 24. Ejemplo de la distribución de flujo de calor estacionario, para la muestra 30CO.....	54

Figura 25. Figuras de distribución de temperatura para el sistema 40CO en tiempos de: a) 10s, b) 100s y c) 1000s	56
Figura 26. Curva de estabilización de la temperatura promedio en los análisis térmicos en estado transitorio para la muestra 40CO	57
Figura 27. Comparación de la curva de estabilización de temperatura en análisis térmicos transitorios para las diferentes muestras	58
Figura 28. Curvas de estabilización del flujo térmico total promedio presentado para todas las muestras en el análisis térmico transitorio.	60
Figura 29. Comparación de las magnitudes de flujo térmico en las diferentes direcciones en función del tiempo, para a) Muestra PET y b) Muestra 30CO.....	61
Figura 30. Representación gráfica del flujo relativo en función del gradiente de temperatura.....	62

Lista de Tablas

Tabla 1. Principales fibras disponibles a escala mundial [9].	8
Tabla 2: Propiedades físicas y mecánicas de fibras derivadas de productos naturales [9].	17
Tabla 3. Propiedades generales de PET en volumen.	29
Tabla 4. Nomenclatura de las muestras analizadas.	30
Tabla 5. Compilación de propiedades mecánicas de los diferentes materiales	37
Tabla 6. Valor del módulo de elasticidad empleando la regla de mezclas.	38
Tabla 7. Valores de compilados de parámetros térmicos obtenidos en la simulación empleando la herramienta “Materials Designer”	51
Tabla 8. Resultados del flujo de calor en estado estacionario.	54
Tabla 9. Ajustes de tendencia para describir la temperatura promedio en función del tiempo.	58
Tabla 10. Resultados de la determinación de la difusividad térmica de los materiales simulados en estado estacionario.	62

1 Introducción

En la actualidad la industria demanda de una mayor cantidad de piezas que puedan suplir necesidades únicas que cada vez requieren que estos sean compuestos por materiales que tengan un conjunto muy amplio de características generales que los materiales naturales y sintéticos tradicionales no alcanzan a cumplir, como es el caso de elevadas propiedades físico-mecánicas, tecnológicas y otras como es el caso de resistencias mecánicas elevadas, tolerancia a altas temperaturas, resistencia fenómenos corrosivos, excelentes valores de tenacidad, adicionalmente se busca que los materiales tengan una gravedad específica, que permiten fabricar elementos ligeros y resistentes [1].

Dado lo anterior, el desarrollo industrial ha encontrado como principal respuesta a ese conjunto de necesidades se plantean los materiales compuestos que mediante una selección adecuada de los materiales, sus proporciones y sus distribuciones o patrones del refuerzo en un volumen definido. Como ejemplos más interesantes se encuentran materiales cuya matriz es un material polimérico, por las bajas densidades que en la mayoría de los casos presentan estos compuestos de origen de hidrocarburos. Además, una de las razones más importantes para emplear materiales poliméricos reforzados con fibras naturales se centra principalmente en la posibilidad de fabricar materiales compuestos de bajo costo y baja densidad (aproximadamente la mitad del vidrio común) [2].

Diferentes investigadores han determinado que existe un gran acercamiento entre los resultados reales con los encontrados empleando la regla de mezclas (ROM) para la predicción de algunas propiedades mecánicas, como es el caso de resistencia a la tracción y los determinados experimentalmente para algunos sistemas de materiales compuestos con fibras naturales [3]. Entre otras investigaciones relevantes se encuentra la realizada por Nissan, que con ayuda de ecuaciones centradas en la micromecánica para estudiar la evolución del módulo de elasticidad resultante a esfuerzos de tracción y en función de los cambios del porcentaje de fibras y la orientación de las mismas. Los resultados obtenidos fueron altamente correlacionados con los resultados reales [4].

Harjeet S. et al. estudiaron la influencia de diferentes parámetros de la adhesión de la interfase entre fibras de hidroxapatita (HAp) y una matriz de polietileno de alta densidad (HDPE) sobre el módulo de elasticidad y el esfuerzo de fluencia empleando un conjunto de diferentes modelos teóricos basados en el comportamiento mecánico [5].

Yashwant S. y Ravindra I. en 2015 realizaron un estudio centrado en la verificación de diferentes modelos mecánicos teóricos, como es el caso de las series paralelas,

Halpin-Tsai, Halpin-Tsai modificado y finalmente el modelo Hirsch. Los anteriores modelos centrados en la determinación de fenómenos a tensión y comparar todo el compendio con resultados experimentales determinados empleando una máquina universal de ensayos [6].

En la actualidad se encuentran muchos trabajos en los cuales se evalúan diferentes adiciones de fibras naturales para reforzar materiales poliméricos, sin embargo, se resalta que no se encuentran experimentaciones centradas en la adición de fibras naturales de coco con PET como matriz y debido a ello, el uso de métodos de simulación de materiales y el uso de los elementos finitos permiten evaluar a más detalle propiedades en materiales de los cuales no se tiene registros experimentales a nivel de laboratorio.

Lo mencionado anteriormente, puede lograrse empleando diferentes pasos y rutinas que posteriormente se detallarán en la sesión “Antecedentes” y entre estos procedimientos a nivel general se puede partir de una selección correcta de registros de datos iniciales, elaboración de piezas geométricas siguiendo normas técnicas para estos materiales bajo condiciones más acercadas a las que comúnmente se someten en la vida real. Para la determinación de estas propiedades se emplean modelos y ecuaciones que ya se encuentran preestablecidos y la utilización del mallado de diferentes elementos del material, permiten obtener a detalle el comportamiento de cualquier pieza en múltiples puntos, para después analizar los resultados.

2 Planteamiento del problema

La limitación humana para elaboración de complejos experimentos y cálculos, así como entender las diferentes y pequeñas interacciones que presentan los elementos de un sistema de un material compuesto de matriz polimérica, así como es fácil predecir a detalles exactos los fenómenos mecánicos y térmicos a los cuales el material estará sometido. La necesidad de aplicar nuevos métodos para entender el material y su comportamiento inclusive en estancias previas de la fabricación del mismo, aprovechando así el procedimiento de simulación.

El empleo de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras en la actualidad está siendo utilizados de manera más frecuente, todo esto debido a la alta demanda de propiedades mecánicas de en usos específicos que combinada con las bajas densidades presentadas por este tipo de materiales se ha permitido el desarrollo de estructuras más versátiles. Sin embargo, el uso de materias primas que si en su totalidad elaboradas con componentes extraídos de hidrocarburos a la vez que los diferentes procedimientos y extracción son altamente contaminantes y generan subproductos que poco a poco afectan la naturaleza y el medio ambiente.

También, es necesario describir que se presentan un conjunto de materias primas generados de productos agrícolas, los cuales permiten elaborar fibras de origen natural que pueden ser utilizados como elementos de refuerzos en materiales compuestos de matriz polimérica y así resolver la acumulación de residuos agrícolas.

Por esta razón este trabajo busca emplear los métodos de simulación mecánica y térmica para un material compuesto de matriz polimérica (PET) reforzado con fibras de Coco, para entender el comportamiento de este material y de los diferentes elementos que componen su sistema y estructura.

3 Justificación del trabajo

La necesidad de emplear materiales con características alternativas para alimentar a las siempre exigentes demandas de las diferentes industrias como es el caso del sector aeroespacial, vehículos motorizado y los enfocados en la generación de energía han permitido ampliar el horizonte de la selección de materiales más allá de los tradicionales, abriendo así el espectro a la selección de materiales compuestos con bajas densidades y que posean materias primas de origen natural que poseen como valor agregado en torno a la economía circular y el desarrollo sostenible [7].

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales han abierto una vertiente interesante para muchos países que pueden aprovechar importantes contenidos de residuos de carácter orgánico, como es el caso del Colombia con su importante producción de Palmeras de Coco, ya que este presenta fibras que no eran muy empleadas en tiempos pasados y que en la actualidad se han incorporado progresivamente a diferentes aplicaciones, principalmente en la industria automotriz como refuerzo de materiales poliméricos, gracias a su facilidad de acceso en diferentes zonas en la región costera colombiana [8].

Sin embargo, la principal dificultad que se presenta en este tipo de materiales a nivel industrial es el desconocimiento de las propiedades generales de los materiales compuestos, así como la interacción entre la matriz y el refuerzo, y en específico las propiedades mecánicas y térmicas, las cuales permitirán identificar manera el material y que se abra la posibilidad de que en un futuro esto se pueda incorporar a la industria mejorando así la calidad de los procesos y del material en general. También, es necesario tener en cuenta que este trabajo no considera el tratamiento necesario para adecuar y madurar las fibras a utilizar [2].

En expresiones más específicas en la mayoría de las soluciones ingenieriles que involucran los materiales compuestos se centra en la capacidad de estos en presentar una mejora en propiedades mecánicas o térmicas de un material polimérico sin presentar una modificación considerable en parámetros físicos como es el caso de la densidad, logrando mejorar los valores del esfuerzo máximo de tracción, módulo de elasticidad y presentando deformaciones plásticas menos considerables. Es significativo mencionar que las fibras naturales se presentan ampliamente disponibles, principalmente por comportarse como desechos, aumentando la disponibilidad como recurso alternativo con una viabilidad de ser un recurso alternativo [8]. Por el lado del comportamiento térmico del material, también pueden presentarse modificaciones en la conductividad térmica, difusividad térmica, así como el flujo de calor transferido a través del material, buscando en función de

la necesidad obtener materiales compuestos con características de un material aislante o con propiedades de transferencia más predominantes.

4 Antecedentes

4.1 Materiales compuestos

Los tres componentes de un compuesto (**Figura 1**) son refuerzo, matriz e interfaz. El refuerzo es el elemento portador de carga del material compuesto, mientras que la matriz es el medio de unión del refuerzo. La interfaz es la superficie de contacto común entre refuerzo y matriz. Según el tipo de medio de matriz, los compuestos se clasifican como compuestos de matriz polimérica (PMC), compuestos de matriz metálica, compuestos de matriz cerámica y compuestos de carbono / carbono. Los PMC utilizan predominantemente matrices termoendurecibles como resinas de poliéster, epoxi y fenólicas debido a sus buenas propiedades [10].

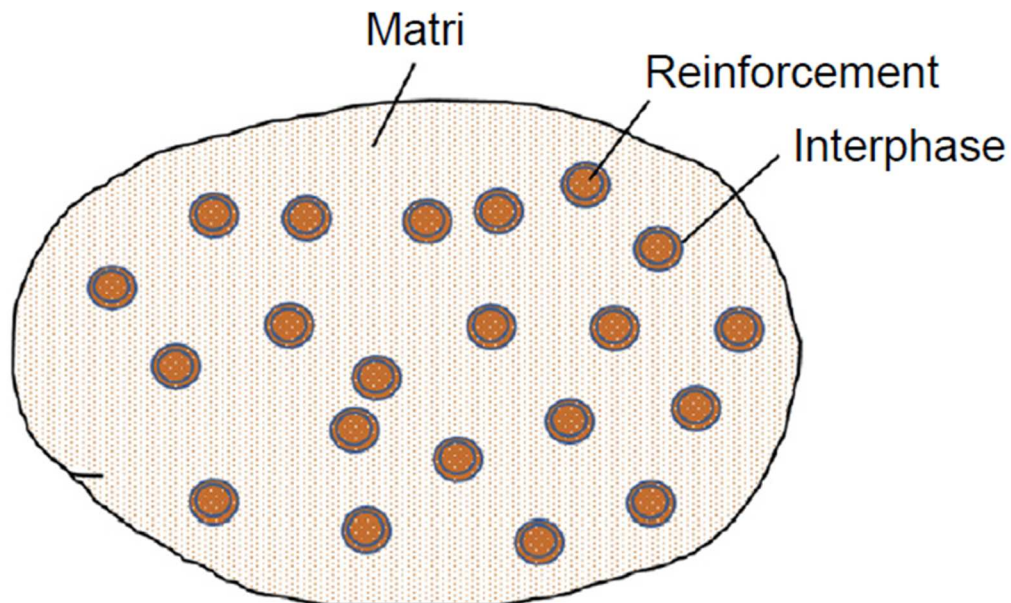


Figura 1: Estructura de un material compuesto de matriz polimérica.

El uso de las fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos de matriz polimérica se centra en aplicaciones donde altas cargas mecánicas no sean soportadas directamente por estas estructuras, como ejemplo se tiene que en el campo de la industria automotriz (donde se encuentra su mayor potencial) son empleados en la producción de paneles en las puertas, puertas y en la carrocería del vehículo entre otros [11].

4.2 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales

En los últimos años el interés hacia la utilización química y energética de los materiales lignocelulósicos (conjunto de materiales de origen forestal, agrícola o urbano) ha ido en constante aumento. El uso y aplicación de estos materiales ha mantenido la atención en dos áreas importantes:

- La obtención de productos químicos y energéticos a partir de fuentes renovables que sustituyan parcial o totalmente la utilización de reservas fósiles como el petróleo, gas o el carbón.
- La materia lignocelulósica se emplea directamente para la obtención de productos energéticos secundarios por un proceso de pirolisis, de gasificación o de reformado catalítico con vapor, así como por hidrólisis química o enzimática y fermentación etanólica. Se trata de productos de bajo valor añadido que presentan una rentabilidad ligada a los precios de los combustibles convencionales [10], [12].
- El aprovechamiento de materiales residuales procedentes de los bosques y de los cultivos, así como de la industria maderera para la obtención de fracciones poliméricas y derivados químicos [13].

Los polímeros constituyentes de los materiales lignocelulósicos; celulosa lignina y hemicelulosas se separan por fraccionamiento y posteriormente se purifican. A partir de estas fracciones se pueden obtener una amplia gama de productos de alto valor agregado como celulosas para usos textiles, alimenticios o farmacéuticos, fibras papeleras, paneles, derivados de la lignina usados como adhesivos y derivados hemicelulósicos como xilosa, manosa o furfural [10].

Dentro de estas áreas de aprovechamiento de la materia lignocelulósica, la madera es tradicionalmente el material lignocelulósico más empleado en aplicaciones como la fabricación de pastas papeleras, muebles y tableros de diversos tipos, además de los usos energéticos. El incremento continuado en la demanda de esta clase de materias primas aunado a problemas económicos y medioambientales, hace necesaria la investigación de otras fuentes alternativas de materiales lignocelulósicos distintos a la madera [10], [12].

Tabla 1. Principales fibras disponibles a escala mundial [12].

Fuente de fibras Miles de toneladas de fibras secas*	
Madera	1 750 000
Paja (Trigo, arroz, avena, lino)	1 145 000
Tallos (maíz, sorgo, algodón)	970 000
Bagazo de caña de azúcar	75 000
Cañas o juncos	30 000
Bambú	30 000
Fibras de algodón	15 000
Tallos (yute, kenaf, hemp)	8 000
Papiro	5 000
Peliberianas (yute, kenaf, cáñamo)	2 900
Linters de algodón	1 000
Alfa, esparto	500
Hojas (sisal, abacá, henequén)	480
Hierbas y pastos (hierba elefante)	200

El conjunto de los materiales compuestos que son reforzados con diferentes tipos de fibras han sido implementadas en la industria como componentes de varias estructuras aeroespaciales, también como elementos necesarios para obtener energías de fuentes hídricas, en sistemas automotrices y como parte de estructuras aerogeneradoras eólicas. Sin embargo, su principal limitación se centra en los elevados valores de fabricación y las inversiones iniciales en la materia prima de estos materiales compuestos son muy altas si se comparan con los materiales convencionales (como es el caso de aleaciones metálicas o polímeros “commodities”), pero en contraste con su costo el hecho de que presenten resistencias mecánicas muy altas por unidad másica y la menor necesidad de procedimientos de mecanizado y fijación empleados para poner un material a punto aumentan la popularidad de los compuestos con el avance de los años (en la **Figura 2** se observan las subdivisiones de las fibras naturales [14]).

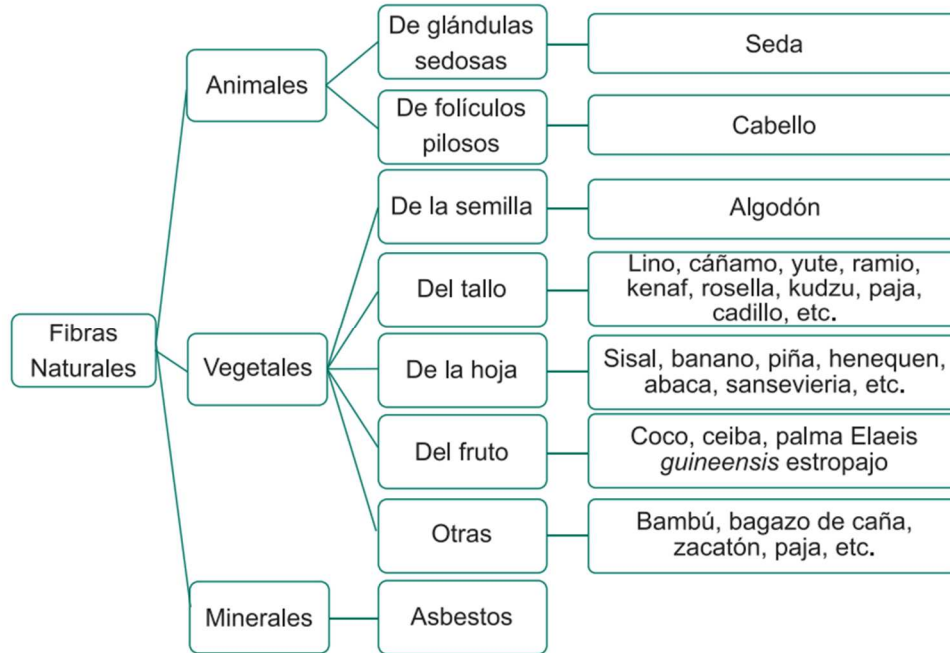


Figura 2: Tipos de fibras naturales empleadas como refuerzos en materiales compuestos [11].

La mayor influencia que presentan la composición de las fibras naturales sobre las características de este tipo de materiales y en específico los contenidos de especies como la lignina, pectina, celulosa y hemicelulosa, sin embargo, es muy frecuente el procedimiento de eliminar todas las especies diferentes a la celulosa [15]. Como ejemplo se tienen un conjunto de estudios centrados en fibras de lino, fibras de yute. En estos resultados se puede observar que para las fibras de lino se encuentra una temperatura de degradación de sus componentes en condiciones más elevadas respecto a las que se pueden encontrar para los otros dos tipos de fibras, argumentando los autores que se debe al bajo contenido de lignina en su estructura [16].

Desde el punto de vista mecánico los valores de resistencia a la tracción, a esfuerzos compresivos, tenacidad y dureza en general serán variables en todo el volumen del material compuesto reforzado con fibras serán dependientes del direccionamiento de dichas fibras, encontrándose los mejores valores en las direcciones axiales a estas fibras. En general otra de las razones por las cuales la propiedad general de estos elementos será causada por los procedimientos de conformado en el cual se pueden presentar un conjunto de distorsiones en la estructura interna del material, estas distorsiones también vienen asociadas a un conjunto de tensiones residuales que se acumulan y forman puntos críticos concentradores de esfuerzos que permitirán de una manera más sencilla la propagación de una grieta [13].

Adicionalmente, al presentarse de manera poco uniforme estas tensiones residuales en el interior del elemento se pueden generar de manera más directa un conjunto de defectologías como es el caso de la deformación, fenómenos de alabeo, agrietamiento de la matriz y adicionalmente puede presentarse separación entre la interfaz entre la matriz y el refuerzo (lo cual es conocido como delaminación). Todo lo anterior indica que es difícil garantizar que los diferentes materiales fabricados no tengan una diferencia detectable con los diferentes moldes o plantillas de diseño [11].

El uso predominante de materiales poliméricos reforzados con fibra es en el campo de aplicaciones que buscan ser soportes de cargas, lo cual exige unas características muy específicas de resistencia a la comprensión residual inducido tensiones y su efecto sobre las distorsiones de forma. Esto es lo más necesario para tener un compuesto más confiable manufactura ya que las tensiones residuales alteran el nivel de tensión de la pieza compuesta durante la vida útil y las distorsiones de forma residual pueden llevar a no cumplir con tolerancias geométricas deseadas [11].

Debido a que las deformaciones y esfuerzos residuales generadas durante el proceso de manufactura son difíciles de controlar y en muchos casos inevitables, diversos investigadores han realizado estudios enfocados en esta temática, los cuales se separan en dos vertientes: la primera centrada en el conocimiento y comprensión de los mecanismos detrás de las mismas deformaciones y esfuerzos residuales. La segunda vertiente se centra en emplear diferentes métodos numéricos y pruebas analíticas para buscar predecir las magnitudes de este conjunto de defectologías [17].

Diversos investigadores han realizado una múltiple cantidad de trabajos enfocados en emplear el método de elementos finitos para la simulación y estimación de las diferentes propiedades de los materiales compuestos, siendo una herramienta de gran utilidad, debido a que permite el análisis de diferentes geometrías de alta complejidad y la capacidad de correlacionarlas con las propiedades resultantes [18]. Cabe mencionar que el uso de herramientas adicionales que dependen de la fracción volumétrica, como son los elementos de RVE, que permiten llegar a un conjunto de cálculos más acertados para estos tipos de arreglos, así como la forma de los reforzantes [19].

Adicionalmente, es necesario que el planteamiento del problema a resolver tenga claras las concesiones que serán establecidas, respecto a la homogeneidad de la interfase, tipo de arreglo de la fibra, Así como el establecimiento de las condiciones de frontera relacionado a las cargas, deformaciones, ratas de calentamiento entre otras. En los ensayos de tracción tradicional, se tiene la ventaja de que se establecen condiciones de un ensayo de deformación plana, simplificando las condiciones a analizar [20].

4.3 Estado del arte del uso de fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos.

Entre las múltiples opciones de simulación que se pueden encontrar para el análisis de las propiedades de un material compuesto se pueden estudiar desde algún elemento unitario básico, para lo cual pueden establecerse elementos unitarios básicos también siendo de tipo hexagonales o cuadradas, todo con el objetivo de que la interacción entre las fibras y la matriz sea la más eficiente (ver **Figura 3**) [21]. Sin embargo, muchos investigadores han encontrado amplia coherencia entre diversos modelos matemáticos obtenidos por procedimiento de simulación para la determinación del módulo de Young (módulo de elasticidad), encontrando que las variaciones no se evidencian tan notables entre modelos (ver **Figura 4.a**), mientras que para las direcciones transversales, la aproximación dependerá del modelo elegido (ver **Figura 4.b**), donde se observa que la regla de las mezclas tradicionalmente usada, presenta valores más bajos que lo que lo determinado en modelos empíricos y considerados que van más acorde a la realidad [22].

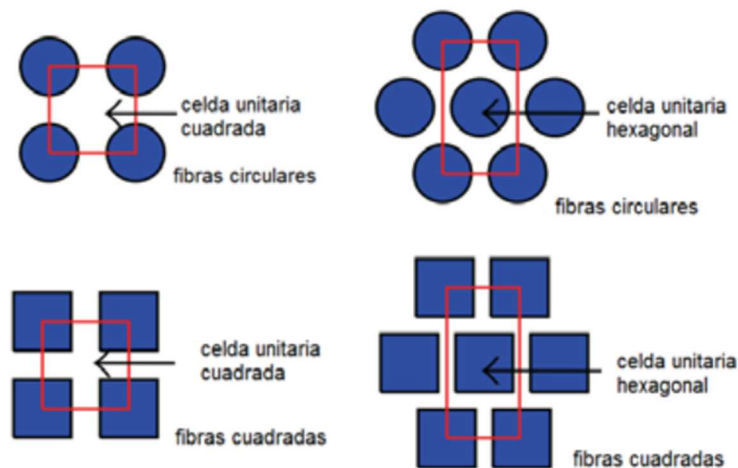


Figura 3. Arreglos de fibras continuas para el modelado de materiales compuestos, en función de la celda unitaria de estudio (Modificación de [21]).

