

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA DE UN BIOCOMPOSITO REFORZADO
CON FIBRAS DE *Guadua angustifolia* PARA LA FABRICACIÓN DE
UNA FÉRULA PARA EL TRATAMIENTO DEL SÍNDROME DEL TÚNEL
CARIANO EN ETAPA INTERMEDIA

PAULA ALEJANDRA LUGO CUESTAS
CRISTHIAN CAMILO NOSSA LÓPEZ

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
BIOINGENIERÍA
BOGOTA D.C.
2019

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA DE UN BIOCOSMPOSITO REFORZADO
CON FIBRAS DE *Guadua angustifolia* PARA LA FABRICACIÓN DE
UNA FÉRULA PARA EL TRATAMIENTO DEL SÍNDROME DEL TÚNEL
CARIPIANO EN ETAPA INTERMEDIA

PAULA ALEJANDRA LUGO CUESTAS
CRISTHIAN CAMILO NOSSA LÓPEZ

Trabajo de grado para optar por el título de bioingenieros

Tutor académico: José Francisco Ibla Gordillo

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
BIOINGENIERÍA
BOGOTA D.C.
2019

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma de jurado

Firma de jurado

Dedicatoria

Este trabajo se realizó en honor a las personas que han sufrido algún tipo de lesión y que requieren tratamientos haciendo uso de órtesis y prótesis, y que por ello han tenido que invertir altas sumas de dinero debido a los costos de producción influenciados por los materiales que se utilizan en la fabricación de los diferentes dispositivos para su rehabilitación.

A la fundación CIREC (Centro Integral de Rehabilitación de Colombia), que con su trabajo ha intervenido en la rehabilitación de miles de personas durante más de 15 años, gracias a su equipo de profesionales en el área de la salud e ingeniería de rehabilitación clínica, dando apoyo también a soldados heridos en combate en nuestra nación.

CONTENIDO

GLOSARIO	7
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. MARCO REFERENCIAL	17
4.1 ANTECEDENTES	17
4.2 CONCEPTOS DE MECÁNICA	18
4.3 TEJIDOS	19
4.4 ARTICULACIÓN	20
4.5 BIOMECÁNICA DE LA MUÑECA	20
4.6 SÍNDROME DEL TÚNEL CARPIANO	24
4.7 ORTESIS	26
4.8 MATERIAL COMPUESTO	29
4.9 MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS NATURALES	29
4.10 FIBRA DE BAMBÚ (<i>Guadua angustifolia</i>)	30
4.11 PROCESO DE INYECCIÓN DE RESINA ASISTIDO POR VACÍO (RTM LIGHT)	31
4.12 ANÁLISIS MECÁNICO DE MATERIALES	33
4.13 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)	36
4.14 MÉTODO DE ANÁLISIS NUMÉRICO	38
4.15 ANÁLISIS CICLO DE VIDA (ACV)	41
4.16 ESTUDIO DE VIABILIDAD (BUSINESS SCHOOL, 2016)	43
5. METODOLOGÍA	45
5.1 OBTENCIÓN DEL MATERIAL	45
5.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	46
5.3 ANÁLISIS DE MEB	50
5.4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS (AEF)	51
5.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	54
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
6.1 FABRICACIÓN DEL MATERIAL	56

6.2 ENSAYOS MECÁNICOS	57
6.4 ANÁLISIS DE MEB	61
6.3 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS	67
6.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	81
6. CRONOGRAMA	91
7. PRESUPUESTO	92
9. CONCLUSIONES	89
10. RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	93

GLOSARIO

ABDUCCIÓN: Movimiento que tira de una estructura o parte del cuerpo alejándose de la línea media del cuerpo (salud, 2018).

ADUCCIÓN: Movimiento que mueve una parte del cuerpo hacia la línea media del cuerpo (salud A, 2018).

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV): Proceso que permite la visión global del ciclo de vida de un producto o proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas, mediante la identificación y cuantificación del uso de materia y energía para determinar el impacto de los recursos y las emisiones en el ambiente (ISM, 2014).

BIOCOMPOSITO: O biocompuesto, es un material formado por una matriz (resina) y un refuerzo de fibras naturales (generalmente derivadas de plantas o celulosa) (Terms, 2018).

CIZALLAMIENTO: Deformación lateral que se produce por una fuerza externa. También llamado corte, cortadura (Parró, 2018).

DENSIDAD: Relación que se establece entre la masa y el volumen de una sustancia o cuerpo (ABC, 2018).

ERGONOMÍA: Conjunto de conocimientos científicos aplicados para que el trabajo, los sistemas, productos y ambientes se adapten a las capacidades y limitaciones físicas y mentales de las personas (ergonomía, 2018).

FIBRA VEGETAL: Filamento de origen natural (diccionario, 2018).

FIQUE: Nombre común de planta textil que corresponde en su denominación taxonómica a la clase de los monocotiledóneas, con hoja radical, piramidal, acanalado, verde oscuro y la fibra vegetal se usa para elaborar cabuyas o sogas (etimología, 2018).

FLEXIÓN: Tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal (Parró, 2018).

LINO: Es una planta de varios usos: el tallo se utiliza para fabricar tela, las semillas y su aceite tienen usos dietéticos. (salud E, 2018).

MATRIZ: Resina encargada de transmitir esfuerzos, proteger y dar cohesión al material utilizado (Naval, 2017).

ÓRTESIS: Es un apoyo u otro dispositivo externo aplicado al cuerpo para modificar los aspectos funcionales o estructurales del sistema neuromusculoesquelético (APTOCA, 2018).

ORTOPEDIA: Disciplina que forma parte de la medicina cuyo objetivo es corregir y evitar deformidades o irregularidades en el sistema traumatológico del cuerpo humano a través de varios sistemas como cirugía específica, rehabilitación y ejercicios, además de productos ortopédicos diversos también conocidos como ortesis o prótesis (Ortopedia1, 2018).

PATOLOGÍA: Enfermedad física o mental que padece una persona (Medline, 2016).

POLÍMERO: Macromolécula que se