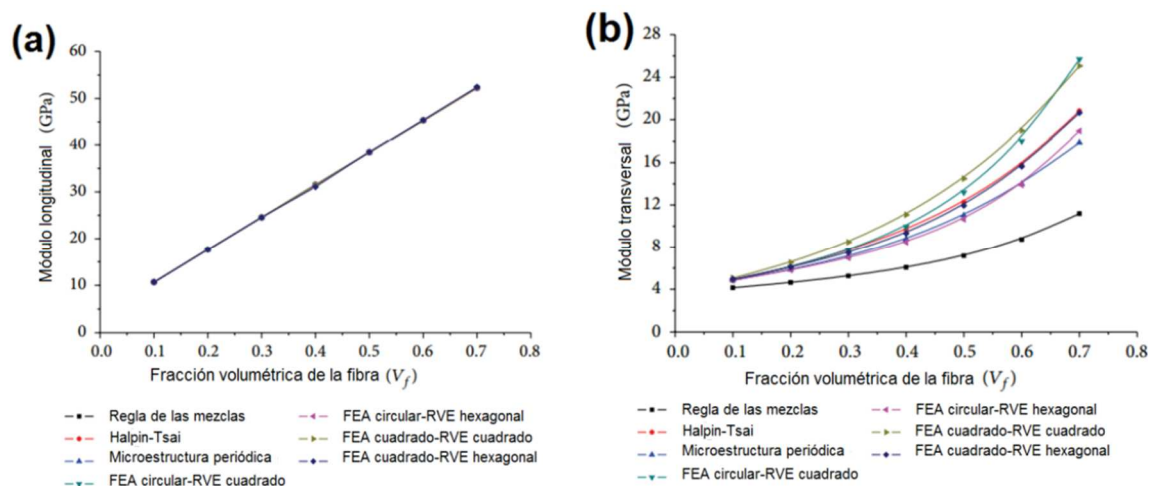


Figura 4. Cambios en el módulo de elasticidad en esfuerzos de tracción para a) Condiciones longitudinales y b) Condiciones transversales (modificado de [22]).

V. Amigó et al. compraron productos obtenidos por inyección de polietileno de alta densidad reciclado reforzado con fibras de algodón, cáñamo y sisal. Se utilizó como óptimo el refuerzo de un 40% en peso de estas fibras evaluando su comportamiento mecánico mediante ensayos de tracción y flexión con los que se obtiene los distintos parámetros resistentes y de plasticidad. Se realizaron también ensayos de impacto con probetas tipo Charpy sin entalla evaluando la influencia del tipo de fibra en la resiliencia del compuesto. Finalmente se realizó una caracterización mediante microscopía electrónica de barrido determinando el tipo de fractura en cada caso. Los autores tuvieron como resultado que la incorporación de fibras aumenta ligeramente las propiedades resistentes del polímero base, pero a cambio disminuyen sus propiedades plásticas [23].

En este trabajo los autores realizaron un estudio para la determinación de la energía de activación de las fibras naturales de plátano procedentes del Urabá colombiano. Para tal efecto se emplearon los datos obtenidos a partir de ensayos de termogravimetría (TGA). Con un rango de temperatura de 30 a 900 °C, en una atmósfera inerte de nitrógeno a un flujo de 90 ml/min., con las siguientes velocidades de calentamiento: 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 °C/min. Para la determinación de la energía se evaluaron modelos y métodos comúnmente usados para otro tipo de materiales poliméricos. Los valores obtenidos se ajustan a los reportados en la literatura, a la vez que permiten conocer el comportamiento térmico de esta clase de fibras. Como resultados se tuvo que la temperatura a la cual comenzó la degradación de los componentes de la fibra natural de plátano es 170 °C. y presenta un pico máximo entre 280 y 330 °C dependiendo de la velocidad de calentamiento y finaliza por encima de 400 °C [24].

Los autores evaluaron el grado de reforzamiento de las fibras de rastrojo de piña sin tratamiento, en una matriz de resina poliéster no saturada de uso comercial. Se prepararon materiales compuestos con fibra de distinta longitud, y con diferente porcentaje de la misma. Se evaluaron sus propiedades a través de la densidad,

resistencia a la ruptura por tensión, flexión y energía de impacto. De estas propiedades se observó una mejora en la resistencia a la ruptura por tensión, con valores cercanos a los 20 MPa. Se analizó la interfase entre la fibra y la matriz por medio microscopía electrónica de barrido (SEM), el cual reveló que no existe una buena adhesión entre la fibra y la matriz. Sin embargo, se encontró que esta adhesión puede ser incrementada por el aumento en la presión de moldeo durante la preparación del material. Los autores concluyeron que las propiedades mecánicas de las resinas reforzadas excepto flexión alcanzan valores similares o ligeramente superiores al presentado por la matriz. El contenido óptimo de la fibra es del 10% con una longitud de 1mm [25].

En otro trabajo, los autores obtuvieron compuestos de matriz poliéster mediante estratificación manual, para lo cual se emplearon como refuerzos: fibra de abacá, fibra de cabuya y refuerzos híbridos de fibra de abacá/vidrio y fibra de coco/vidrio. Se estudió la influencia de la variación de las fracciones volumétricas y configuraciones de los refuerzos en las propiedades mecánicas de los materiales obtenidos. La evaluación de estos compuestos se realizó mediante ensayos de tracción, flexión e impacto. Como resultados obtuvieron La incorporación de fibras de refuerzo a las matrices poliméricas permitió un incremento de las propiedades mecánicas a tracción, flexión e impacto. Este incremento depende de las fracciones volumétricas empleadas, la configuración y tipo del refuerzo, entre otros [26].

En este trabajo, se elaboraron materiales compuestos de resina de poliéster y fibras del mesocarpio del coco con proporciones en volumen matriz/fibra de 97:3 y 92,5:7,5 % para medir coeficiente de conductividad térmica y realizar ensayos de tensión y flexión respectivamente. Las fibras fueron caracterizadas a partir de análisis próximo, análisis elemental y densidad. Los resultados de los ensayos mecánicos evidenciaron que la adición de fibras del mesocarpio del coco a la resina de poliéster disminuyó las propiedades mecánicas, hecho que pudiera atribuirse a la falta de interacción mecánica entre las fibras y la matriz de poliéster. El análisis de la superficie de falla mostró que tanto la resina de poliéster como el material compuesto presentaron fractura frágil, acorde a lo esperado [27].

La investigación realizada por Meza et al., tuvo como finalidad, sentar un precedente ó alternativa en la remediación ambiental causada por la producción indiscriminada de plásticos. Se trabajó con bacterias nativas de tres tipos de humus: lombriz, caballo y gallina; así también con muestras de polietileno tereftalato y oxopolietileno las cuales fueron trituradas hasta obtener finas partículas para ser utilizadas como única fuente de carbono del medio de cultivo para las bacterias. La biodegradación se determinó mediante el peso residual [mg] de los plásticos durante 1 mes y 5 días. Al finalizar la investigación se obtuvo que las bacterias del humus de caballo biodegradaron un 10,89% de polietileno tereftalato; mientras tanto las bacterias nativas del humus de lombriz biodegradaron el 39.99% de oxopolietileno [28].

En el presente estudio se determinó el grado de biodegradabilidad de tres muestras de polietileno de alta densidad (HDPE siglas en inglés), con aditivos para acelerar

el proceso de degradación, las muestras se identificaron como A1, A2 y A3. Para la determinación de biodegradabilidad se empleó el método de compostaje aerobio a condiciones controladas de pH, temperatura y flujo de aire libre de CO₂ por 90 días, de acuerdo con lo estipulado en la norma NTE INEN 2640:2012. Antes de iniciar el ensayo se realizaron pruebas de materia orgánica y sólidos totales en las muestras de materiales plásticos. También fue necesario seleccionar el inóculo, para ello se evaluaron cuatro muestras de suelo en las que se estimó la cantidad de CO₂ generado durante un proceso de compostaje. Para la captación de CO₂ se emplearon trampas de hidróxido de potasio 0,1 y 0,5 M, estas soluciones fueron seleccionadas de acuerdo con el tiempo de saturación y a la capacidad de captación.

La cantidad de CO₂ producido por los materiales de ensayo fue cuantificado mediante el método de alcalinidad de acuerdo con el procedimiento APHA 2320D. Como material de referencia de biodegradabilidad se empleó celulosa y el blanco de ensayo consistió en el inóculo, usado en el proceso de compostaje. Los resultados obtenidos del blanco se restaron de los materiales de ensayo. Al concluir los 90 días del estudio se estableció el grado de degradación de los materiales usando los gramos de CO₂ producidos en cada contenedor. El porcentaje de biodegradación tomando como referencia la celulosa para el HDPE A1 fue del 75 %, para el HDPE A2 y A3 fue 44 % y 22 % respectivamente. Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que el HDPE A1 supera el 60 % de generación de CO₂ respecto de la celulosa. Por lo tanto, es compostable de acuerdo con la norma NTE INEN 2643 “Especificaciones para plásticos compostables” [29].

Este estudio presentó una alternativa para la biodegradación de PE. En este sentido, el compostaje es un sistema dinámico que promueve la biodegradación de la materia orgánica por acción de una diversidad de microorganismos y temperatura, por lo que el presente estudio se aprovechó este ambiente para exponer polietileno de baja densidad nuevo y usado de cubiertas de invernaderos, y de esta manera promover su degradación. Este estudio se dividió en dos actividades principales: (1) la caracterización de parámetros fisicoquímicos y biológicos del compostaje que influyen en la descomposición de la materia orgánica; y (2) la evaluación de la biodegradabilidad de LDPE nuevo y usado bajo condiciones de compostaje de rosas. Se trabajó con 50 muestras (25 por cada tipo LDPE) que fueron expuestas a compostaje, y 2 muestras (1 por cada tipo) que fueron expuestas al tratamiento térmico simulando las temperaturas del compost. Cada 30 días se retiraron 6 muestras de cada tipo de LDPE para realizarles análisis de biodegradación mediante pérdida de peso, FTIR, SEM, propiedades mecánicas, y adicionalmente se realizó cultivos microbianos para identificación morfológica de los potenciales degradadores de LDPE.

Los resultados obtenidos para la caracterización del compost mostraron que los parámetros estaban dentro del rango esperado de otros compost que tiene otras materias primas. Por otra parte, las condiciones de compostaje no influyeron sobre la degradación de LDPE. Sin embargo, se reportó el deterioro de muestras de LDPE usadas al determinar cambios en la morfología del polímero, a la pérdida de

propiedades mecánicas en más del 50% respecto a sus iniciales y los cambios en los espectros del análisis de FTIR. Finalmente, se aislaron e identificaron a nivel morfológico microorganismos que pueden ser potenciales degradadores de polietileno, por lo que se requieren de posteriores estudios para determinar si tienen capacidad degradativa [30].

Los residuos tanto madereros y termoplásticos poliméricos son poco reutilizados, por ende, terminan su vida útil depositados en lugares inadecuados contaminando el medio ambiente. Este trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar un compuesto de plástico-madera (Wood Plastic Composite - WPC) a base de Tereftalato de Polietileno (PET) reciclado y residuos de aserrín de madera (RAM). La metodología empleado en todo el proceso fue desde la obtención de materia prima (PET reciclado, aserrín de madera y adicional arcilla bentonita) hasta obtener compuestos plástico-madera y cuerpos a probetas según ASTM D 638 de tipo IV, se caracterizaron las propiedades físico química y granulométrica de la materia prima, luego se obtuvo las compuestos plástico madera por metodología de fusión térmica, en las probetas se analizaron las características de propiedades mecánicas, análisis de microscopía electrónica de barradura, ensayo de difracción rayos X y el estudio de biodegradabilidad [31].

Los resultados morfológicos por microscopía electrónica de barradura se observó una buena mezcla de los tres componentes de plástico-madera, y también se llegó identificar por DRX los picos característicos de existencia PET reciclado, aserrín de madera y arcilla bentonita. Los resultados de las propiedades mecánicas como Ruptura de Tracción (MPa) se encuentra entre 4456 MPa a 9441 MPa, asimismo las características de elongación (%) se encuentra entre 1,3% a 2,7%. los análisis estadísticos ANOVA indica un buen coeficiente de determinación de 83% para fuerza de ruptura y 82 % en elongación (%), y los resultados de biodegradabilidad tuvo una pérdida de peso 16,72; 14,67 y 10,17% durante 4 meses, llegando a predecir su biodegradabilidad al 100% entre 2 a 4 años aproximadamente 2 a 4 años aproximadamente [31].

El presente trabajo de titulación tiene como propósito determinar el método más eficiente de degradación de PET reciclado y su rendimiento a partir de métodos de despolimerización química. El trabajo se realizó con cinco tipos de despolimerización química siendo: Hidrólisis, glicólisis, metanólisis, aminólisis y amonólisis; cada uno de estos procesos tiene como resultado distintos materiales de su despolimerización, ya que se realizan bajo diferentes condiciones de reacción, siendo como resultado: ácido tereftálico, BHET, DMT, BHETA y tereftalamida, que son resinas que pueden ser usadas en procesos posteriores como materia prima para ser reintroducida en la síntesis del PET o a su vez elaborar un nuevo material. Se efectuó análisis FTIR para la determinación de los compuestos obtenidos en cada proceso siendo factible los resultados, además de ello se realizó la determinación de rendimiento de cada proceso con el fin de establecer el mejor método de despolimerización química, con los productos obtenidos se elaboró tres moldes que fueron expuestos a distintos medios de degradación, siendo: suelo, agua e intemperie [28].

4.4 El coco como fibra de refuerzo

En la industria agrícola actual se generan muchos residuos como es el caso de productos relacionados con banano, coco, caña. Entre los tipos de residuos que se encuentran existen varios con características fibrosas que ayudan a aumentar el volumen de residuos vinculados. Sin embargo, existe una gran viabilidad de ser empleados como materias primas presentes en la manufactura de materiales compuestos, dando así una gran alternativa a refuerzos más contaminantes como es caso de la fibra de carbono o de vidrio, aumentando así su valor ambiental. Cabe aclarar que como cualquier materia prima que inicia en la industria, el vacío centrado en las diferentes propiedades generales de estos materiales es persistente. Aunque, sin lugar a dudas muchos ingenieros en la actualidad han tratado de expandir la información centrada en estos materiales, centrado en sus posibles aplicaciones en la industria automovilística y en el campo de la siempre demandante construcción [32].

Es de resaltar que a diferencia de las fibras más tradicionales como es el caso de la fibra de carbono, fibras de vidrio, Kevlar que son ampliamente empleadas como refuerzos de materiales compuestos las fibras naturales se caracterizan presentar características microestructurales particulares, presentándose en la mayoría de ellas zonas de una considerable cristalinidad consistentes en formaciones de celulosa, la cual posee una alta resistencia a la penetración de diferentes compuestos químicos, adicionalmente se encuentran otras estructuras amorfas que no presentan la misma resistencia a la penetración de algunos tipos de resinas o de otros compuestos químicos [33].

Cabe mencionar que existe una importante deficiencia presentada por las fibras de carácter natural, la cual se enfoca en la importante condición hidrofóbica de las superficies gracias a la existencia de grupos hidroxilo, los cuales son poco compatibles con las diferentes matrices que en general tienen características no polares e hidrofóbicas. La problemática descrita anteriormente ha demandado adicionar tratamientos superficiales, que favorezcan la interacción y formación de interfaz entre las fibras y la matriz del material compuesto [34].

Adicionalmente, entre todas las fibras de carácter natural, se encuentran un conjunto específico, principalmente orientado a la fuente de generación del producto agrícola del cual se deriva de frutos, como es el caso de las fibras de la cáscara de coco. Como se puede observar en la **Tabla 2**, la cual expresa las ventajas de este tipo de fibras respecto a otro conjunto de fibras naturales que han sido estudiadas en materiales compuestos de matriz polimérica. En específico se resalta la alta capacidad de elongación que presentan las fibras naturales derivadas de la industria palmera del coco. Por lo cual es razonable el interés de la comunidad científica, resaltado en la posibilidad de uso de estos en materiales sometidos a altos grados de deformación [8].

Tabla 2: Propiedades físicas y mecánicas de fibras derivadas de productos naturales [9].

Fibra	Densidad [g/cm ³]	Resistencia [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Elongación [%]	Absorción de humedad [%]
Cabuya	1,3	305	7,5	4,96	-
Yute	1,3	393 - 773	26,5	1,5 - 1,8	12
Coco	1,2	175 - 220	4 - 6	15 - 30	10
Abacá	1,3	400 - 1289	45	2,7	8 - 10
Sisal	1,5	511 - 635	9,4 - 22	2 - 2,5	-
Algodón	1,5	393 - 773	27,6	7 - 8	8 - 25
Ramio	1,5	400 - 938	61,4 - 128	3,6 - 3,8	12 - 17
Lino	1,5	345 - 1035	27,6	2,7 - 3,2	7
Cáñamo	1,4	690	35	1,6	8

En el país de Colombia, este tipo de productos se encuentran de manera predominante en la región concentrada en el departamento de Nariño, como ha sido mencionado por el ministerio de Agricultura, donde se generaron para 2017 alrededor de 50.413 toneladas de coco, siendo este el departamento líder nacional en la generación y cultivación de este producto con un porcentaje cercano al 41,1 % consistente en más de 274 hectáreas de total actividad. La **Figura 5** muestra el valor de producción de coco por toneladas métricas por departamentos a nivel nacional y una comparación con los valores encontrados por los países que dominan la producción a nivel mundial, como es el caso de Indonesia o las Filipinas [9].



Figura 5: Producción de coco en Colombia para 2017 para los diferentes departamentos, comparados con los mayores productores a nivel mundial [9].

4.5 Propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzado por fibras.

Los mecanismos que son responsables del desarrollo de distorsiones y esfuerzos en el interior de los materiales compuestos reforzados con fibras como ejemplo se tiene el fenómeno de la anisotropía térmica del material compuesto y los diferentes gradientes de temperatura durante la solidificación del material fundido. Los diferentes valores de contracción generados por las reacciones químicas presentadas por la resina durante el curado, el flujo de la resina en su estado pseudoplástico. El porcentaje en volumen de fibras también puede afectar al mecanismo de generación de defectos en el volumen del material, así como en ingreso de humedad o burbujas de aire en dichas estructuras. Para finalizar, otro mecanismo que puede generar la defectología mencionada es debido a los fenómenos de interacción herramienta de moldeo-material [13].

En la actualidad existen modelos definidos que se han utilizado comúnmente para simular un conjunto de fenómenos constitutivos de la pieza del modelo elástico lineal, ii) el modelo viscoelástico y iii) el modelo dependiente de la trayectoria. Como es conocido para todos, las relaciones centradas en la tensión y la deformación de los materiales compuestos de matriz polimérica también se estudia al compás del cambio del módulo de elasticidad [17].

Cabe señalar que las propiedades mecánicas efectivas, así como las deformaciones por contracción térmica y química de la pieza de material compuesto, se calculan utilizando los métodos centrados en micromecánica de los materiales. También debido a la importante demanda y aparición de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras ha aparecido una creciente necesidad de elaborar elementos con geometrías de una complejidad más elevadas si se compara con las elaboradas de manera tradicional, lo cual ha demandado una labor de mejoramiento de los procesos que anima a los diferentes investigadores y fabricantes, ya que las apariciones de defectos no deseados son muy comunes. Debido a la alta aparición de defectología como pandeo o arrugado de las múltiples láminas que componen el material debido a que previamente son pre-impregnados, adicionalmente se destaca el hecho de que el tipo de piezas en secciones concentradas en esquinas con pliegues [5], [15], [35].

El caso de la aparición de arrugas en este tipo de materiales exige una rápida eliminación, lo cual es un gran desafío sobre todo encontrando piezas de piezas de una importante concavidad. Los investigadores Potter et al., [33] enfocaron sus estudios en determinar el relacionamiento entre la rectitud en el direccionamiento del refuerzo con la magnitud de la resistencia efectiva que el compuesto presenta. Por otra parte, Lightfoot et al., enfocaron sus esfuerzos en entender las razones mecánicas relacionadas con el desalineamiento y el arrugado de las fibras presentadas estos durante el pre-impregnado [36]. Cabe resaltar que un gran espectro de investigaciones ha sido dedicado al estudio de simulaciones donde la adhesión presentada por las fibras y la resina no son totalmente ideales y donde este factor puede tener un efecto sobre la aparición de fracturas de carácter mixto, las cuales también pueden ser simuladas [37].

Adicionalmente, es necesario dar un contexto enfocado en los posibles defectos presentados en las fibras causadas por dobleces o falta de rectitud de las diferentes fibras pertenecientes al refuerzo. En respuesta a esta problemática se han utilizado diferentes modelos para predecir la importancia del defecto mencionado. En específico se trata de un modelo que evalúa el comportamiento en las tres dimensiones en la cual se presentan dobleces de fibras. La modificación de los módulos elásticos efectivos son los que permiten realizar los evidentes cambios principalmente enfocados en el cambio de la concavidad de algunas fibras. Adicionalmente, dichos cambios se comparan con la desviación máxima del centro de la fibra, la **Figura 6**, da un ejemplo de esta fenomenología representada en la curvatura típica de una fibra y como se observa está en la matriz [38].

Adicionalmente, es de suprema importancia considerar que las propiedades del material compuesto a formar dependerán de las propiedades iniciales de la matriz y las fibras naturales en este caso, así como la existente compatibilidad entre la dicha matriz y su refuerzo, las características superficiales de las fibras y la matriz que dictarán la afinidad que hay entre ellas, lo cual se encuentra definido como la adhesión (el esfuerzo necesario para separar una fibra de la matriz por su interfaz). Por otro lado, es importante mencionar que existe un efecto considerable de la proporción de fibras presentes en el compuesto, cambiando el comportamiento considerablemente, como se puede observar en la **Figura 7**.

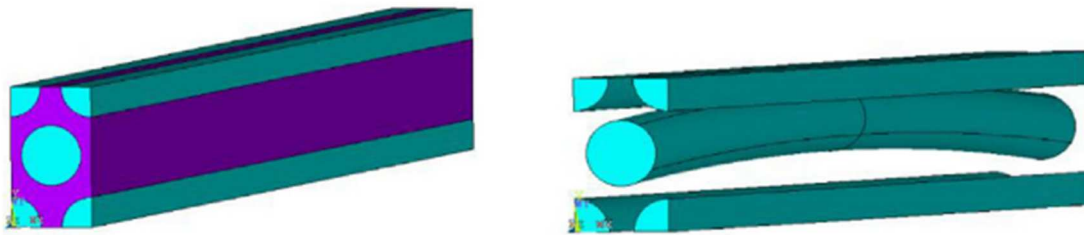


Figura 6: Ejemplo de simulación de la flexión presentada por una fibra embebida en una matriz polimérica (izquierda) y la presencia de una fibra sin refuerzo (derecha) [38].

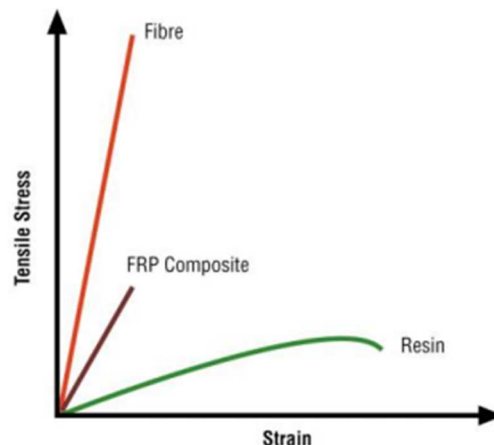


Figura 7. Comparativa de esfuerzo de deformación entre fibra, resina y el material compuesto [39].

4.6 El módulo elástico.

Es bien conocido por el nombre de esta que esta propiedad lleva que se trata de la respuesta que el material en cuestión, lo cual es causado precisamente por las fuerzas aplicadas, el tipo de parámetro o propiedades elásticas dependerá de la naturaleza de la fuerza aplicada. Cabe afirmar que módulo elástico es una constante

que trata de representar la resistencia de un material para ser deformado de manera elástica (ignorando la existencia de una deformación posterior a la retirada de la carga, por lo tanto, que no sea permanente). Adicionalmente, este módulo se suele definir como la pendiente de la curva esfuerzo-deformación centrada exclusivamente en la región de deformación elástica [40].

Lo anterior, permite realizar afirmaciones como que un material más rígido tendrá valores de módulos elásticos más de mayor magnitud y una pendiente de la curva esfuerzo deformación más cercana al eje vertical. Existen tres tipos principales de módulos elásticos, que son caracterizados e identificados para la mayoría de los materiales, los cuales se diferencian en función de cómo se pretenda determinar los esfuerzos y la deformación [41]:

El módulo de Young's (E) quien describe la relación elástica del esfuerzo y la deformación a lo largo de un eje cuando sobre un material producto de la aplicación de fuerzas opuestas. El módulo cortante (G): en este caso este parámetro define la tendencia de un material a cortarse cuando se aplican fuerzas cizallantes en direcciones opuestas. El módulo de elasticidad bulk (K), este parámetro elástico se considera únicamente cuando se somete a un material a esfuerzos en todas las direcciones, por lo cual se considera para elementos sometidos a fuerzas volumétricas[42]. Cabe resaltar que se determinarán otras propiedades mecánicas como el último esfuerzo de tensión, esfuerzo de fluencia entre otros.

4.7 Modelos teóricos relacionados con la simulación empleando métodos de elementos finitos.

Empleando la metodología de elementos finitos (EF), cuyos experimentos de simulación virtual han permitido representar situaciones reales y fenómenos de alta complejidad en una interfaz gráfica ampliamente detallada y el empleo de un alto número de iteraciones permite a diferentes investigadores la optimización de los resultados obtenidos, logrando así obtener niveles avanzados de precisión y con ello reduciendo los márgenes del error típico. La **Figura 8** exhibe las diferentes etapas comunes en cualquier análisis empleando esta metodología [43].

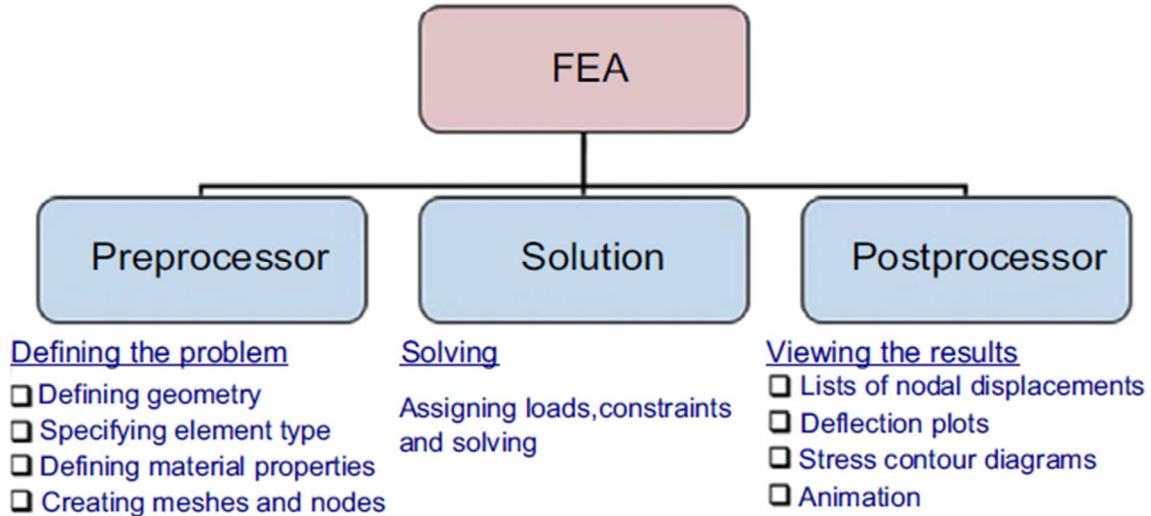


Figura 8: Proceso de análisis por elementos finitos [43].

Descripción de las diferentes etapas de procedimientos que involucran análisis de elementos finitos:

4.7.1 La etapa de pre-proceso:

El foco de esta etapa se centra en los procedimientos de modelado del material a estudiar, sea en una dimensión, en dos o la distribución de un volumen en el espacio, así como establecer los modelos específicos, características composicionales y las propiedades generales del material. Adicionalmente, también se realiza la descripción del mallado y todos los elementos presentes en el interior y la superficie del material, como se conoce al mallado que se describe a partir de un conjunto de nodos finitos distribuidos de manera específica en el material. Posteriormente establecer las limitaciones y condiciones adecuadas del contorno y la manera como se relaciona este material con los alrededores, como es el caso del contorno térmico y cargas como cargas térmicas, cargas estructurales, eléctricas. cargas o cargas magnéticas según los requisitos de la aplicación.

La **Figura 9** muestra el ejemplo de la distribución de nodos que describen las características geométricas presentes en una estructura definida, siendo este elemento clave para el desarrollo y comprensión del comportamiento general del objeto de estudio bajo una sección controlada, también es de mencionar que conforme aumenta la cantidad de nodos se podrá obtener un nivel de detalle más

elevado del comportamiento del objeto de estudio, sin embargo se necesitará de un equipo con una capacidad de procesamiento mucho mayor [44].

Actualmente existen a nivel comercial un conjunto de paquetes adecuados para la creación y edición de los diferentes pre-procesamientos de los materiales de estudio. Y estos son: AUTOCAD, SOLIDWORKS, CATIA, CREO, SOLID EGDE, ANSYS, LS-PrePost, OptiStruct, COMSOL, etc.

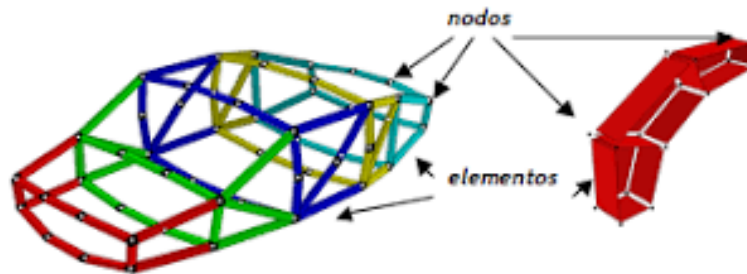


Figura 9: Estructuras que se emplean en el pre-procesado.

En este trabajo se utiliza el paquete ANSYS, ya que se considera el más adecuado para todo el conjunto de etapas de simulación a realizar. Gracias a la versatilidad, gran biblioteca y conjunto de elementos que se usarán. El manejo de nodos y elementos finitos es de suma importancia, encontrando que también es necesario escoger de manera adecuada y selección del tipo de mallado ya que existen nodos de carácter hexaédricos (“Lo cual permite establecer elementos de 6 caras y 3 secciones de cuadriláteros. Pueden ser de 8 nodos para elementos lineales, y 20 nodos para elementos cuadráticos) y nodos con características tetraédricas (“Elementos de 4 caras triangulares y 6 secciones triangulares. Cada sección del tetraedro se construye haciendo pasar un plano desde un borde hasta el punto en el borde opuesto más cercano”), ambos sistemas de mallados se observan en la **Figura 10**. La existencia de estas metodologías de nodos permite obtener los mejores detalles y descripción de las características de los materiales poliméricos reforzados con fibras [2].

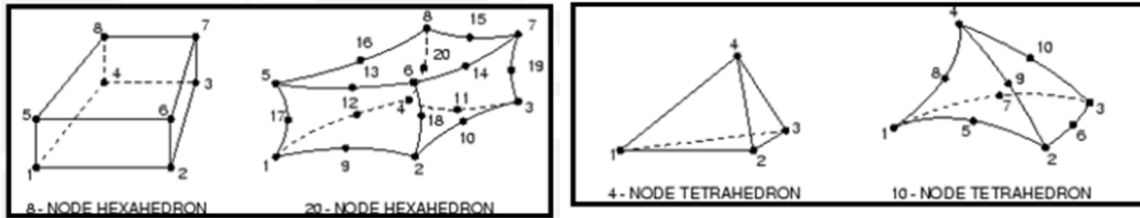


Figura 10: Elementos del mallado de tipo hexaédricos (figura a la izquierda) y tetraédricos (figura a la derecha) [2].

Las metodologías de elementos finitos (MEF) como la figura anterior mostró se pueden entender también empleando conocimientos del cálculo matricial, siendo esto vehículo para comprender y analizar estructuras de sistemas continuos. Siendo esta metodología una mejora de sistemas estructurales básicos [45]. Donde un elemento finito se compone de la siguiente estructura: Un elemento finito e que es definido por sus nodos (i,j,m) y un contorno específico delimitado por las líneas que determina los caminos y la interacción de los nodos y la geometría que comprende cada elemento (ver **Figura 10**), posteriormente, las deformaciones, modificaciones fenómenos se ven establecidas en el cambio del vector \vec{u} denominado como columna, siguiendo los criterios de la siguiente ecuación:

$$\vec{u} = \sum N_i a_i^e = \begin{bmatrix} N_i & N_j & \dots \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \vec{a}_i \\ \vec{a}_j \\ \dots \end{pmatrix}^e = N a^e$$

Donde el propio vector \vec{u} define el desplazamiento deformación o cambio causado por los fenómenos también generados por las diferentes funciones N_i , denominadas como funciones de forma. El vector \vec{a}^e se relaciona con los distintos desplazamientos nodales, siendo estos los causantes de precisamente los que permiten la combinación lineal para obtener el vector \vec{u} [45].

Los métodos de mallado también juegan un papel importante y en el caso del software **Ansys** es posible encontrar diferentes rutinas predeterminadas para facilitar la simulación y el modelado de los diferentes elementos a estudiar, como es el caso del mallado automatizado, el cual consiste en un conjunto de algoritmos que pretenden describir de una manera más adecuada [46].

Sin embargo, es necesario aclarar que existen configuraciones adecuadas para que los diferentes elementos finitos simulados pertenecientes al sistema tetraédrico se adapten a la geometría de la pieza y no al revés, como el conocido “Patch Conforming” y en otro caso del “Patch Independent” cuyo sistema de algoritmos se enfoca en la creación de los elementos del mallado creado desde el centro del volumen a simular y la estructura se creará hacia los bordes. En el sistema de

mallado hexaédrico Ansys presenta configuraciones enfocadas en hexaedros dominantes sobre todos los otros tipos de elementos. Adicionalmente, se destaca el mallado de tipo barrido, que permite la generación de una malla que se describe en la superficie de la muestra a simular [2].

La selección del tipo de mallado depende de la necesidad y requerimiento del usuario, así como de las características generales de la geometría de la pieza a simular, así como las opciones de configuraciones locales que se desean utilizar (Sizing, Contact Sizing, Mapped face meshing, entre otros). Así como las condiciones de frontera establecidas como se puede encontrar el material de dominio de interés, las respectivas condiciones de ingreso y salida, entre estas la temperatura entre otros parámetros [32]

4.7.2 La etapa de la solución:

Posterior a la etapa del pre-procesamiento, en la cual se han establecido las características generales del modelo, es necesario establecer que busca resolver la simulación y los componentes de este procedimiento son:

- Seleccionar y establecer las ecuaciones diferenciales que gobiernan todo el volumen de control o los respectivos elementos finitos establecidos en todas las regiones de interés de la muestra simulada.
- A continuación, los conjuntos de ecuaciones se trasponen a diferentes sistemas de ecuaciones algebraicas empleando métodos de aproximación para los conjuntos de las respectivas ecuaciones que describen el modelo.
- Para terminar esta etapa, las diferentes ecuaciones se resuelven empleando metodologías iterativas para lograr obtener los resultados finales, también en esta etapa se observan si se presentan defectos y divergencias del fenómeno [47].

4.7.3 La etapa del post-procesado:

En esta etapa se recoge toda la información final mostrada al usuario, se detallan los valores numéricos y cualitativos de los procedimientos realizados y los intereses del investigador, adicionalmente se muestran todos los resultados estadísticos de manera interactiva. En esta etapa final, es posible procesar gráficos que interactúan con el usuario, también es posible la elaboración de reportes, histogramas y cuadros de datos activos, entre otros. A grandes rasgos, en la etapa del post-procesamiento en ANSYS se presentan entre otras las siguientes características: Capacidad para soportar diferentes elementos gráficos, así como la capacidad de interactuar con las mallas y nodos para realizar diferentes cálculos puntuales del elemento en cuestión. También, es posible la generación de una alta gama de figuras en los cuales se pueden observar características relacionadas con el material y los resultados obtenidos, obtener detalles relacionados con el contraste, las variaciones del color y la visualización de línea / caras puede ser controlado [48].

5 Objetivos

General

•Caracterizar mediante simulación con elementos finitos el efecto del refuerzo de las fibras coco sobre las propiedades térmicas, mecánicas de un material compuesto de matriz polimérica de polipropileno tereftalato(PET) con incorporaciones del 30, 40 y 50% en volumen de fibra.

Específicos

1. Simular en software Ansys las condiciones de esfuerzo y deformación que se presentan en un ensayo de tracción bajo la norma (ASTM D3039) para un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales (considerando estas como fibras longitudinales y unidireccionales).
2. Determinar el efecto de la temperatura y los cambios en la difusividad del material en la dirección de las fibras empleando simulación de elementos finitos en función de la incorporación de fibras.
3. Realizar un análisis comparativo de las propiedades encontradas mediante simulación computacional por elementos finitos con las propiedades que se encuentran referenciadas de investigaciones anteriores para materiales compuestos similares.

6 Metodología experimental.

Se realizará una completa simulación del procedimiento de evaluación general de las propiedades mecánicas, térmicas y de biodegradación empleando el software ANSYS AIM cuya interfaz se observa en la siguiente Figura, en la cual se muestran las diferentes aplicaciones del software.

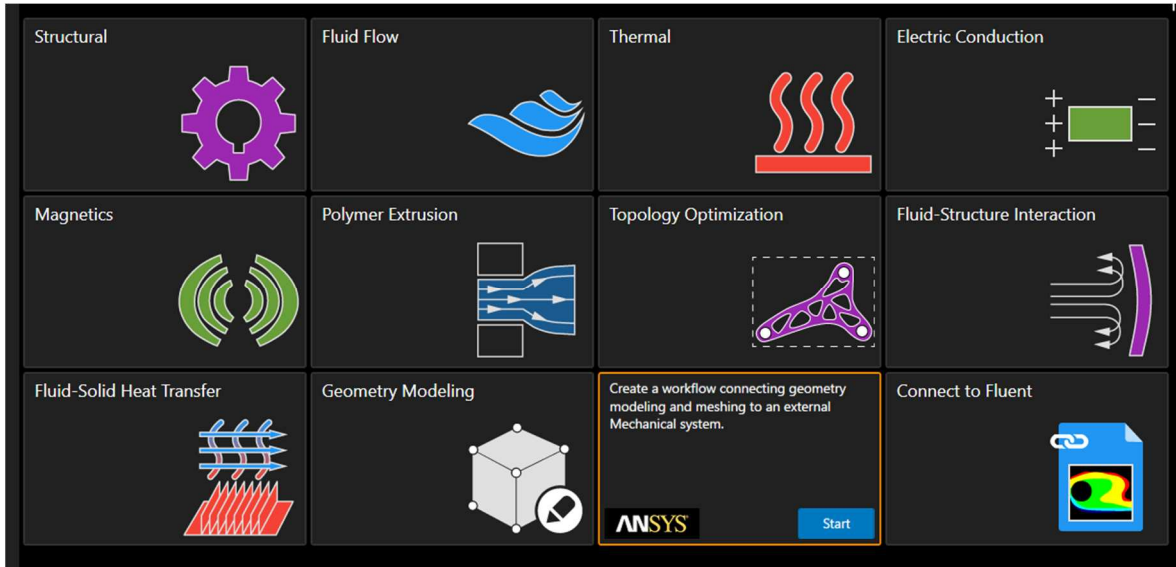


Figura 11: Interfaz inicial del software ANSYS AIM 18.0

Adicionalmente se puede observar los diferentes parámetros y condiciones de frontera para las diferentes simulaciones a realizar.

6.1 Creación del banco de propiedades generales de los materiales iniciales.

Para establecer los resultados generales del material compuesto diseñado fue necesario emplear la herramienta gestora de propiedades "Engineering data" presente en ANSYS, donde encontramos los diferentes modelos matemáticos y los diferentes parámetros físicos, químicos, térmicos y mecánicos de los materiales, como es el caso de diferentes características procedentes de artículos, como lo que se observa en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Propiedades generales de PET en volumen

Elongation at Break, Average value: 74.4 % Grade Count:45
 Elongation at Yield, Average value: 4.51 % Grade Count:22
 Modulus of Elasticity, Average value: 3.10 GPa Grade Count:59
 Flexural Yield Strength, Average value: 82.4 MPa Grade Count:24
 Flexural Modulus, Average value: 2.45 GPa Grade Count:21

En la **Figura 12** se puede observar el establecimiento de propiedades para la matriz de PET, destacando las propiedades mecánicas, siguiendo el modelo del endurecimiento de tipo bilineal para describir el comportamiento plástico del material, también se establecieron las propiedades térmicas como la expansión térmica lineal y la conductividad térmica individual [49].

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	930	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Coefficient of Thermal Expansion	0,00018	C ⁻¹		
6	Melting Temperature	95	C		
7	Isotropic Elasticity				
8	Derive from	Young's Modulus and...			
9	Young's Modulus	1,07E+09	Pa		
10	Poisson's Ratio	0,46			
11	Bulk Modulus	4,4583E+09	Pa		
12	Shear Modulus	3,664E+08	Pa		
13	Bilinear Isotropic Hardening				
14	Yield Strength	0,25	MPa		
15	Tangent Modulus	0,052	MPa		
16	Tensile Yield Strength	2,69	MPa		
17	Tensile Ultimate Strength	15,2	MPa		
18	Isotropic Thermal Conductivity	0,4	W m ⁻¹ C ⁻¹		
19	Specific Heat Constant Pressure, C _p	1750	J kg ⁻¹ C ⁻¹		
20	Viscosity	3,2E+07	centipoise		

Figura 12. Recopilación del marco general de propiedades empleadas para el PET.

Para las fibras de coco, todas las propiedades se consultaron en diferentes páginas, bases de datos y artículos disponibles que suministran la información necesaria. El contenido base de las fibras de coco, fueron modificadas a partir de la información de fibras de carbono presentes en el banco de "Engineering data", para lo cual se establecen las propiedades unidireccionales de las fibras, las propiedades mecánicas, térmicas entre otras (ver **Figura 13**), se han incorporado como fuente de referencia, diferentes artículos y paginas como MatWeb [50]. También se tendrán en cuenta artículos científicos que estudian las fibras naturales en específico las de coco [8], [50], [51].

Property	Value	Unit
Density	1,4	g cm ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Coefficient of Thermal Expansion	5E-06	C ⁻¹
Melting Temperature	120	C
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and...	
Young's Modulus	4	GPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	3,333E+09	Pa
Shear Modulus	1,5385E+09	Pa
Bilinear Isotropic Hardening		
Yield Strength	25,5	MPa
Tangent Modulus	45	MPa
Tensile Yield Strength	25,5	Pa
Tensile Ultimate Strength	45,19	MPa
Isotropic Thermal Conductivity	0,046	W m ⁻¹ C ⁻¹
Specific Heat Constant Pressure, Cp	802	J kg ⁻¹ C ⁻¹

Figura 13. Compilación de propiedades generales para las fibras de Coco.

6.2 Estructura y diseño del material compuesto de fibras unidireccionales aleatorios.

Como parámetro inicial se realizará una incorporación de fibras de un 30, 40 y 50 % en volumen (Se seleccionan dichos porcentajes de fibras en función de lo encontrado en la bibliografía [8]), los cuales establecerán los parámetros de la mezcla, y el nombramiento de las muestras se puede observar en la **Tabla 4**. Empleando la herramienta de “Materials Designer” para realizar la correcta distribución de las fibras, en diferentes estructuras y crear las características generales del material principalmente enfocado en la distribución y separación de fibras direccionadas, la estructura y planteamiento de modelos que describen las condiciones del material serán establecidos bajo el criterio del método de homogeneización (el cual se considera como la evolución de la regla de mezclas para la formulación de materiales compuestos) [43].

Tabla 4. Nomenclatura de las muestras analizadas.

Muestra	% en V de Fibras de Coco
OCO o PET	0
3OCO	30
4OCO	40
5OCO	50

La herramienta de “Materials Designer” permite de una manera directa crear el tipo de materiales compuestos con fibras unidireccionales gracias a las características generales de dichas fibras, por lo cual no se presenta la opción de que dichas fibras sean aleatorias, partiendo de la selección del modelo (RVE Model) denominado

como “material compuesto de fibras unidireccionales aleatorias” (ver **Figura 14**), el cual es el considerado más adecuado porque considera las irregularidades que puedan presentarse en fibras de origen natural como es el caso del coco [52].

Las fibras de coco que serán empleadas como refuerzo poseen longitudes que van desde los 20.0 a 30.0 cm de longitud y de aproximadamente 100 μm de diámetro, siendo este último el parámetro para controlar por “Materials Designer” [51]. Los parámetros de las fibras y el volumen de estas se controlaron y se estableció empleando los paneles de control, como se muestra en la **Figura 15.a** y se tomó como algoritmo de elaboración del material el método de adición secuencial “Sequential Addition” [53], [54].

Posteriormente, fue necesario realizar un procedimiento de mallado que permitiera [55]diferenciar los elementos existentes en este material, fibras y matriz, como se puede observar en la **Figura 15.b** que evidencia la separación y organización de las fibras, donde los nodos iniciales de la formación del mallado se construyen inicialmente a partir de la interfaz de los dos materiales [55].

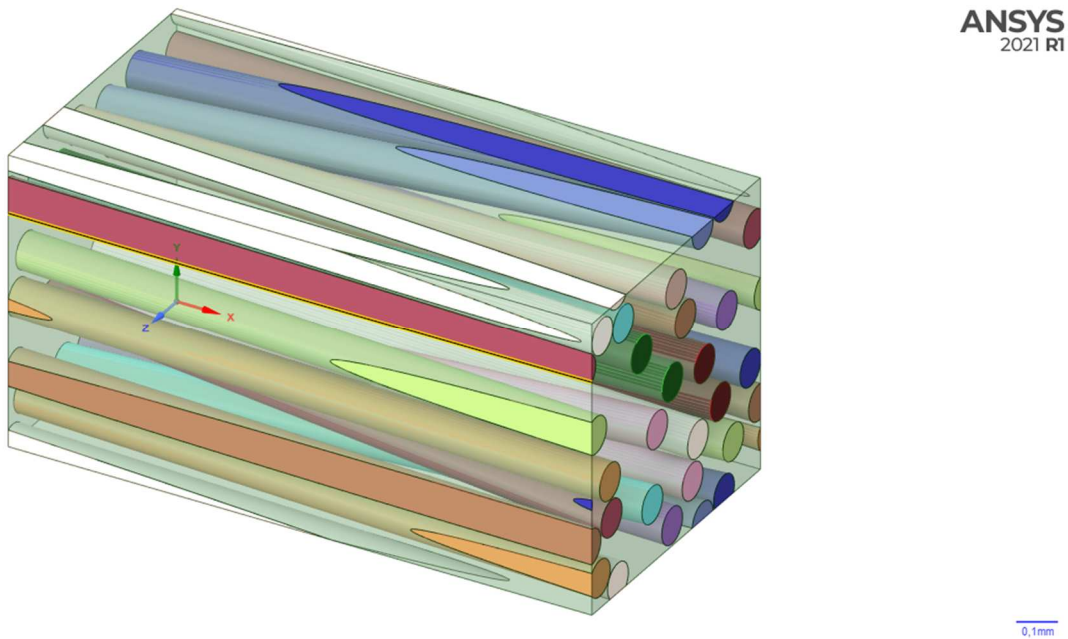


Figura 14. Esquema tridimensional del modelo RVE para materiales compuestos de fibras unidireccionales aleatorias.

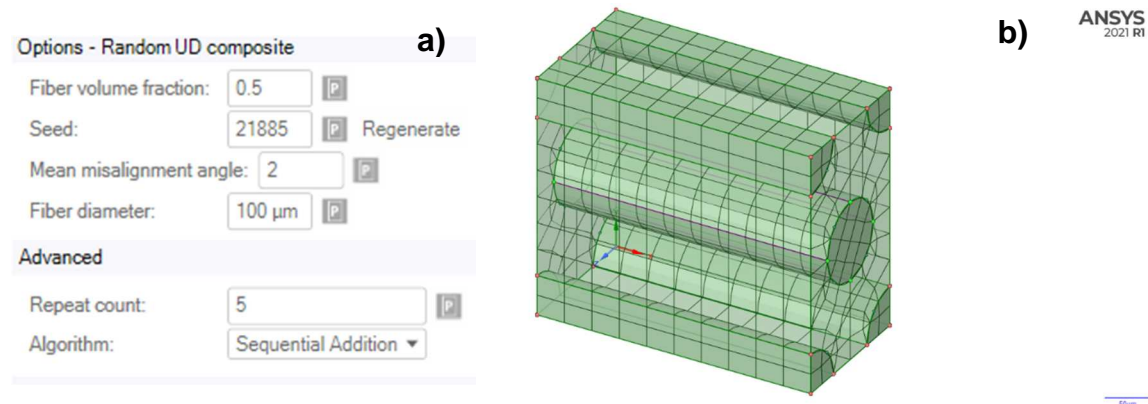


Figura 15. a) Opciones de parametrización de las fibras y b) Construcción del mallado del material compuesto PET/Coco.

Para terminar, la herramienta “Materials Designer” permite realizar un consolidado general de las propiedades del material compuesto, empleando diferentes algoritmos orientados en calcular las propiedades siguiendo las reglas de mezcla (siendo este resultado una suma proporcional de los constituyentes del compuesto y su fracción volumétrica, para calcular las diferentes módulos en las direcciones preferenciales, basados en las consistentes respuestas en elementos volumétricos representativos, siendo esta metodología de homogenización de estructuras, y una de las más adecuadas para desarrollar secciones heterogeneas a escalas de muy baja magnitud como lo describe E.R. *Gallyamov et al en 2020* [56].

Adicionalmente, como la metodología que sigue la herramienta “Materials Designer” se centra en la implementación del sistema elementos volumétricos representativos (EVR) o (RVE en inglés), buscando establecer a escala micrométrica (en muchos casos con una potencia de resolución nanométrica. Por otro lado, las ecuaciones generales que la metodología RVE emplea para determinar los módulos elásticos (modulo de Young), para las direcciones que se analicen, para ejemplo, las ecuaciones siguientes expresan el valor del módulo E_1 y E_2 para el material compuesto. En función de la matriz “m” y la fibra “f” y la fracción volumétrica de cada compuesto “f”, esto como lo muestra la literatura [57].

$$E_1 = (1 - f)E_m + fE_f$$

$$E_2 = \left[\frac{f}{E_f} + \frac{1 - f}{E_m} \right]^{-1}$$

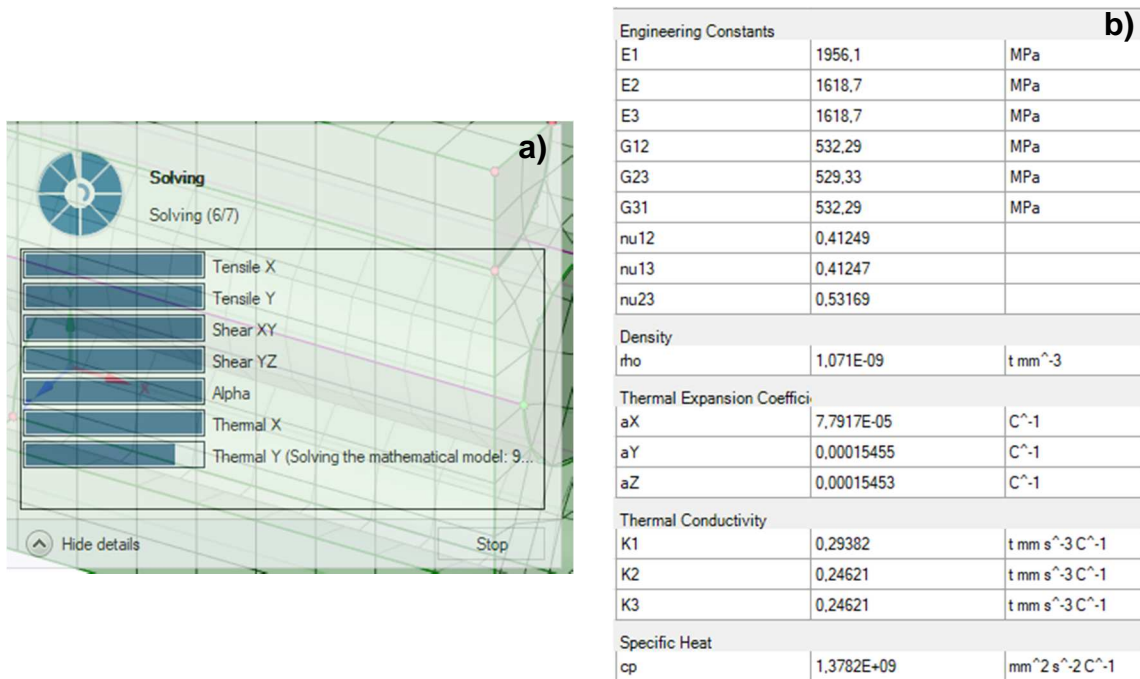


Figura 16. a) Proceso de solución y b) Tabla ejemplificada de las propiedades consolidada del material compuesto.

6.3 Creación de geometrías para las diferentes pruebas y ensayos.

Para el diseño geométrico de los diferentes elementos y formas a probar y los diferentes ensayos simulados, se ha decidido que para cada geometría se realice de manera independiente a la simulación, con el objetivo de no tener inconvenientes con la parametrización de las medidas y valores dimensionales. La herramienta utilizada para la elaboración de las geometrías que el material tendrá en los respectivos ensayos será “Desing Modeler Geometry” gracias a su versatilidad y su integración con las otras herramientas de ANSYS Workbench [58].

Para las propiedades mecánicas se planearon 2 geometrías, respetando siempre que el eje x sea la dirección en las cuales se disponen las fibras. La primera geometría empleada fue una pieza de una sección transversal rectangular constante de 25 mm (1 pul) de ancho y 250 mm (10 mm) de largo como lo establece la norma ASTM D3039 [59]. También, se realizó la simulación con una geometría similar con una sección controlada para controlar la zona de falla, como se sugiere en la norma ASTM D638 – 14, la cual es principalmente usada para materiales poliméricos [60] Finalmente, se usó una geometría cilíndrica con sección controlada con el objetivo de observar las características de fractura del material.

En el caso de la evaluación del comportamiento térmico del material se diseñaron piezas de sección cuadrada continua de 6 mm de lado y una extensión de 100 mm, con el objetivo de que la transferencia de calor sea totalmente lineal, este tipo de geometría fue utilizado por diversos autores referenciados [61]–[63].

El proceso de simulación que presentará un modelo matemático que será resultado por el paquete “ANSYS Mechanical Enterprise” y para tanto la simulación mecánica como la realizada para determinar las propiedades térmicas

6.3.1 Simulación propiedades mecánicas (Ensayo de resistencia mecánica).

Para el caso de la simulación del ensayo de tracción se plantea un procedimiento homologado al establecido por las normas ASTM D638 – 14 y D3039, donde la geometría se describió en el ítem anterior y la herramienta del Ansys Workbench, que tiene la capacidad de simular procesos de deformación e identificar con exactitud los cambios en las propiedades generales cual se construirá empleando la herramienta “Explicit Dynamics”.

Para simular los efectos del procedimiento de tracción se realizará un mallado con la mayor cantidad de nodos en los efectos de la carga aplicada en los extremos como **condiciones de frontera**; la carga aplicada dependerá del desplazamiento de las mordazas y la tasa del aumento de 5mm/min, hasta llegar a una deformación lineal nominal del 0.2% que será establecida según ensayos realizados en la literatura y las normas técnicas. La simulación estará acompañada con los criterios y metodologías establecidas por diferentes autores [8], [64].

Cabe resaltar que la herramienta “ANSYS Mechanical Enterprise” emplea como parámetro para resolver los diferentes modelos matemáticos, el “total energy error”, cuyo valor no debería superar la magnitud de 0,1; de superarse dicho valor será necesario modificar las condiciones del ensayo o del mallado de la pieza, en muchos casos por cuestiones geométricas.

6.3.2 Simulación propiedades térmicas (Estudio del comportamiento térmico).

Luego de la creación del material compuesto estableciendo las propiedades física y térmicas del material se realizará una distribución de la temperatura sobre una sección controlada de la pieza como se describe a continuación: Se estudia, en primer lugar, una barra homogénea del material compuesto de 0,10 m de longitud, con una sección transversal cuadrada de lado igual a 0,006 m con un material homogéneo (ver **Figura 17**) y se comprueba la verosimilitud de propiedades como

es el caso de la conductividad térmica lo anterior según lo sugerido por la literatura [65].

La herramienta que se emplea para realizar la simulación es “Steady-State Thermal” las condiciones de simulación se son las necesarias para que se ajusten satisfactoriamente con lo esperado y recomendado por autores como Hechavarría et al [65]. Las simulaciones son también realizadas sobre las ecuaciones de flujo de calor tridimensional, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{\rho \cdot C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Cabe resaltar que se realizará una simulación de tipo unidireccional (eje X), causando que los elementos finitos en las diferentes direcciones presenten una merma del flujo térmico, lo cual se analizará. A manera de condiciones iniciales o de frontera se establecerán a la vez un establecimiento de primera clase (condición de Dirichlet), donde una cara de la geometría mostrada en la **Figura 17.a** donde una cara presentará un $T_1 = 25^\circ\text{C}$ y $T_2 = 100^\circ\text{C}$, al ser una barra extensa, el flujo se espera se comporte como se observa en la **Figura 17.b**, siendo estas condiciones nombradas como de Flujo tipo Fourier. Finalmente, la **Figura 17.c** muestra el tipo de mallado realizado en el modelado térmico, obteniendo elementos finitos con un área superficial promedio de $4.12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

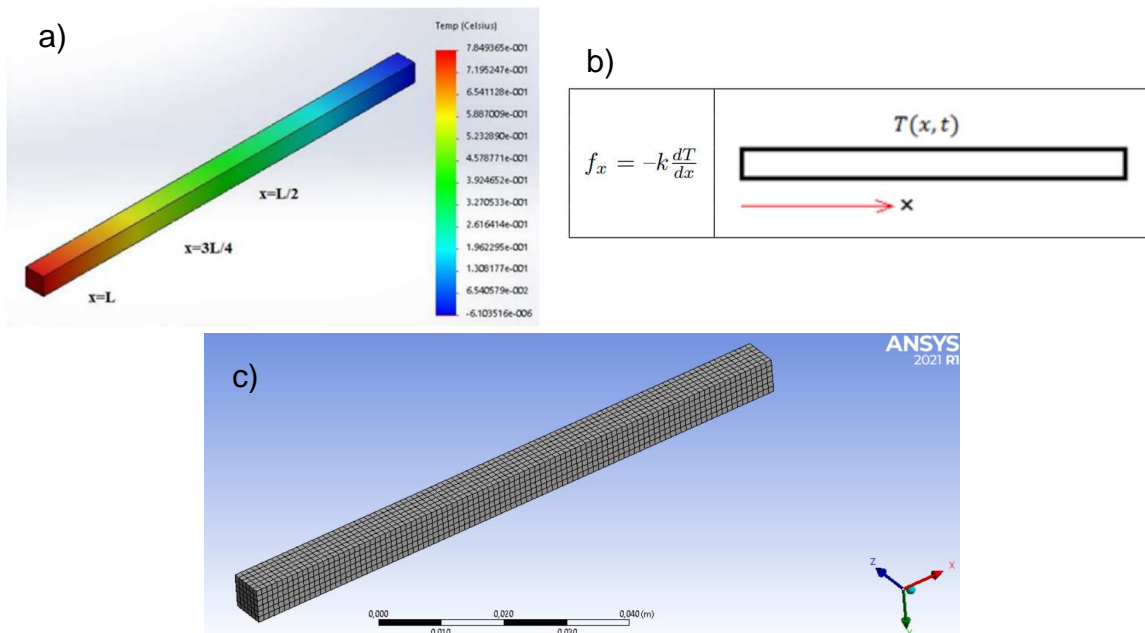


Figura 17. a) Ejemplo de la geometría utilizada para la simulación de propiedades térmicas del material compuesto, b) Esquema de flujo tipo Fourier y c) Condiciones de mallado para el análisis térmico [65]–[67].

Para terminar y con el objetivo de determinar los valores y rangos analizados se emplearon softwares como Origin ProLab para solucionar las ecuaciones que describen el cambio de la temperatura y como es afectado esto por el porcentaje de fibras.

7 Resultados y discusión: Propiedades mecánicas

En esta sesión se exponen todos los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las simulaciones mecánicas que se realizaron, se observa el efecto considerable de las adiciones de las fibras de coco (simuladas de forma unidireccionales y sin cortes) sobre dichas propiedades, notando un importante efecto sobre estas características.

7.1.1 Computación de los módulos de elasticidad

Como en el capítulo enfocado en la metodología se expresó la herramienta “Materials Designer” permite computar las variables a partir de valores ingresados por el material, la **Tabla 5** muestra los valores de las diferentes constantes de ingeniería, estas fueron determinadas como se expresó anteriormente en la **Figura 16**, para lo cual se presentaron variaciones en los tres módulos de elasticidad (E) y en los respectivos módulos cortantes (G), para los materiales compuestos analizados inicialmente.

Entre los resultados encontrados se puede evidenciar que al incrementar el porcentaje de fibras de coco en el sistema encontramos un incremento importante del módulo de elasticidad, lo cual también es coherente con lo mostrado en la literatura [8], [51], adicionalmente se evidencia que se presenta una sola dirección donde el módulo de elasticidad presenta una magnitud más a una escala mayor, esto sustentado por la característica unidireccional de las propias fibras [68]. Adicionalmente se repitió el procedimiento con el objetivo de encontrar una variación en los resultados obtenidos y poder así encontrar en las medidas encontradas variaciones estadísticamente diferenciables [69].

Tabla 5. Compilación de propiedades mecánicas de los diferentes materiales

Muestra	E1(MPa)	E2(MPa)	E3(MPa)	G1(MPa)	G2(MPa)	G3(MPa)
PET		3140			1171,6	
30CO	24107	5578,1	5578,1	2070,9	1926	2070,9
40CO	31094	6782,8	6782,8	2547,8	2358	2547,8
50CO	38079	8514,8	8514,8	3194,5	3028	3194,5

Los resultados que se lograron computar a partir de la herramienta “Material Designer” permite con su ayuda observar el efecto de la incorporación de las fibras naturales de coco (CO) sobre las propiedades elásticas del material en la **Tabla 5**. Es evidente que con la situación del software se obtienen valores del módulo elástico en dirección de las fibras (E1) con los más altos valores altos y similares a los encontrados empleando la regla de mezcla (ver **Tabla 6**), donde se evidencian los aumentos del módulo elástico a tracción, donde como ejemplo con un 30 % de fibras naturales de coco el módulo (E1) aumentó casi 8 veces, 10 veces para un 40 % de fibras de coco y finalmente 12 veces para incorporación en volumen de 50% [70].

En el caso de los módulos de elasticidad determinados en direcciones distintas a la cual están dispuestas las fibras (E2 y E3) presentan también incrementos respecto al valor inicial presentado por el PET sin ninguna adicción de fibras de coco, aunque a diferencia del módulo elástico a tracción principal (E1) los incrementos gracias a los refuerzos son muy poco destacables. La razón por los módulos de elasticidad (E2 y E3) se ven poco modificados debido a la principal resistencia que presentaría el material a ser deformado sería correspondiente a la resistencia adhesiva presente entre las fibras y la propia matriz del compuesto y no significaría un parámetro importante del material en conjunto [71].

Tabla 6. Valor del módulo de elasticidad empleando la regla de mezclas.

Muestra	Módulo elástico (determinado por la regla de mezcla)	Múltiplos de incremento
PET	3140	-----
30CO	24098	8
40CO	31084	10
50CO	38070	12

En el caso de los módulos cortantes o módulos de rigidez (G), es evidente que se presenta un determinado aumento, que ha sido identificado por la herramienta de “Materials Designer” y como también se muestra en la **Tabla 5**. Evidentemente, los incrementos para los diferentes módulos cortantes no son tan considerables como los encontrados para los módulos de elasticidad a tracción (de Young) y esto se debe a que los esfuerzos de cizalladura normalmente se ven notablemente concentrados en la interfaz entre las fibras y la matriz [72].

Sin embargo, se nota que los valores más elevados del esfuerzo de cizalladura son los que se ejercen en planos, que incluye la dirección de disposición de las fibras (G12 y G31) lo cual es debido principalmente al aporte mecánico de las fibras, que a diferencia del módulo cortante en la dirección transversal a las fibras (G23) no se ve tan afectado por la interfaz al mismo nivel de los efectos micromecánicos del material compuesto [73].

7.1.2 Procedimiento de tracción sobre probeta plana

Para determinar este procedimiento mecánico con ayuda de las herramientas de “Explicit Dynamics” y “Fluent” (ambos pertenecientes al paquete Ansys Workbench) y en este caso se toma en cuenta tanto las adiciones de las fibras sobre el material, a la vez que el tiempo y duración del ensayo. Lo primero parte con identificar la geometría y el establecimiento de las zonas donde se realizará la sujeción de las piezas. Como en la mayoría de los dispositivos de ensayos universales de tracción, se utilizan mordazas de tipo presión en dos superficies, en las cuales por fenómenos de falta de contacto en algunos puntos pueda presentarse movimiento y desacomodamiento de la pieza en el ensayo realizado en la vida real [74].

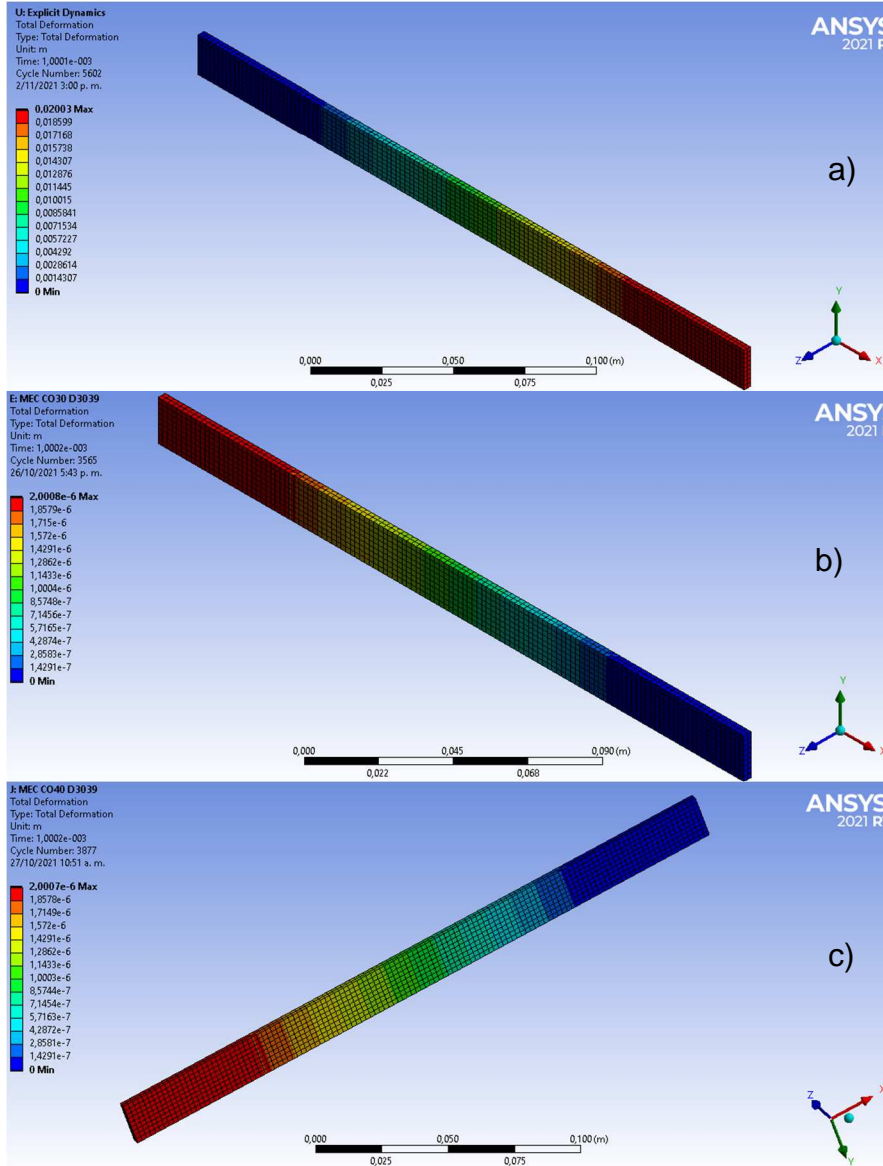
Sin embargo, en un procedimiento de simulación no se presenta esta dificultad y la aplicación de las fuerzas puede realizar de una manera directa sin considerar estos defectos típicos de la fabricación y manufactura de estos materiales y de su misma naturaleza [75]. En el procedimiento de tracción las variables estudiadas, (las cuales previamente se expresaron en la **Tabla 4**) y que serán analizadas bajo velocidades de aplicación del esfuerzo durante el ensayo, en la vida real el inicio de la correcta relación esfuerzo deformación presentara un intervalo de acomodación, las cuales pueden eliminarse en el momento de tratamiento de datos [76].

Para determinar este procedimiento mecánico con ayuda de las herramientas de “Explicit Dynamics” y “Fluent” (ambos pertenecientes al paquete Ansys Workbench) y en este caso se toma en cuenta tanto las adiciones de las fibras sobre el material y a la vez que el tiempo y duración del ensayo, lo primero parte con identificar la geometría y el establecimiento de las zonas donde se realizará la sujeción de las piezas. Como en la mayoría de los dispositivos de ensayos universales de tracción se utilizan mordazas de tipo presión en dos superficies, en las cuales por fenómenos de falta de contacto en algunos puntos pueda presentarse movimiento y desacomodamiento de la pieza en el ensayo realizado en la vida real [74]. Sin embargo, en un procedimiento de simulación no se presenta esta dificultad y la aplicación de las fuerzas puede realizar de una manera directa sin considerar estos defectos típicos de la fabricación y manufactura de estos materiales y de su misma naturaleza [75].

En el procedimiento de tracción las variables estudiadas, (las cuales previamente se expresaron en la **Tabla 4**), presenta resultados como los que se pueden observar en la **Figura 18** que muestra las evidencias de las probetas planas en función de la deformación total de la pieza durante el ensayo de tracción simulado empleando el paquete de “Explicit Dynamics” en función de los diferentes porcentajes en volumen de fibra, donde se puede evidenciar totalmente el comportamiento elasto-plástico de los materiales al someterlo a sus respectivas cargas mecánicas.

Es evidente que para todas las muestras se presenta una estratificación del valor de la deformación, encontrándose los mayores valores en las zonas en las cuales se simuló el contacto con unas mordazas que eran móviles, lo cual en efecto indica

que son las zonas donde se presenta desplazamiento y por tanto la zona de aplicación de la fuerza de tracción correspondiente al procedimiento. Se resalta que todos los elementos presentan el mismo valor de deformación, puesto que se establece este valor como tome máximo en la simulación; una deformación de $2 \cdot 10^{-3} \text{m}$.



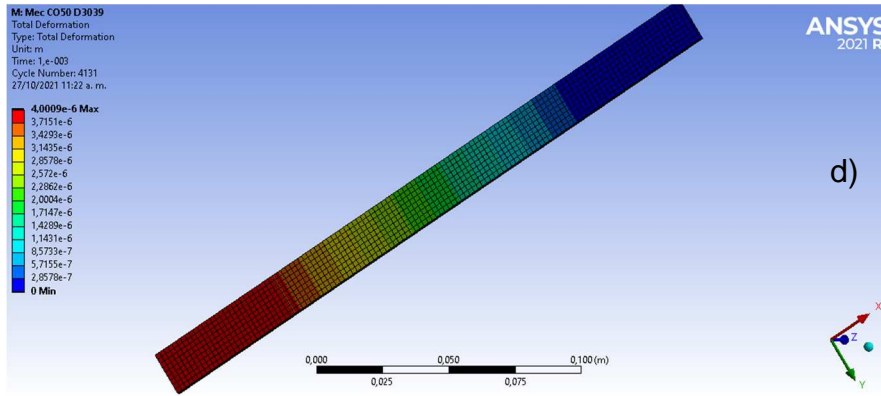
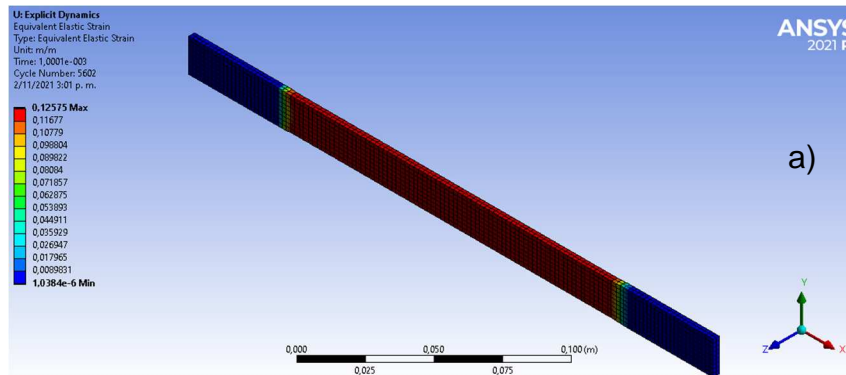


Figura 18. Evidencia del modelo y distribuciones de la deformación total en las muestras luego de la tracción a) PET 0CO b) 30CO c) 40CO y d) 50CO.

7.1.2.1 Análisis de las deformaciones presentadas en la simulación de un ensayo de tracción en una probeta plana

Adicionalmente, en la **Figura 19** se observan los resultados de las deformaciones equivalentes elásticas las cuales se concentran evidentemente en las zonas de las probetas donde no se ha simulado agarre con las mordazas, lo cual es lo de esperar debido a que se necesita que los esfuerzos mecánicos se concentren en dicha zona. Lo anterior es evidente debido a que los colores más intensos se encuentran una zona cercana a donde se simulan las las mordazas, lo cual puede inferir que las mayores deformaciones de generan precisamente en esta zona y si en este caso se realizara un experimento real, sería evidente que la deformación inicia en las cercanías de las mordazas.



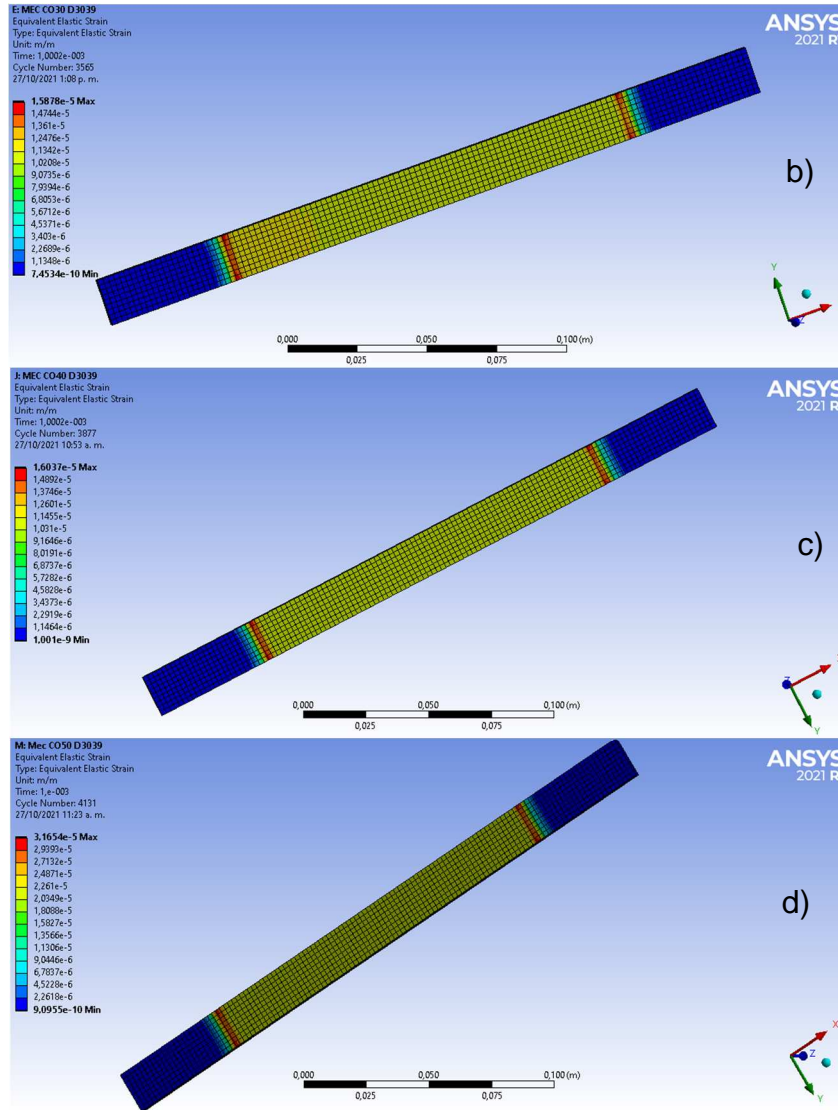


Figura 19. Resultados de la deformación equivalente elástica de cada muestra a) PET b) 30CO c) 40CO y d) 50CO.

Como también es necesario destacar el efecto que se genera sobre la deformación elástica con la inclusión de las fibras de coco, debido a que la distribución de dichas deformaciones es muy cambiante, ya que en la simulación con 0CO el valor de la deformación elástica en esta muestra alcanza un valor máximo en toda la sesión controlada en la simulación (ver **Figura 19.a**), siendo esta magnitud a su vez muy superior a la presentada por las muestras con 30, 40 50CO. En el caso de la muestra simulada con 30CO (ver **Figura 19.b**), se evidencia un cambio considerable en la distribución de las deformaciones elásticas en los diferentes elementos finitos, notándose que las magnitudes más elevadas se presentan en las cercanías de la zona de las mordazas simuladas, disminuyendo estos valores hacia el centro de la probeta, el sistema de 30CO presenta una deformación elástica máxima de 1.5878×10^{-5} m/m (Considerablemente menor que la muestra sin adicción de fibras:

0.15575m/m). En el caso de las muestras con 40CO y 50CO se presentan valores de deformación de $1.6037 \cdot 10^{-5}$ y $3.1654 \cdot 10^{-5}$ de manera respectiva, presentando un ligero aumento respecto a la muestra con menor adición de fibras de coco. Sin embargo, si bien se sabe que la correlación entre el aumento de las propiedades mecánicas y el porcentaje de fibras no siempre van en aumento, principalmente debido a que según dice la literatura, el aumento de las fibras puede reducir la adhesión entre fibras y matriz [20], [22], [77]. .

Entre otras situaciones a resaltar, en esta simulación no se considera un posible resbalamiento del material y las mordazas. En este caso se precisa que por la simetría de las muestras puesto que los lugares donde se acoplan las cargas son tanto arriba como abajo (ver **Figura 15**).

Es evidente que la adición de las fibras de se presenta una deformación elástica mayor, lo cual es una consecuencia de la rigidez añadida por las fibras naturales de coco, por lo cual es coherente la diferencia en la **Figura 20** donde los valores de deformación máxima toman magnitudes muy por encima de las presentadas por las muestras reforzadas. También se nota que las muestras 50CO y 40CO presentan deformaciones muy similares, lo cual parece indicar que no existe un efecto específico de la deformación en porcentajes de fibras con un 40% en volumen, posiblemente porque la interacción entre la matriz y el refuerzo no sea tan fluctuante. Por otro lado, se resalta que las deformaciones elásticas simuladas para las muestras 30CO presentan la menor deformación elástica equivalente [78].

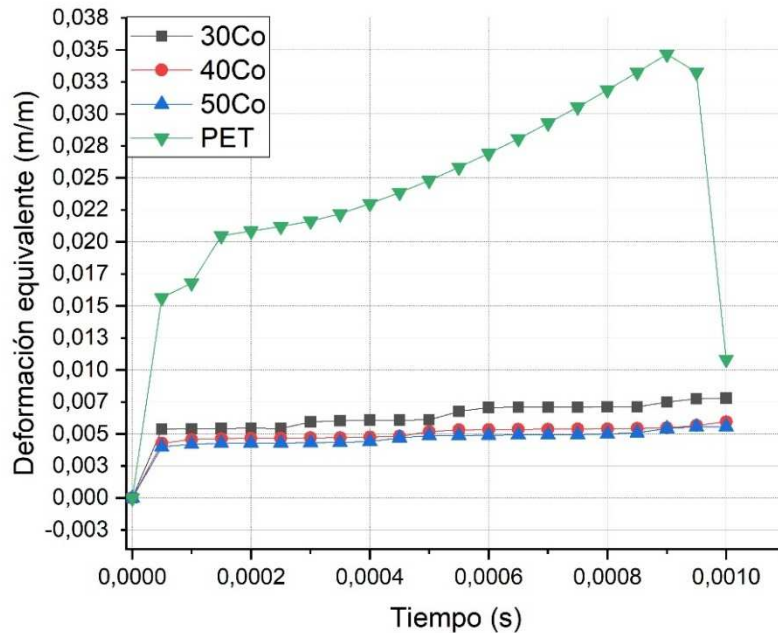


Figura 20. Resultados de la deformación elástica equivalente en función del tiempo de la simulación (gráfica semiLog en el eje Y).

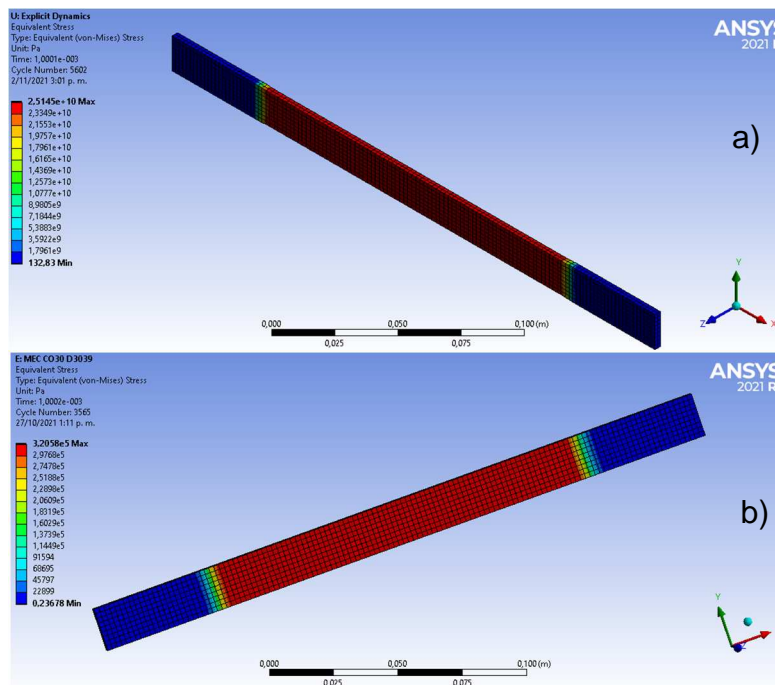
Cabe resaltar el importante efecto de la incorporación de las fibras naturales de coco sobre la magnitud de la deformación elástica del material. Sin embargo, en este parámetro no se encuentra una diferencia clara entre las incorporaciones entre 30 y 50% de volumen de fibra natural de coco. Si bien vemos que no se detecta un efecto diferencial identificable entre las adiciones, en ítem anterior observamos que si se presenta un aumento gradual con la incorporación de fibra sobre el módulo de Young que es precisamente la relación lineal entre la deformación elástica y el esfuerzo realizado [71].

7.1.2.2 Análisis de los esfuerzos presentados en la simulación de un ensayo de tracción en una probeta plana.

En este caso se puede observar los resultados de los esfuerzos de tracción obtenidos para las muestras de PET con incorporaciones de fibras naturales de Coco simuladas (ver **Figura 21**), notando que de nuevo el efecto causado por la incorporación de las fibras, resaltando así el aumento del valor máximo del esfuerzo incremental con la incorporación de las fibras, como era de esperar la razón de este incremento se debe a rigidez proporcionada por las fibras adicionadas. La cual es: Que para las muestras con 50Co será necesario aplicar un esfuerzo de mayor magnitud para obtener la misma deformación que el presentado por las muestras con 40CO y 30CO.

Las **Figura 21.a),b),c) y d)** muestra cómo se distribuyen los esfuerzos en la probetas simuladas, donde efectivamente se centran en la región ajustada y no se presenta fuga de esfuerzos en las zonas donde se tienen las mordazas simuladas, es de resaltar que dichas figuras también expresan el aumento de los valores máximos del esfuerzo aplicado sobre el material, con el aumento de la adicción de las fibras de coco, pasando de $3,2058 \times 10^5$ Pa para la muestra de 30CO, llegando a valores de 1.0007×10^6 Pa para la muestra con 50CO. Lo cual demuestra que es posible aumentar el esfuerzo soportado por las muestras simuladas con la incorporación de fibras de coco. Esta información es complementada por lo observado en las **Figura 19.a),b),c) y d)**, donde precisamente se aumentan los valores de deformación, también relacionado a este incremento potencial de los esfuerzos máximos encontrados.

En la **Figura 22** se muestran de una manera más clara como cambian los valores del esfuerzo máximo en función del tiempo y se observa claramente que con la incorporación de fibras naturales de Coco se nota que gradualmente se aumenta la cantidad de esfuerzo aplicado para generar un porcentaje específico de deformación en el material (debido a que en todos los casos las mordazas móviles se sometieron a un desplazamiento idéntico), se resalta el valor tan elevado del esfuerzo necesario para deformar la muestra simulada de 50% de volumen de fibras, lo cual es un claro efecto de la incorporación al sistema de un material natural con una rigidez mayor así como un módulo de elasticidad mayor [79].



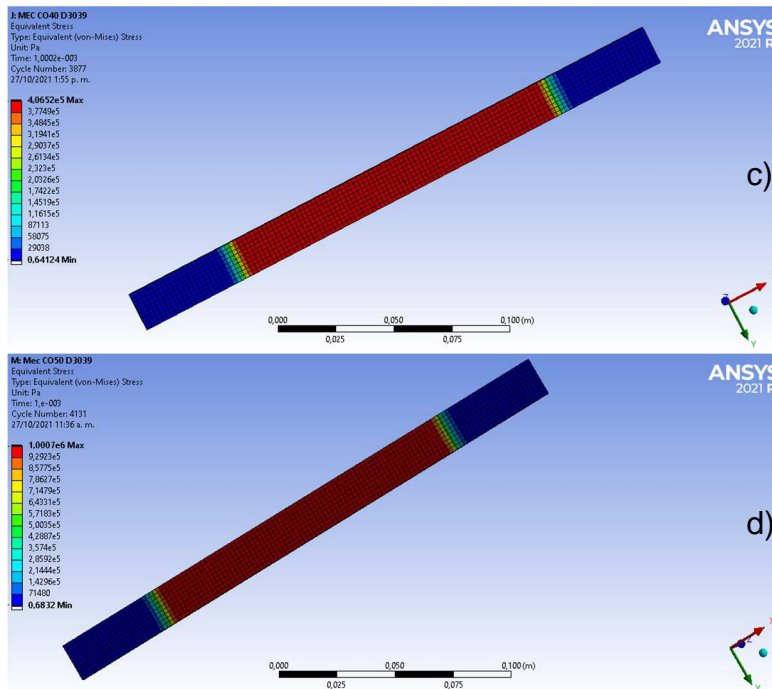


Figura 21. Resultados de la simulación, valores de esfuerzo para las muestras a) PET b) 30CO c) 40CO y d) 50CO.

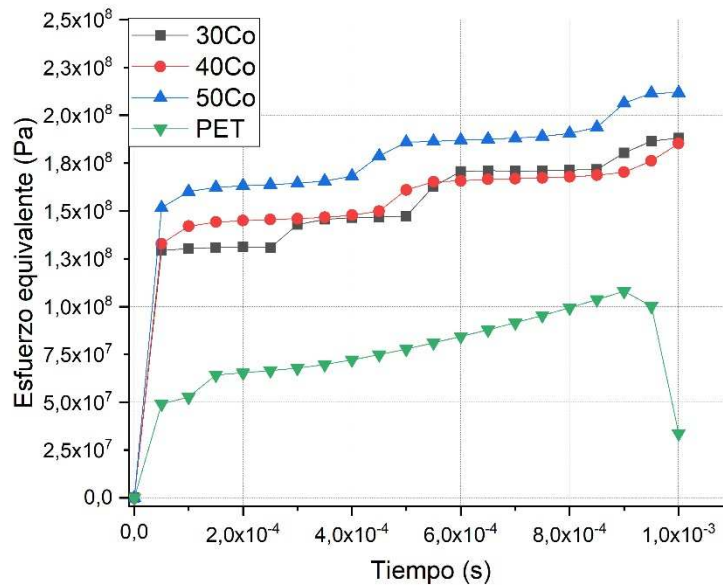


Figura 22. Resultados compilados del esfuerzo máximo a la tracción para las muestras analizadas.

Finalmente, en la **Figura 23** se muestra la relación entre el esfuerzo y la deformación equivalente de tipo Von Mises, que se busca relacionar la energía de distorsión máxima con los esfuerzos presentados por la muestra [80]. Para el caso es evidente

que se obtienen unas curvas donde los mayores esfuerzos de tracción se presentan con una adición superior de fibras naturales de coco, lo cual es coherente con lo descrito anteriormente mencionado en la literatura [19]–[21], [33], [81], [82], debido a que en la definición teórica del efecto sinérgico de las fibras naturales en conjunto con la matriz de PET. Adicionalmente, la tendencia se evidencia claramente que al aumentar el porcentaje volumétrico de las fibras tendremos un aumento del esfuerzo máximo de tracción (acorde, también a lo observado en la **Figura 21** y en la literatura [19]–[21], [33], [81], [82]), así como la presentación de deformaciones equivalentes menores conforme se incrementa el volumen de fibras naturales de coco, como también se evidencia en la **Figura 20**).

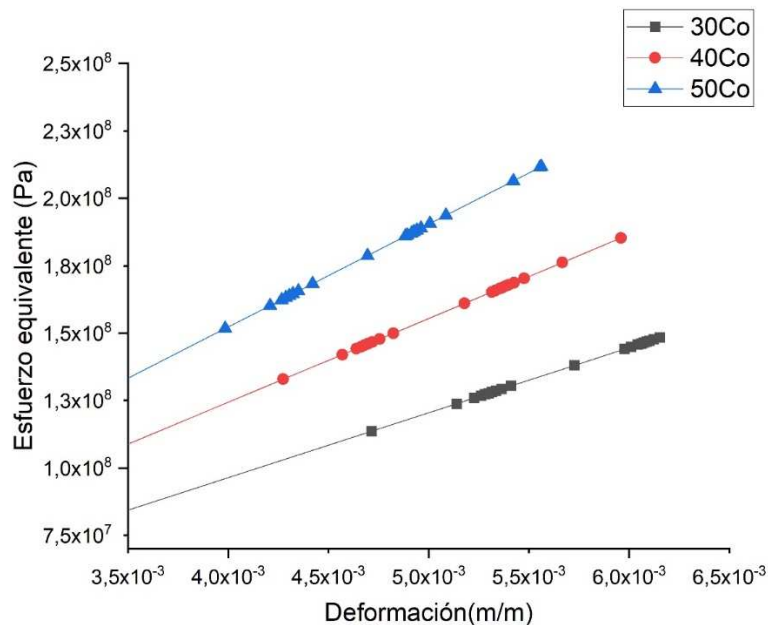


Figura 23. Resultados de esfuerzo y deformación equivalente

Como información complementaria, la siguiente grafica (**Figura 24**) expresa la interacción energética de las muestras junto con la aplicación de las fuerzas o desplazamiento en búsqueda identificar el efecto de las mismas en la simulación, se identifica que la formación del modelo pertenece a lo esperado, principalmente justificado por el comportamiento de la gráfica, en los resultados se denota que la deformación, en la se observa las figuras que relatan el efecto de la adición de las fibras de coco sobre el error determinado sobre la energía presente en el sistema, por lo cual se nota la precisión del modelo, puesto que los datos presentan un error muy bajo si se considera la energía del trabajo realizado, siendo este un valor sin significancia respecto a lo que se presenta por la curva de color verde para los diferentes sistemas analizados.

Con el objetivo de complementar la información, se resalta que acorde a lo encontrado en actividades experimentales reportados en la literatura, los valores de

los esfuerzos en conjunto de las fibras y la matriz se presentan muy similares a lo obtenido en esta investigación. No sobra mencionar, que este trabajo tiene el valor agregado estudiar el sistema PET-Coco, siendo muy limitada la información del cual no se encuentran opciones en el mercado ni en los diferentes sistemas de información, artículos o revistas [50], [51].

Para todos los casos donde se adicionan fibras de coco es evidente que se favorece las propiedades mecánicas de un material polimérico como es el caso del PET, por lo cual permite ser una alternativa valiosa para este tipo de materiales. Al final, será necesario contrastar estos resultados obtenidos con medidas y aplicaciones experimentales, donde se evidenciarán problemas como aparición de burbujas, desprendimientos de interfase, falta de penetración de la matriz (PET) en estado fluidizado, donde se evidencian estos errores presentes en este sistema, en general la metodología de fabricación de estos materiales compuestos puede consistir en moldeo por inyección del material fundido, con el control de la disposición de las fibras naturales de coco [83].

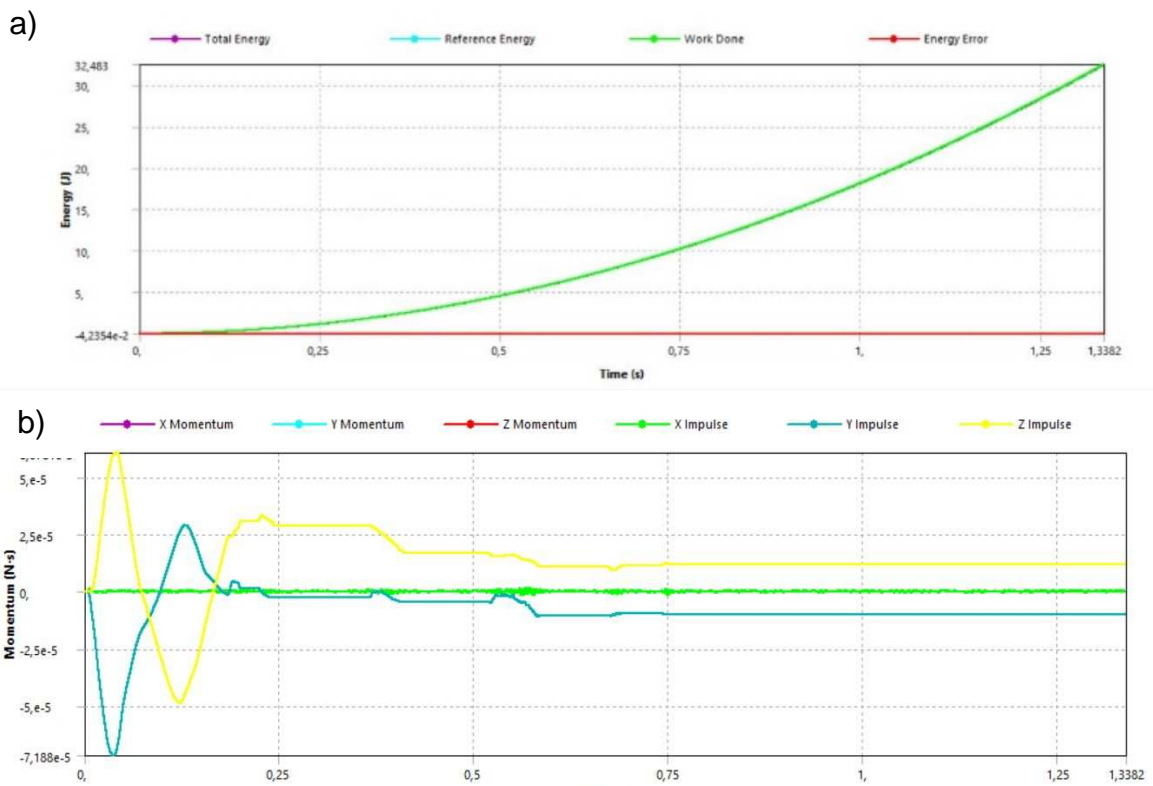


Figura 24. a) Comportamiento de la magnitud energético del error durante el proceso de la situación, b) cambio del momento en la estabilidad del proceso de simulación para la muestra con 30% de fibra de coco.

Como se evidencia en la **Figura 24.a** el rango presentado por la magnitud de los errores en la simulación para la muestra la baja relación del error respecto al trabajo realizado, por lo cual indica que los resultados si bien tienen un error típico de

cualquier tipo de simulación o proceso que puede relacionarse con situaciones reales, el valor energético del error presentado por la muestra con 30% de volumen en fibra se acerca a un $4,235 \cdot 10^{-2}$, el cual se mantiene estable en el tiempo, lo cual significa que la simulación es correcta para el procedimiento realizado, según lo consultado tanto como la literatura y los foros de Ansys, se muestra que evidentemente que el procedimiento es adecuado y la situación analítica trabaja correctamente [84].

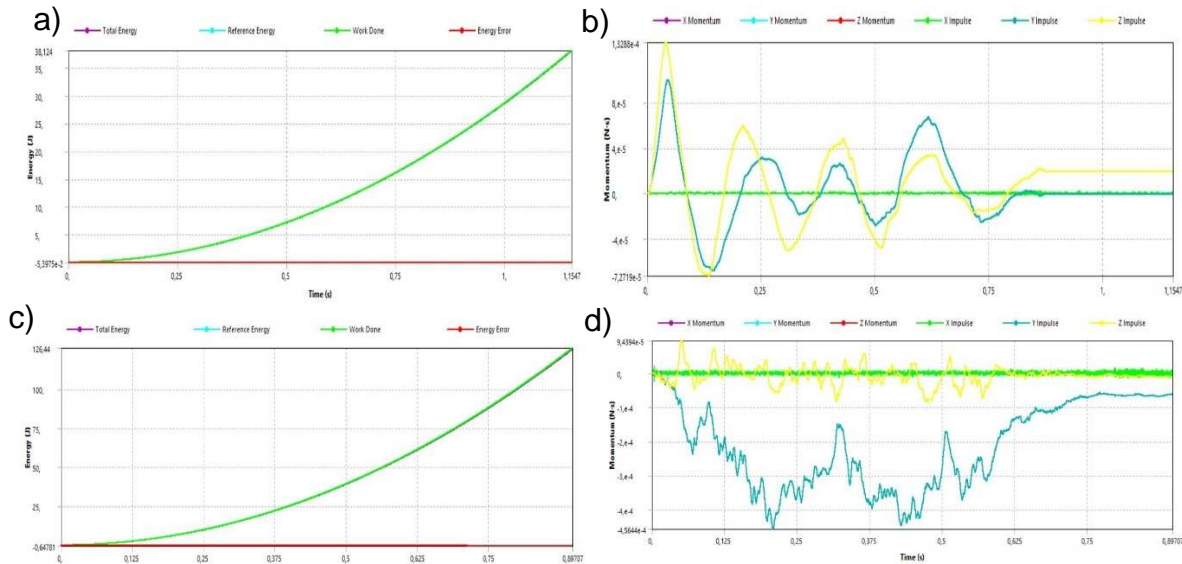


Figura 25. Energía del error y convergencia del momento de una fuerza en el tiempo para las muestras a. y b. 40CO y c. y d. para la muestra de 50CO.

Por otro lado, se observan los valores de energía del error que va aumentando en magnitud conforme se adicionan las fibras de coco, siendo evidenciado en la **Figura 25.a** y **Figura 25.b** siendo esto causado posiblemente por la distorsión en el procedimiento causado por las propias fibras en el sistema, por lo cual al encontrar un volumen mayor el comportamiento presenta mayores cambios.

Finalmente, se resalta la presencia del comportamiento de convergencia del momento de una fuerza, evidenciando que con la adición de fibras de coco cuesta un mayor tiempo en converger a un valor constante de este momento, lo que se puede evidenciar en las **Figura 25.a, .b** y la **Figura 24.b** donde en la muestra con 30CO se evidencia que después de un tiempo de 0.75 segundos podemos encontrar una convergencia completa del momento de una fuerza y en el caso de los sistemas de 40CO y 50CO vemos que dicha convergencia se retrasa de una manera más evidente en el tiempo conforme se aumenta el porcentaje de fibras de coco [85].

8 Resultados y discusión: Propiedades Térmicas

En esta sesión se exponen todos los resultados del estudio térmico realizado sobre las muestras analizadas, obtenidas a partir de las simulaciones mecánicas que se realizaron, se observa el efecto considerable de las adiciones de las fibras de coco sobre dichas propiedades, notando un importante efecto sobre los efectos de transmisión de calor principalmente en función del tiempo, así como los cambios generados principalmente por el aumento volumétrico de las fibras.

Se debe aclarar que para todos los procedimientos se tomó como temperatura inicial 22°C el cual se fijó en un extremo y en el otro se estableció una temperatura fija de 100°C (el cual ha sido sugerido por la literatura estudiada y que representa un rango en el cual será utilizado a nivel comercial [16], [32]) la cual permitirá presentar una siempre diferencia de temperatura que permita el flujo térmico. En esta sesión se logra determinar propiedades térmicas como es el caso de la conductividad térmica, identificar los flujos térmicos obtenidos en las muestras, así como el valor de difusividad, se destaca que se disminuye la magnitud del conjunto de las propiedades térmicas con el aumento del porcentaje volumétrico de las fibras.

Para iniciar los análisis térmicos es necesario determinar las propiedades generales de cada uno de los materiales estudiados los valores de conductividad térmica (κ) y el calor específico a presión constante (C_P). En la **Tabla 7** se pueden observar los resultados de las propiedades térmicas obtenidas por simulación y con ayuda de la herramienta “Materials Designer” para las diferentes muestras analizadas, en el caso de la conductividad térmica como era de esperar presentará diferencias en la magnitud en función de los ejes tridimensionales, siendo la dirección en la cual se encuentran distribuidas las fibras (κ_x) ya que en esta se realiza la mejor relación en las propiedades. Adicionalmente, en las direcciones “Y” y “Z” es observable que las magnitudes respectivas de la conductividad térmica son iguales, debido a que en estos ejes se presenta un fenómeno de simetría.

Es conocida la gran importancia de la conductividad térmica para los materiales poliméricos y en este caso materiales compuestos, gracias a sus viables aplicaciones como materiales aislantes, como es el caso de las producciones textiles, y este parámetro posee su principal importancia cuando es orientado a situaciones de sensación de frío y de calor, lo cual es de suprema importancia para su utilización comercial [86].

Adicionalmente, se resalta la importante disminución de la conductividad térmica con la matriz de PET con la incorporación de las fibras, lo cual en el caso de la dirección de la orientación de las fibras se ve menos (refiriéndose a la propiedad κ_x)

y como se puede observar en los resultados, en dirección “X” la conductividad cae desde 0,24 W/mK para un 0% en volumen de fibras de coco hasta un 0,143W/mK con un porcentaje del 50% en volumen.

En el caso de las direcciones “Y y Z” se encuentra el decaimiento más importante, llegando a valores de 0,119 W/mK de nuevo con un volumen de fibra de coco de 50% de fibras. Una posible explicación de este fenómeno es precisamente por el carácter aislante que presentan las fibras de coco como se ha demostrado en diferentes estudios[27] y la respectiva magnitud de la conductividad térmica de las fibras de coco siendo esta de un valor de 0,046W/mK [87], notablemente inferior al presentado por el polímero PET base, esta reducción se observa en otros resultados experimentales como es el caso de A. *Demain et all* y A. *Yamanaka* [88], [89].

Tabla 7. Valores de compilados de parámetros térmicos obtenidos en la simulación empelando la herramienta “Materials Designer”.

	κ_x [W/mK]	κ_y [W/mK]	κ_z [W/mK]	C_p [J/kg*K]
PET	0,24			1720
30CO	0,182	0,159	0,159	1296,3
40CO	0,162	0,138	0,138	1195,4
50CO	0,143	0,119	0,119	1108

Por otro lado, es importante resaltar que el comportamiento del calor específico a presión constante es similar a lo ocurrido para la conductividad térmica, ya que se puede observar una disminución de la magnitud de este parámetro conforme se incrementa la relación volumétrica de las fibras de coco presentes en el material, pasando en este caso, donde se nota claramente que el PET sin inclusión de fibras de coco posee una magnitud de 1720J/kgK y que posteriormente decrece a 1108J/kgK con el máximo porcentaje volumétrico de fibras.

Es necesario mencionar que existe un detrimento en las características y propiedades del material compuestos, como es la posible de generación de delaminación, formación de poros y burbujas en el material, así como las diferentes irregularidades que puedan presentarse al realizar el mezclado del material, como lo han mostrado también diferentes investigadores como es el caso de *L Mohamed et all* [90].

Según lo consultado en la literatura, en un proceso térmico la magnitud de una sola fibra de la conductividad térmica en dirección transversal es únicamente posible llegar a una estimación y no se puede lograr una determinación real, sin embargo, como se evidencia en los resultados es coherente el comportamiento del modelo con lo encontrado en la literatura, también a mencionar que por la propia irregularidad de las fibras naturales [16], [91], [92].

Para terminar, se ha comparado con algunos estudios presentes en la literatura, los cuales indican que la carga térmica es un factor importante para las estructuras constituidas por fibras, siendo que el movimiento térmico el que interactúa con los defectos como los esfuerzos residuales internos y microburbujas o delaminaciones propias del material compuesto, por lo cual la simulación del comportamiento térmico está sujeto a esas irregularidades. Por lo cual, dichos defectos son eliminados en las consideraciones de los defectos para condiciones que pueden acercarse a las configuraciones ideales, la aleatoriedad de los defectos pueden generar diferencias con lo encontrado con lo posiblemente identificable con la realidad [93].

8.1.1 Estudio térmico centrado en flujo de calor en estado estacionario

“Ansys Workbench” posee varios sistemas predestinados para realizar análisis térmicos, el primero mediante la aplicación “Stedy-State Thermal” el cual permite configurar estos análisis partiendo de un equilibrio térmico ya establecido, lo cual indica que el flujo térmico será constante e independiente del tiempo establecido para cualquiera de las muestras estudiadas sin importar el porcentaje volumétrico de las fibras naturales de coco.

La realización de este experimento en estado estacionario posee la ventaja de determinar del flujo total del calor, siendo claramente definido y centrado en la misma dirección de las fibras o el definido como el eje “X”, estas condiciones de transferencia de calor total verán afectadas en las simulaciones gracias a la presencia de las fibras en la matriz del compuesto.

Entre todas las simulaciones obtenidas se estudió principalmente la temperatura promedio, la cual en el estado estacionario fue igual e independiente de la relación PET/fibra natural de coco y este valor fue de 61°C. Para demostrar lo anterior en la **Figura 26** se muestra la distribución de la temperatura para todas las muestras estudiadas y donde se evidencia que dicha distribución no es diferente sin importar el porcentaje de volumen de fibras [94].

La diferencia que se encuentra en estos procedimientos para las diferentes muestras se centró en la magnitud del flujo de calor constante en el estado estacionario (ver en la **Figura 27** para la muestra 30CO), el cual se puede observar en la **Tabla 8**, donde el flujo de calor que se puede observar que como era de esperar se reduce considerablemente el flujo de calor, lo cual es consecuente con el cambio de la magnitud de la conductividad térmica la cual como se conoce es la capacidad que los materiales poseen para conducir un flujo de calor y gracias al efecto aislante de las fibras naturales de coco causan una reducción importante de esta propiedad, notándose que el flujo de calor obtenido durante la simulación [92],

térmica en estado estacionario disminuye desde $187,20\text{W/m}^2$ hasta $110,55\text{W/m}^2$ para una muestra con 50% en volumen de fibras.

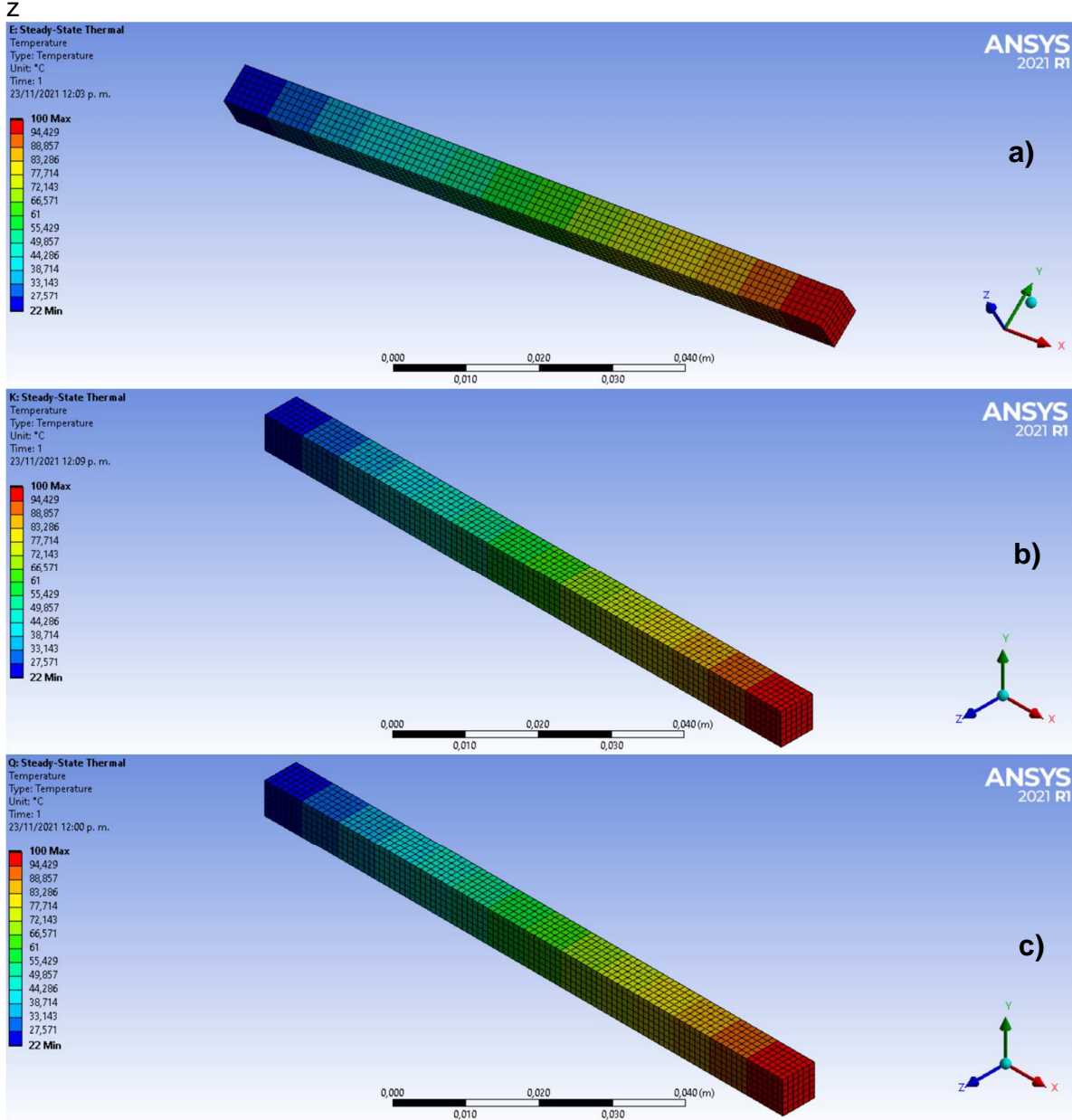


Figura 26. Distribución de temperatura para las diferentes muestras a) 30CO, b) 40CO y c)50CO.

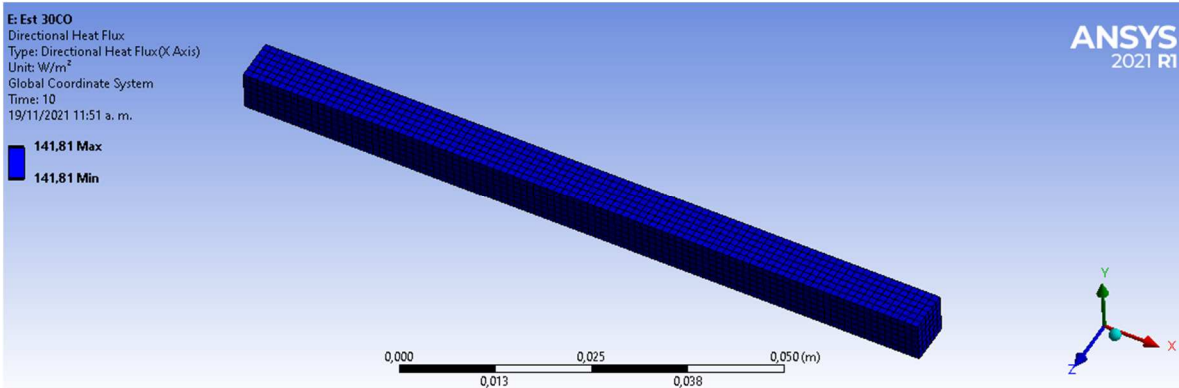


Figura 27. Ejemplo de la distribución de flujo de calor estacionario, para la muestra 30CO.

También es resaltable que para la adición del 50% de fibras en volumen, la pérdida de la transferencia de calor alcanza un porcentaje cercano del 40% (en volumen), lo cual puede ser un efecto contraproducente si lo que se necesita es un beneficio entre las propiedades térmicas y mecánicas, en el capítulo anterior se discutió la efectividad de añadir fibras de coco para incrementar el valor del módulo de elasticidad, así como obtener magnitudes de resistencia a la tracción más elevados.

Sin embargo, es necesario en muchos casos realizar una correcta relación entre los beneficios de las propiedades térmicas y mecánicas, por lo cual puede considerarse que una muestra 50% en volumen de fibras naturales la cantidad de fibras obtenidas no sería del todo recomendable para un conjunto de aplicaciones específicas que demanden un importante rendimiento térmico del sistema. Lo cual puede sugerir que con la modificación de los porcentajes obtener puede lograrse un espectro de materiales con ventajas en propiedades bien sea mecánicas o térmicas [95].

Tabla 8. Resultados del flujo de calor en estado estacionario.

Muestra	Flujo de calor total en estado estacionario (W/m ²)
PET	187,20
30CO	141,81
40CO	126,68
50CO	110,55

8.1.2 Estudio térmico centrado en flujo de calor en estado transitorio

En este caso utilizaremos herramientas de “Ansys Workbench” para sistemas que no presentan una estabilidad termodinámica y empleando la herramienta “Transient Thermal” que permite establecer que el flujo térmico se realice en función del tiempo para condiciones y características más realistas y cuyo flujo térmico no será constante e irá evolucionando en función de la variable temporal. Para iniciar esta evolución térmica se realizaron para cada muestra, un conjunto de simulaciones a diferentes tiempos, siendo el primero de 10 s, 100s y finalmente 1000s permitieron describir el perfil de temperatura para las muestras analizadas y flujo térmico para cada condición establecida. Es necesario aclarar que el flujo térmico que se presenta en esta simulación en todos los casos será unidireccional, con el objetivo de que se evalúe el comportamiento en la misma dirección de propagación de las fibras, por lo cual las otras direcciones se presentarán flujos residuales.

8.1.2.1 Análisis de la curva de temperatura en estado transitorio para los diferentes sistemas.

En esta etapa del análisis se evaluaron en ejemplo el avance térmico del material en función de los diferentes tiempos y los porcentajes volumétricos de fibras planteadas inicialmente en la **Tabla 4** pero modificando para estos casos los tiempos de simulación.

El efecto del tiempo sobre la distribución de la temperatura en todo el volumen de los elementos simulados se puede observar en la **Figura 28** donde se puede determinar la distribución de temperatura para el sistema de 40CO en tiempos de 10s (**Figura 28.a**), donde se observa claramente que la temperatura se ve modificada desde la cara con una temperatura de 100 °C hasta una corta distancia de 2mm cercana alrededor de la cara caliente (100°C).

En la **Figura 28.b** se presenta la distribución de la temperatura en una simulación con una duración de 100s, se evidencia en este caso que la variación presentada se centra en los primeros 8mm cercanos a la cara del sólido con la temperatura fija de 100°C (alcanzando a esta distancia una temperatura de 27,571 °C). Finalmente, en la **Figura 28.c** se muestra el efecto térmico sobre la muestra, notando que en este caso que la variación de la temperatura alcanza una distancia aproximada de 24mm, alcanzando también una temperatura de 27,571°C.

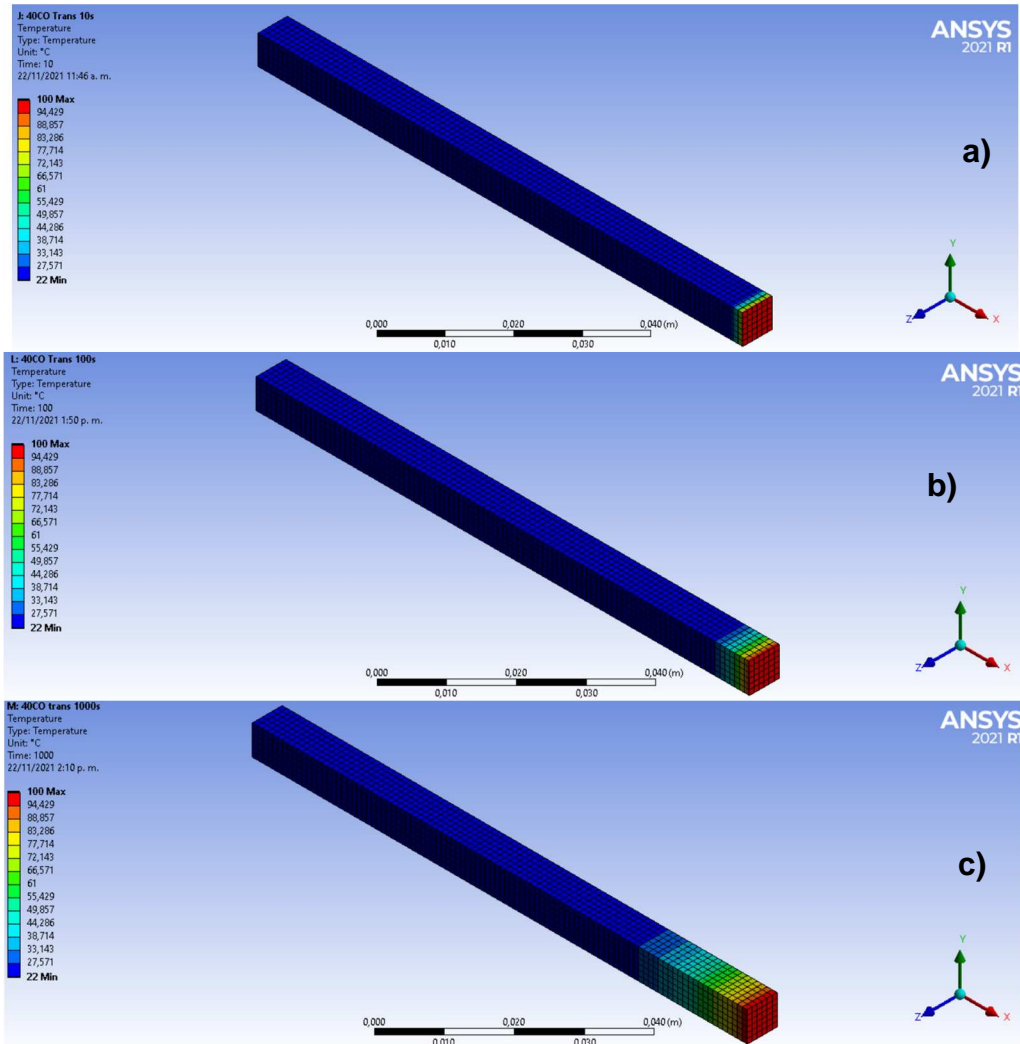


Figura 28. Figuras de distribución de temperatura para el sistema 40CO en tiempos de: a) 10s, b) 100s y c) 1000s

Para dar complemento al análisis previamente descrito, la **Figura 29** muestra como es la curva de estabilización de temperatura promedio en el volumen de la probeta simulada en función del tiempo y se observa cómo va decreciendo la pendiente de la temperatura, relacionándose estos con la tendencia de tener un flujo estacionario, donde el valor de la pendiente de la curva toma un valor cercano a 0 y un valor de temperatura de 61 °C como anteriormente se describió en la etapa del análisis térmico en estado estacionario [96], [97].

Se resalta que para tiempos inferiores a los 1000s encontramos en la simulación un comportamiento que describe el mismo comportamiento en función del tiempo, por lo cual es evidente que será necesario utilizar tiempos superiores para detectar la correcta simulación para llegar al estado estacionario. Es de recordar que la propiedad que es la responsable de la transferencia de calor de manera transversal a la probeta simulada depende principalmente de la conductividad térmica y los efectos de la relación fibra/matriz, como anteriormente se discutió en su respectivo apartado y como se ha observado en la literatura [66].

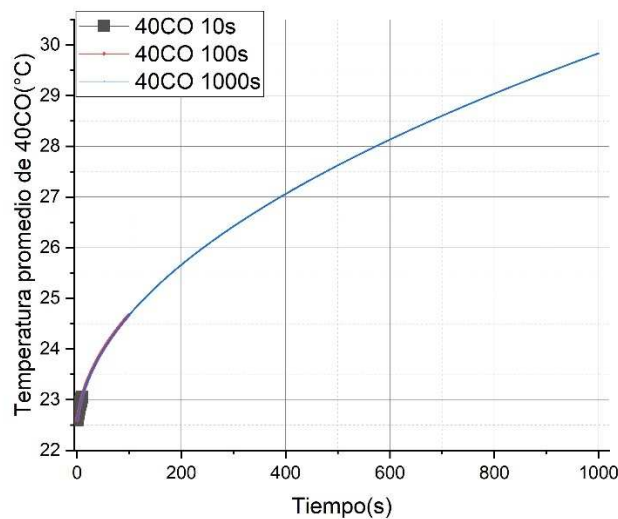


Figura 29. Curva de estabilización de la temperatura promedio en los análisis térmicos en estado transitorio para la muestra 40CO

Posteriormente, en la **Figura 30** se muestra las diferentes curvas de estabilización de la temperatura, cada una correspondiente a las diferentes muestras simuladas, para la muestra sin adicción de fibras observamos una tendencia más rápida para alcanzar la temperatura de flujo estacionario, indica que presenta una velocidad de estabilización térmica mayor, que la presentada por las diferentes simulaciones para las muestras con 30, 40 y 50% de volumen de fibras de manera respectiva.

Otra observación importante se centra en que a un tiempo de simulación de 1000s conforme se aumenta el porcentaje de fibras la temperatura promedio de la muestra, es cada vez inferior, lo que significa que la transferencia de calor es cada vez inferior conforme se adiciona las fibras naturales de coco, por lo cual la velocidad de estabilización de la temperatura presenta una magnitud inferior, esta situación también se puede observar en estudios experimentales realizados adecuadamente por diferentes autores, donde se ha observado una tendencia similar [93], [98].

Lo anteriormente descrito se puede resaltar en la **Tabla 9**, que muestra la ecuación determinada empleando métodos de bondad y ajuste empleando las herramientas de análisis de OriginProLab 2018, para la cual la mejor condición de ajuste se logró obtener con un modelo polinómico de tercer grado. Lo anterior se presentó para las 4 muestras, puesto que todas se adaptaban a este modelo, como efectivamente lo resalta el valor de correlación de Pearson (R^2) en la propia tabla siendo el valor de correlación superior a 0,997 en todas las condiciones, indicando así que la ecuación tiene los datos obtenidos de la simulación se ajusta de manera muy adecuada con la ecuación obtenida [99].

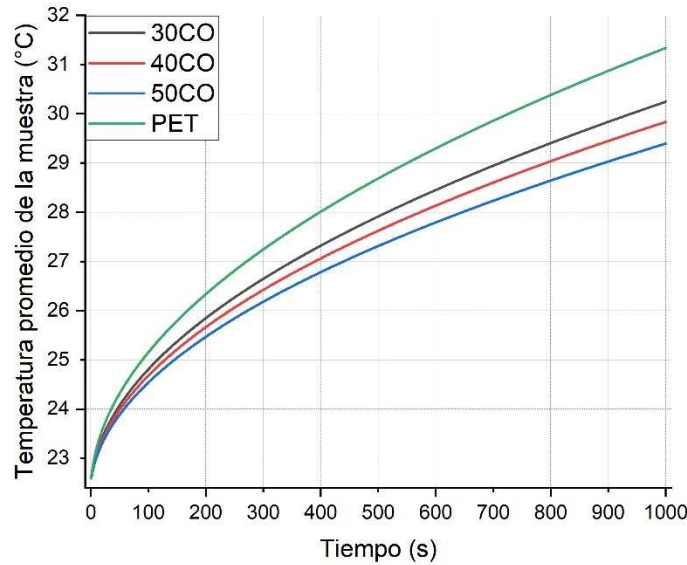


Figura 30. Comparación de la curva de estabilización de temperatura en análisis térmicos transitorios para las diferentes muestras

Tabla 9. Ajustes de tendencia para describir la temperatura promedio en función del tiempo.

Muestra	Ecuación de la temperatura promedio en función del tiempo (T(°C))	(R^2) *	Ecuación de la velocidad de estabilización de la temperatura ($d(T(^{\circ}C))/dt$)
PET (0CO)	$8E^{-9}t^3-2E^{-5}t^2+0,0171t+23,457$	0,9979	$24E^{-9}t^2-4E^{-5}t+0,0171$
30CO	$7E^{-9}t^3-1E^{-5}t^2+0,015t+23,318$	0,998	$21E^{-9}t^2-2E^{-5}t+0,015$
40CO	$7E^{-9}t^3-1E^{-5}t^2+0,0142t+23,267$	0,998	$21E^{-9}t^2-2E^{-5}t+0,0142$
50CO	$6E^{-9}t^3-1E^{-5}t^2+0,0134t+23,21$	0,998	$18E^{-9}t^2-2E^{-5}t+0,0134$

*Coeficiente de correlación de Pearson (R^2)

8.1.2.2 Análisis de la curva de transferencia de calor en estado transitorio para los diferentes sistemas.

Anteriormente se realizó el análisis de los resultados obtenidos en las herramientas de “Ansys” centrados en el cambio de la temperatura, también se ha complementado con la identificación del flujo térmico total que presentan estas muestras sometidas a simulación bajo condiciones transitorias y así como la retroalimentación ofrecida por los resultados de la simulación en estado estable condensadas en la **Tabla 8**, donde se evidenciaba que los valores generales obtenidos de la transferencia de flujo estacionario.

Donde los resultados están condensados en la **Figura 31** y como en el caso de la temperatura en el ítem anterior, el flujo térmico será dependiente del tiempo, viéndose en todos los casos que el valor del flujo térmico cada vez más estable, principalmente después de los 400s, de nuevo la estabilización dependerá de cómo se va distribuyendo la temperatura en el sistema, lo que permite la aparición de un flujo variable o estable del calor. Es evidente que la ventaja de este tipo de análisis térmico es que siempre se va a presentar un flujo energético en todo el volumen descrito en la **Figura 17** debido a que tenemos establecidas caras a temperaturas de 100 °C y otra a 22°C, lo que permitiría que a tiempos muy lejanos se pueda presentar un flujo térmico que tomaría magnitudes constantes a través de los tiempos [100].

Adicionalmente, cabe resaltar el importante efecto de la incorporación de fibras en el flujo promedio del material, encontrando así que conforme aumenta el porcentaje volumétrico de fibras naturales de coco en el sistema del material compuesto, donde cada vez se presenta un flujo térmico promedio inferior conforme aumenta el tiempo del análisis y así llegar a los mismos flujos presentados en la sesión de los análisis en estado estacionario, también se resalta que al principio del ensayo, los valores de transferencia son más altos (instantes posteriores al segundo “0”) lo cual puede deberse a la energía de activación necesaria para dar inicio al flujo térmico del material [16], [92].

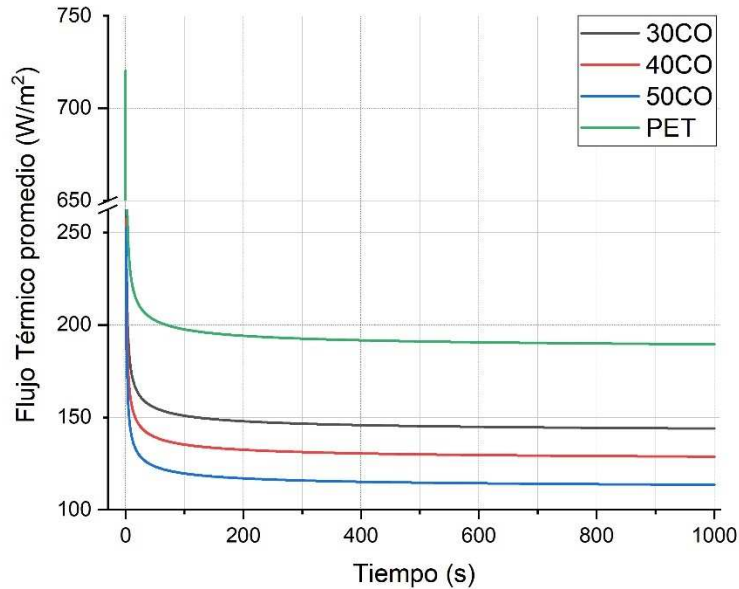


Figura 31. Curvas de estabilización del flujo térmico total promedio presentado para todas las muestras en el análisis térmico transitorio.

Adicionalmente, fue necesario identificar si la distribución energética del material en las diferentes direcciones, como es el caso de en la cual se disponen las fibras (eje X) y los otros ejes que serían transversales a las fibras, siendo estos los ejes Y y Z. La **Figura 32.b** muestra la comparación del flujo térmico para las tres dimensiones (ejes) para la muestra 30CO, en este caso se resalta que los valores del flujo presentado en dirección del eje Y (línea de color rojo), y en dirección del eje Z (línea discontinua de color azul) son muy bajos y casi que inmodificables en función del tiempo, situación distinta se presenta en dirección del eje X donde se presenta el mismo comportamiento del flujo térmico total descrito previamente en la **Figura 31**, lo cual indica que este procedimiento presenta una correcta distribución del flujo térmico total, como de las diferencias de la temperatura en el volumen simulado, se dirigen únicamente en la dirección del eje X.

Se resalta que, en la **Figura 32.b** el flujo térmico se presenta un valor negativo en el eje X, esto se debe a la ubicación de la cara con temperatura constante de 100°C y la segunda que se encuentra a 22°C, similar a lo presentado por los trabajos realizados por *Hechavarría et All* y *Mutnuri. B* para la determinación experimental de la conductividad térmica de materiales compuestos [65], [100].

Para terminar, en la **Figura 32.a** se muestra un comportamiento similar, pero en este caso para la muestra de 0CO o PET, donde también se presentan valores bajos del flujo térmico de las direcciones Y y Z, siendo esto un resultado destacable gracias a que permite verificar que la metodología es adecuada para el

establecimiento de un flujo térmico unidireccional, como era el objetivo de este análisis.

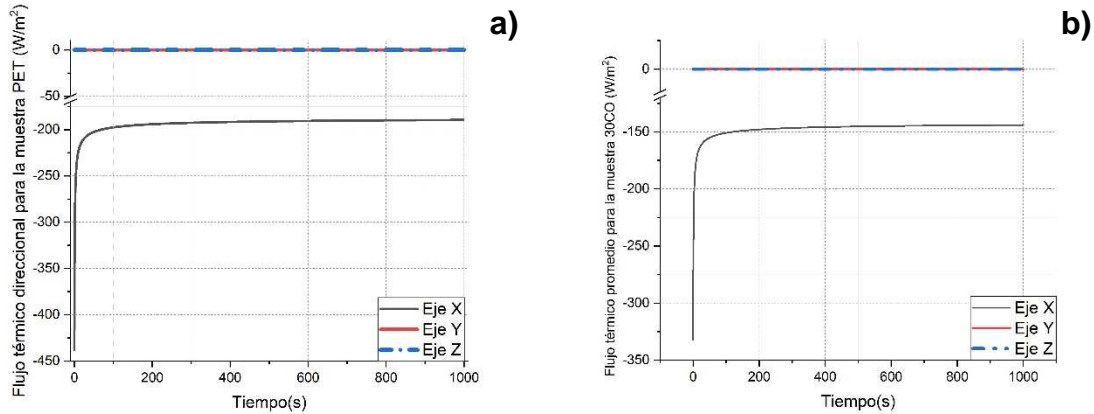


Figura 32. Comparación de las magnitudes de flujo térmico en las diferentes direcciones en función del tiempo, para a) Muestra PET y b) Muestra 30CO.

8.1.2.3 Determinación de la difusividad térmica para las muestras analizadas.

La difusividad térmica de los materiales está relacionada directamente con la inercia térmica o la velocidad con la cual se va difundir el calor a partir del material, esto va a depender de parámetros internos del mismo material, siendo así la razón de cambio entre el flujo de calor transferido y el flujo de calor acumulado en el volumen de estudio, por lo cual este parámetro se verá fluctuante en función de la transitividad térmica, los valores iniciales de la difusividad térmica en estado transitorio pueden ser calculados a partir de los datos térmicos de la **Tabla 7** y consolidados en la **Tabla 10** junto con la densidad volumétrica obtenida durante la simulación de los diferentes materiales simulados [101].

En este caso se observa cómo es de esperar, el valor de la difusividad térmica se ve afectada por la incorporación de las fibras, encontrado que de nuevo disminuye la difusividad conforme aumenta el volumen de las fibras añadidas. Lo cual también se ve causado por el considerable efecto de la densidad sobre esta propiedad, debido a que precisamente la densidad es un factor inversamente proporcional a las propiedades analizadas.

La **Tabla 10** también deja en evidencia que de nuevo la difusividad va a depender de la dirección de las fibras o lo que es lo mismo, tendremos valores distintos en función de los ejes, siendo como era de esperar mayor en la dirección del eje X, mientras los valores en las direcciones Y y Z se tiene el mismo valor de su magnitud, pero considerablemente menor.

Tabla 10. Resultados de la determinación de la difusividad térmica de los materiales simulados en estado estacionario.

Muestras	Densidad del material [kg/m ³]	Difusividad térmica [m ² /s]		
		Dx	Dy	Dz
0CO/PET	1300	1,07*10 ⁻⁷		
30CO	1690	8,31*10 ⁻⁸	7,26*10 ⁻⁸	7,26E ⁻⁸
40CO	1820	7,45*10 ⁻⁸	6,34*10 ⁻⁸	6,34*10 ⁻⁸
50CO	1950	6,62*10 ⁻⁸	5,51*10 ⁻⁸	5,51*10 ⁻⁸

Para terminar en la **Figura 33** muestra la representación gráfica del flujo relativo de calor en el tiempo (eje de las ordenadas) relacionado con el cambio de la temperatura en función del tiempo (gradiente de temperatura), esta segunda variable dispuesta en el eje "X" las cuales fueron registradas durante los análisis térmicos en estado transitorio. En la mencionada Figura se observa la relación lineal entre estas dos variables, resaltándose también que conforme se aumenta el porcentaje de fibras de coco natural, esta proporcionalidad directa se relaciona con el valor constante del valor de la conductividad térmica para estos rangos de temperatura [102].

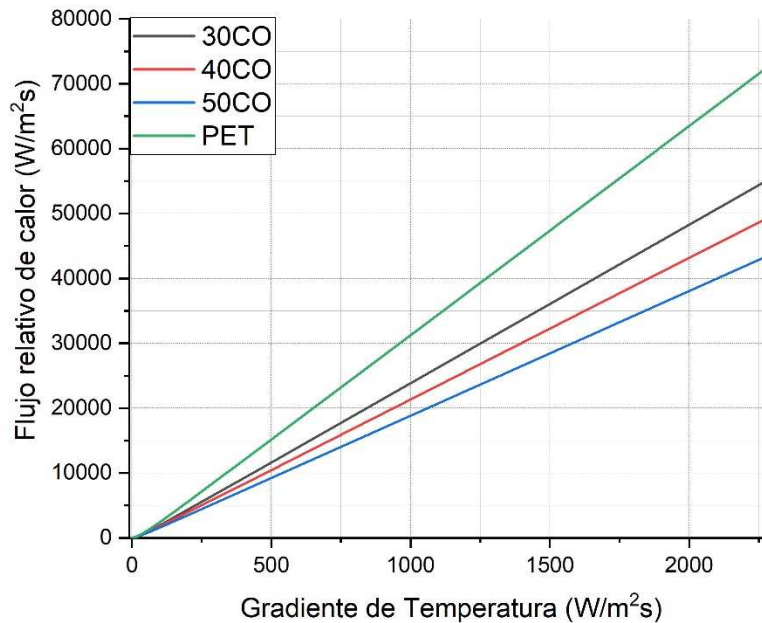


Figura 33. Representación gráfica del flujo relativo en función del gradiente de temperatura.

8.1.2.4 Compendio de los resultados mecánicos y térmicos obtenidos.

Es de resaltar que lo necesario para la selección de un tipo de material dependerá tanto de las propiedades mecánicas como térmicas, su propio rendimiento se verá afectado de una manera distinta y será la aplicación o los parámetros solicitados por la misma, lo que establecerá la viabilidad, así como la configuración composicional y distribución de las propias fibras en la matriz. Sin embargo, es de resaltar que el objetivo fundamental será modificar la densidad del material siendo esto natural en cada material compuesto [103], [104].

En el caso de las muestras de este trabajo los autores resaltan los siguientes afirmaciones sustentadas en las propiedades encontradas en los materiales, posterior a la simulación de la adición de tres porcentajes volumétricos de fibra en sistema compuesto, los cuales fueron 30, 40 y 50 % de manera respectiva y se resaltan los siguientes resultados: la muestra con 30% de fibras naturales de coco, los cuales presentan una mejora en resistencia mecánica y módulo elástico respecto a la matriz polimérica de PET sin añadir ningún refuerzo.

También se observa que se posee una disminución de la magnitud de la conductividad y difusividad térmica, siendo está pérdida de la magnitud inferior a las presentadas por las otras muestras, por lo cual la ventaja principal de la muestra de 30CO se centra en su utilización cuando se necesitan propiedades térmicas similares al PET, pero con un considerable aumento de las propiedades mecánicas. En el caso de la muestra de 50CO se encuentra de manera resaltante un aumento considerable de la resistencia mecánica del material acompañada de una pérdida de las propiedades térmicas, siendo entonces este material más adecuado cuando lo que se demande sea su marcada mejora en las propiedades mecánicas y un comportamiento más cercano a ser un material con características de aislante en diferentes tipos de estructuras, para lo cual se ha estudiado la utilidad del coco como refuerzo [27].

Finalmente, se destaca el material 40CO, siendo este en el que se evidencia el equilibrio entre la reducción de las propiedades térmicas y un aumento de las propiedades mecánicas lo cual podría permitir una versatilidad mayor al ser utilizado en diferentes aplicaciones [105].

9 Conclusiones

A partir del uso de herramientas de simulación y análisis de materiales presentes en el software ANSYS 2021R1 se puede realizar un estudio de diseño de materiales compuestos mediante los cuales será posible parametrizar las características únicas de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales en este caso de coco. El uso de estas aplicaciones permite genera un material con características adecuadas, valores cercanos a los que se consideran adecuados, así como establecimiento de fibras naturales distribución de las mismas, dimensiones volumétricas características reales como diámetros y longitudes de las mismas. Obteniendo valores reales y considerados lógicos según lo establecido por la literatura.

Se logró relacionar adecuadamente las características físicas y mecánicas de los diferentes materiales simulados, encontrando que se obtienen valores tanto de módulos cortantes de mayor valor para las muestras que presentaban un porcentaje volumétrico de fibras de vidrio más elevadas, cabe resaltar que la muestra con 50% de volumen de fibra presentó los valores más altos y seguido a su vez de las muestras con 30 y 40% de fibras en volumen. Respecto a los valores más altos de resistencia mecánica se obtuvieron con las muestras de 50% de fibras a la vez que los menores valores de deformación plástica, demostrando esto que la incorporación de fibras naturales de coco aumenta el esfuerzo o resistencia mecánica a la tracción y disminuye la deformación presentada por el volumen simulado, conforme a lo observado por la teoría.

Mediante análisis térmicos fue posible determinar el efecto decreciente que genera la incorporación de las fibras naturales sobre la conductividad y difusividad térmica, permitiendo que el flujo presente en el interior del material sea reducido tanto en los estados transitorios como en análisis estacionarios. Para terminar, se resalta que la pérdida del flujo térmico que se le atribuye a la muestra con 50% en volumen de fibras, por lo cual es necesario considerar una selección de equilibrio entre las propiedades mecánicas y térmicas. También, esto nos permite obtener una gama de materiales con diferentes características, así como un rango más variado en este tipo de materiales. La muestra con 30% en volumen fue la que presentó la menor reducción de propiedades térmicas respecto a la muestra si incremento de las fibras.

10 Recomendaciones

Esta investigación permitió ver el efecto de la adicción de las fibras naturales de coco sobre propiedades mecánicas y térmicas, para un rango específico de mezclas, sin embargo, en mucho caso sería necesario contrastar estos resultados con experimentación real debido a la presencia de defectos como burbujas e inclusiones que no son tan simples de simular en la vida real.

Adicionalmente, puede ser necesario ampliar los rangos de porcentajes volumétricos de las fibras de coco y comparar estos resultados con experimentación real.

Se debe tener en cuenta la no continuidad/ discontinuada de las fibras y los posibles cortes en dichos refuerzos, debido a que esto modifica los valores de las propiedades mecánicas y térmicas del material compuesto.

Otro factor para tener en cuenta que en este caso no se consideró el efecto del tratamiento de limpieza, maduración y preparación de las fibras de coco por lo cual es necesario tener en cuenta para futuras investigaciones.

Considerar el efecto de la degradación térmica sobre la presencia de las fibras de coco, principalmente cuando se consideran temperaturas elevadas, al igual que determinar estas características, empleando pruebas como es el caso de análisis térmico diferencial.

11 REFERENCIAS

- [1] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*, vol. 15, no. 5. 2000. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426910008913020>
- [2] R. Villanueva and M. Yupa, "Análisis estructural y nodal de la hélice de un aerogenerador de 3kW de potencia mediante simulación numérica computacional," *Pontificia Universidad Católica Del Ecuador*, vol. 96, pp. 179–200, 2013, [Online]. Available: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6097/ACOSTA_CARLOS_DISEÑO_MAQUINA_REBANADORA.pdf?sequence=1
- [3] J. H. Song, "Pairing effect and tensile properties of laminated high-performance hybrid composites prepared using carbon/glass and carbon/aramid fibers," *Compos B Eng*, vol. 79, pp. 61–66, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.04.015.
- [4] A. C. Rencher, *Methods of Multivariate Analysis, Second Edition*, vol. 37. 2012. doi: 10.1080/07408170500232784.
- [5] T. Nilsson and S. Technology, "MODELLING OF NATURAL FIBRES FOR COMPOSITE MATERIALS Structural Mechanics," no. October, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.3003.2081.
- [6] H. Pingulkar, A. Mache, Y. Munde, and I. Siva, "Materials Today : Proceedings A comprehensive review on drop weight impact characteristics of bast natural fiber reinforced polymer composites," *Mater Today Proc*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.925.
- [7] H. G. Kotik, "Fibras naturales y compuestos reforzados con fibras naturales: la motivación para su investigación y desarrollo," *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 24, no. 3, pp. 15–17, 2019, [Online]. Available: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762019000300200&tIng=pt
- [8] J. D. T. TABORDA, "PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MATRIZ DE POLIÉSTER REFORZADA CON FIBRA DE COCO COMPARADAS CON LA MISMA MATRIZ REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO," UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2014.
- [9] J. J. Locane, "Fundamentos de Fibras," *Miradas locales en tiempos globales*, pp. 23–96, 2019, doi: 10.31819/9783954878840-003.
- [10] L. Riaño, J. F. Chailan, and Y. Joliff, "Evolution of effective mechanical and interphase properties during natural ageing of glass-fibre/epoxy composites using micromechanical approach," *Compos Struct*, vol. 258, no. November 2020, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113399.
- [11] S. M. Velásquez R., G. J. Pelaéz A., and D. H. Giraldo V., "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*, pp. 77–86, 2016.
- [12] Cs. Varga, N. Miskolczi, L. Bartha, and G. Lipóczi, "Improving the mechanical properties of glass-fibre-reinforced polyester composites by modification of

- fibre surface,” *Mater Des*, vol. 31, no. 1, pp. 185–193, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.06.034.
- [13] L. S. Sutherland and C. Guedes Soares, “Impact characterisation of low fibre-volume glass reinforced polyester circular laminated plates,” *Int J Impact Eng*, vol. 31, no. 1, pp. 1–23, 2005, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2003.11.006.
- [14] D. Dittenber and G. Hota, “Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 43, pp. 1419–1429, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.11.019.
- [15] L. B. Manfredi, E. S. Rodríguez, M. Wladyka-Przybylak, and A. Vázquez, “Thermal degradation and fire resistance of unsaturated polyester, modified acrylic resins and their composites with natural fibres,” *Polym Degrad Stab*, vol. 91, no. 2, pp. 255–261, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.05.003>.
- [16] K. K. C. Marc André Meyers, *Mechanical Behavior of Materials*. 2009.
- [17] V. v. Ganesh and N. Chawla, “Effect of particle orientation anisotropy on the tensile behavior of metal matrix composites: Experiments and microstructure-based simulation,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 391, no. 1–2, pp. 342–353, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.msea.2004.09.017.
- [18] M. Pahlavanpour, H. Moussaddy, E. Ghossein, P. Hubert, and M. Lévesque, “Prediction of elastic properties in polymer-clay nanocomposites: Analytical homogenization methods and 3D finite element modeling,” *Comput Mater Sci*, vol. 79, pp. 206–215, 2013, doi: 10.1016/j.commatsci.2013.06.029.
- [19] S. B. R. Devireddy and S. Biswas, “Effect of Fiber Geometry and Representative Volume Element on Elastic and Thermal Properties of Unidirectional Fiber-Reinforced Composites,” *J Compos*, vol. 2014, pp. 1–12, Nov. 2014, doi: 10.1155/2014/629175.
- [20] M. M. Aghdam and A. Dezhsetan, “Micromechanics based analysis of randomly distributed fiber reinforced composites using simplified unit cell model,” *Compos Struct*, vol. 71, no. 3–4, pp. 327–332, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.09.018.
- [21] I. Alfonso, V. Rodríguez-Iglesias, and I. A. Figueroa, “Potencialidades computacionales del Método de los elementos finitos para la modelación y simulación de materiales compuestos: Revisión,” *Revista Materia*, vol. 20, no. 2, pp. 293–303, Jul. 2015, doi: 10.1590/S1517-707620150002.0030.
- [22] V. Amigó, D. Salvador, O. Sahuquillo, R. Llorens, and F. Martí, “Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos”.
- [23] S. Betancourt, P. Gañán, A. Jiménez, and L. J. Cruz, “Degradación Térmica De Fibras Naturales Procedentes De La Calceta De Plátano (Estudio Cinético),” *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 1, no. 1, pp. 215–219, 2009.
- [24] P. Alvarado Aguilar, K. Quesada-Solís, R. Sibaja-Ballester, and J. Vega-Baudrit, “Utilización de las fibras del rastrojo de piña (Ananas comusus, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster,” *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 6, no. 2, p. 4, 2005.
- [25] J. Dávila *et al.*, *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales E Industriales*, no. December. 2011.

- [26] K. Villa, C. Echavarría, and D. Blessent, "Wood walls insulated with coconut fiber," *DYNA (Colombia)*, vol. 86, no. 210, pp. 333–337, 2019, doi: 10.15446/dyna.v86n210.73685.
- [27] M. F. MEZA VARGAS, "BIODEGRADABILIDAD DE POLIETILENO TEREFTALATO Y DE OXOPOLIETILENO, A NIVEL DE LABORATORIO, POR LA ACCIÓN DE BACTERIAS NATIVAS PRESENTES EN HUMUS DE LOMBRIZ, CABALLO Y GALLINA," 2013.
- [28] M. J. TERÁN SANTAMARÍA, "Estudio de la biodegradabilidad aeróbica de polietileno de alta densidad mediante compostaje con aditivos degradables," *Вестник Росздравнадзора*, vol. 4, pp. 9–15, 2017.
- [29] C. S. Álvarez Vega, "Evaluación físico-química y biológica de compostaje de residuos de rosas y polietileno de baja densidad (LDPE) agroindustrial Camila Salomé Álvarez Vega," 2019.
- [30] S. R. P. Ramírez and L. Q. Baldeón, "Aprovechamiento de tereftalato de polietileno (PET) reciclado y residuo aserrín de madera para el desarrollo de un compuesto plástico-madera," p. 174, 2019.
- [31] E. D. RAMÍREZ GALLO, "SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN COMPONENTE ELASTOMÉRICO DE UN SISTEMA TÉCNICO, USANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 77–86, 2016, doi: 10.1016/j.ccr.2020.213525.
- [32] A. Rodriguez, V. Jose, D. Daniel, M. Viviane, and Alves Lavinia, "Desarrollo de un material compuesto de fibras de henequén utilizando una matriz termofija Development of Composite with Henequen ´ s fibres and termofix matrix Métodos y Materiales," *Ingeniería Mecánica*, vol. 17, no. 3, pp. 264–272, 2014.
- [33] C. F. P. Samuel Herbert Maron, *Fundamentos de fisicoquímica*. Mexico, 1977.
- [34] A. O. CARDONA, "NARIÑO ES EL DEPARTAMENTO QUE LIDERA LA SIEMBRA, COSECHA Y PRODUCCIÓN DE COCO EN COLOMBIA," 2018. <https://www.agronegocios.co/agricultura/narino-es-el-departamento-que-lidera-la-siembra-cosecha-y-produccion-de-coco-en-colombia-2779573>
- [35] H. Dodiya and G. Venkatachalam, "Dynamic Analysis of Banana Fibre Reinforced Hybrid Polymer Matrix Composite Using ANSYS and Optimization of Design Parameters," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 852, pp. 3–9, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.852.3.
- [36] H. Lightfoot, T. Baines, and P. Smart, "The servitization of manufacturing: A systematic literature review of interdependent trends," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 33, Nov. 2013, doi: 10.1108/IJOPM-07-2010-0196.
- [37] B. K. Kandola, L. Krishnan, D. Deli, and J. R. Ebdon, "Blends of unsaturated polyester and phenolic resins for application as fire-resistant matrices in fibre-reinforced composites. Part 2: Effects of resin structure, compatibility and composition on fire performance," *Polym Degrad Stab*, vol. 113, pp. 154–167, 2015, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.11.002.
- [38] M. Ajithkumar, S. Balaji, and R. Deepak, "Simulation and Experimental Study of Fiber Reinforced Polymer," vol. 3, no. 3, pp. 343–353, 2018.

- [39] E. Diniardi, K. H. Mahmud, H. Basri, and A. I. Ramadhan, "Analysis of the Tensile Strength of Composite Material from Fiber Bags," *Journal of Applied Science and Advanced Technology Journal Homepage*, 2019, doi: 10.24853/JASAT.2.2.39-48.
- [40] E. J. HEARN, "SIMPLE STRESS AND STRAIN," *Mechanics of Materials 1*, pp. 1–26, Jan. 1997, doi: 10.1016/B978-075063265-2/50002-5.
- [41] J. B. Donnet, O. P. Bahl, R. C. Bansal, and T. K. Wang, "Carbon Fibers," *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, pp. 431–455, Jan. 2003, doi: 10.1016/B0-12-227410-5/00082-X.
- [42] D. R. H. Jones and M. F. Ashby, "Elastic Moduli," *Engineering Materials 1*, pp. 31–47, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-08-102051-7.00003-8.
- [43] I. Baran, K. Cinar, N. Ersoy, R. Akkerman, and J. H. Hattel, "A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 365–395, 2017, doi: 10.1007/s11831-016-9167-2.
- [44] A. Rodríguez, "Simulación mediante el método de los elementos finitos de una estructura metálica," pp. 24–27, 2010.
- [45] E. F. Valero, "APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS," 2004.
- [46] J. A. Cedillo Sarmiento and J. P. Marin Lazo, "Estudio Experimental Y Computacional Mediante Cfd Ansys Del Flujo De Aire a Traves De Techos De Edificaciones Usando Un Tunel De Viento," p. 350, 2015.
- [47] Y. L. Bai, Z. W. Yan, T. Ozbakkaloglu, Q. Han, J. G. Dai, and D. J. Zhu, "Quasi-static and dynamic tensile properties of large-rupture-strain (LRS) polyethylene terephthalate fiber bundle," *Constr Build Mater*, vol. 232, p. 117241, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117241.
- [48] R. Hechavarría Díaz *et al.*, "Cálculo numérico de las propiedades térmicas efectivas de un compuesto por elementos finitos," *Mater Today Proc*, vol. 259, no. xxxx, p. 113496, 2021, doi: 10.17163/ings.n18.2017.02.
- [49] "Overview of materials for Low Density Polyethylene (LDPE), Extrusion Grade."
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8e92b9e66e214e1b8fc8222dbff6d480> (accessed Nov. 13, 2014).
- [50] Mi. Vargas Añorve, S. Sánchez Tizapa, and A. Morales Lozano, "Evaluación De La Densidad De La Fibra De Coco," no. November, p. 6, 2019, [Online]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/337335094_EVALUACION_DE_LA_DENSIDAD_DE_LA_FIBRA_DE_COCO
- [51] A. J. Escudero and J. C. Aristizabal, "CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE FIBRAS DE COCO COMO REFUERZO DE MATERIALES COMPUESTOS POLIMÉRICOS."
- [52] M. Kumar Saini, A. Kumar Bagha, S. Kumar, and S. Bahl, "Finite element analysis for predicting the vibration characteristics of natural fiber reinforced epoxy composites," *Mater Today Proc*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.717.

- [53] M. Schneider, "The sequential addition and migration method to generate representative volume elements for the homogenization of short fiber reinforced plastics," *Comput Mech*, vol. 59, Feb. 2017, doi: 10.1007/s00466-016-1350-7.
- [54] J. Zhou, L. Qi, and A. M. Gokhale, "Generation of Three-Dimensional Microstructure Model for Discontinuously Reinforced Composite by Modified Random Sequential Absorption Method," *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, vol. 138, no. 2, 2016, doi: 10.1115/1.4032152.
- [55] H. Hasselbruch, A. Von Hehl, and H. W. Zoch, "Properties and failure behavior of hybrid wire mesh/carbon fiber reinforced thermoplastic composites under quasi-static tensile load," *Mater Des*, vol. 66, no. PB, pp. 429–436, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.032.
- [56] "Predicting the strength of composite materials using Ansys Software and Multiscale.Sim -Applicable from material design to product design: CYBERNET."
<https://www.cybernet.co.jp/ansys/product/lineup/multiscale/en/case/analysis/230.html> (accessed Oct. 13, 2021).
- [57] G. M. Odegard, "Computational multiscale modeling - Nanoscale to macroscale," in *Comprehensive Composite Materials II*, Elsevier, 2017, pp. 28–51. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.10021-9.
- [58] E. I. Kurkin and V. O. Sadykova, "Application of Short Fiber Reinforced Composite Materials Multilevel Model for Design of Ultra-light Aerospace Structures," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 185, pp. 182–189. doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.336.
- [59] "ASTM D3039 / D3039M - 17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials." <https://www.astm.org/Standards/D3039> (accessed Oct. 12, 2021).
- [60] "ASTM D638-14 Método de prueba estándar para determinar las propiedades de tracción de los plásticos." <https://www.astm.org/Standards/D638-ES-CL.htm> (accessed Oct. 12, 2021).
- [61] S. Bard, F. SchönI, M. Demleitner, and V. Altstädt, "Influence of fiber volume content on thermal conductivity in transverse and fiber direction of carbon fiber-reinforced epoxy laminates," *Materials*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071084.
- [62] R. Rolfes, "TRANSVERSE THERMAL CONDUCTIVITY OF CFRP LAMINATES: A NUMERICAL AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF APPROXIMATION FORMULAE."
- [63] M. W. Pilling, B. Yates, M. A. Black, and P. T. Rsall, "The thermal conductivity of carbon fibre-reinforced composites," 1979.
- [64] D. Zhang *et al.*, "Favorable combination of foldability and toughness of transparent cellulose nanofibril films by a PET fiber-reinforced strategy," *Int J Biol Macromol*, vol. 164, pp. 3268–3274, 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.08.196.
- [65] R. Hechavarría Díaz, G. López, F. Pazmiño, M. Ureña, and A. Hidalgo, "Cálculo numérico de las propiedades térmicas efectivas de un compuesto por

- elementos finitos,” *Ingenius*, no. 18, p. 14, Jul. 2017, doi: 10.17163/ings.n18.2017.02.
- [66] A. Belén Paricaguán* and J. P. R. T. N. C. J. I. M. A. Carmen Albanob, “Degradación térmica de fibras de coco con tratamiento químico provenientes de mezclas de concreto (estudio cinético).,” 2013.
- [67] Olena Leonidivna Naidiuk and Paúl Torres Jara, *Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys*. 2018.
- [68] H. W. Wang, H. W. Zhou, L. L. Gui, H. W. Ji, and X. C. Zhang, “Analysis of effect of fiber orientation on Young’s modulus for unidirectional fiber reinforced composites,” *Compos B Eng*, vol. 56, pp. 733–739, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.09.020.
- [69] M. Guu, “Correlation of composite material test results with finite element analysis,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Sep. 2016, vol. 147, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/147/1/012004.
- [70] S. Zhao, Z. Zhao, Z. Yang, L. L. Ke, S. Kitipornchai, and J. Yang, “Functionally graded graphene reinforced composite structures: A review,” *Engineering Structures*, vol. 210. Elsevier Ltd, May 01, 2020. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110339.
- [71] FABIÁN RODRIGO VELANDIA HERRERA, “ESTIMACIÓN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD EN MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA Y FIBRAS NATURALES CORTAS,” Bogotá D.C., 2008.
- [72] A. v Alfonso-Alvarez, F. I. Rolando Valenzuela-Diaz, and E. v Gonçalves Francisco Jesús Mondelo-García III, “Characterization of the Composite Interface of Thermoset Polymeric Matrix Reinforced with Cuban Henequen Fibers Caracterización de la interface de material compuesto de matriz polimérica termofija reforzada con fibras de henequén cubano.”
- [73] M. A. Pérez and M. Sánchez, “Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos,” in *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*, OmniaScience, 2014, pp. 19–50. doi: 10.3926/oms.200.
- [74] G. Y. Moreno *et al.*, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA BÁSICA DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS DE TRACCIÓN Y TORSIÓN,” 2006.
- [75] X. L. Chen and Y. J. Liu, “An advanced 3D boundary element method for characterizations of composite materials,” *Eng Anal Bound Elem*, vol. 29, no. 6, pp. 513–523, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.enganabound.2004.12.013.
- [76] M. K. Thompson and J. M. Thompson, “Meshing,” in *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*, Elsevier, 2017, pp. 181–199. doi: 10.1016/b978-0-12-812981-4.00006-x.
- [77] K. Bakir, D. Aydemir, and T. Bardak, “Dimensional stability and deformation analysis under mechanical loading of recycled PET-wood laminated composites with digital image correlation,” *J Clean Prod*, vol. 280, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124472.
- [78] KAMRAN TAVAKOLDAVANI, “COMPOSITE MATERIALS EQUIVALENT PROPERTIES,” Texas, 2014.

- [79] R. Várdai *et al.*, “Comparative study of fiber reinforced PP composites: Effect of fiber type, coupling and failure mechanisms,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 133, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105895.
- [80] “Esfuerzo equivalente de Von Mises. | David Hernáez, apuntes ITI.” <https://dhernaez73.wordpress.com/2015/06/24/calculo-de-maquinas-esfuerzo-equivalente-de-von-mises/> (accessed Nov. 07, 2021).
- [81] M. Katouzian, S. Vlase, M. L. Scutaru, A. Gloria, and R. de Santis, “Finite Element Method-Based Simulation Creep Behavior of Viscoelastic Carbon-Fiber Composite,” 2021, doi: 10.3390/polym.
- [82] J. Naveen, M. Jawaid, A. Vasanathan, and M. Chandrasekar, *Finite element analysis of natural fiber-reinforced polymer composites*. Elsevier, 2018. doi: 10.1016/B978-0-08-102289-4.00009-6.
- [83] YVES ÁNGEL DÁVILA MONTAÑO, “DESARROLLO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ TERMOPLÁSTICA,” Master Thesis, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, Mexico D.F., 2010.
- [84] A. E. S. and more Topics related to LS-DYNA, “What could the causes of an extremely large energy error be?,” <https://forum.ansys.com/discussion/24564/what-could-the-causes-of-an-extremely-large-energy-error-be>, 2021.
- [85] Chris LeBoeuf, “Ansys Explicit Dynamics Takes Over When Implicit Isn’t Enough.”
- [86] S. Nishijima, T. Okada, and K. [Osaka Univ. Niihara Ibaraki (Japan). Inst. of Scientific and Industrial Research], “Design of ceramics with warm feeling,” 1999, doi: <https://doi.org/>.
- [87] N. J. Rodríguez *et al.*, “Assessment of coconut fibre insulation characteristics and its use to modulate temperatures in concrete slabs with the aid of a finite element methodology,” *Energy Build*, vol. 43, no. 6, pp. 1264–1272, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.01.005.
- [88] A. Demain, J.-P. Issi, P. Croix, and D. Sud, “The Effect of Fiber Concentration on the Thermal Conductivity of a Polycarbonate/Pitch-Based Carbon Fiber Composite.”
- [89] A. Yamanaka and T. Takao, “Thermal Conductivity of High-Strength Polyethylene Fiber and Applications for Cryogenic Use,” *ISRN Materials Science*, vol. 2011, pp. 1–10, Oct. 2011, doi: 10.5402/2011/718761.
- [90] L. Mohammed, M. N. M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, “A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications,” *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015. Hindawi Limited, 2015. doi: 10.1155/2015/243947.
- [91] Y. Mu, A. Chen, G. Zhao, Y. Cui, J. Feng, and F. Ren, “Prediction for the mechanical property of short fiber-reinforced polymer composites through process modeling method,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 32, no. 11, pp. 1525–1546, 2019, doi: 10.1177/0892705718799815.
- [92] S. S. Kim, H. Murayama, K. Kageyama, K. Uzawa, and M. Kanai, “Study on the curing process for carbon/epoxy composites to reduce thermal residual stress,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 43, no. 8, pp. 1197–1202, 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.02.023.

- [93] S. Bard, F. Schönl, M. Demleitner, and V. Altstädt, "Influence of fiber volume content on thermal conductivity in transverse and fiber direction of carbon fiber-reinforced epoxy laminates," *Materials*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071084.
- [94] G. B. R. R. y J. R. Guadalupe Huelsz, "Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación," *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, vol. IX.
- [95] JHON WILLIAM RAMÍREZ COLORADO and RICARDO TRIANA ARROYAVE, "CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO MATRIZ TERMOESTABLE REFORZADO CON FIBRA DE GUADUA," Bogotá.
- [96] Alex Grishin, "Heat Transfer and Multiphysics Analysis," 2011. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Orthotropic_material
- [97] Olena Leonidivna Naidiuk and Paúl Bolívar Torres, "Introducción al análisis térmico y fluidos mediante Ansys," Primera Edición., Universidad Politécnica Salesiana, Ed. Editorial Universitaria Aby-Yala.
- [98] N. Sateesh, V. Rajesh, P. M. V. Rao, K. Satyanarayana, and B. Mahesh Babu, "Thermal analysis of carbon composites subjected to various atmospheric conditions," in *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 5768–5773. doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.173.
- [99] J. Benesty, J. Chen, Y. Huang, and I. Cohen, "Pearson correlation coefficient," in *Springer Topics in Signal Processing*, vol. 2, Springer Science and Business Media B.V., 2009, pp. 1–4. doi: 10.1007/978-3-642-00296-0_5.
- [100] B. Mutnuri, "Thermal conductivity characterization of composite materials," Morgantown, West Virginia, 2006. [Online]. Available: <https://researchrepository.wvu.edu/etd>
- [101] J. Felipe and C. Landinez, "Comportamiento de la Difusividad Térmica del Polietileno de Alta Densidad (HDPE) con Adición de Pigmentos."
- [102] D. Zhu, W. Yu, H. Du, L. Chen, Y. Li, and H. Xie, "Thermal Conductivity of Composite Materials Containing Copper Nanowires," *J Nanomater*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/3089716.
- [103] S. J. Park and M. K. Seo, *Modeling of Fiber-Matrix Interface in Composite Materials*, vol. 18. 2011. doi: 10.1016/B978-0-12-375049-5.00009-8.
- [104] M. Kotani, A. Kohyama, Y. Katoh, T. Inoue, K. Okamura, and H. Serizawa, "HIGH-STRENGTH SIC MATRIX PRODUCTION WITH POLYMERIC TECHNIQUES."
- [105] M. R. Sanjay, G. R. Arpitha, L. L. Naik, K. Gopalakrishna, and B. Yogesha, "Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview," *Natural Resources*, vol. 07, no. 03, pp. 108–114, 2016, doi: 10.4236/nr.2016.73011.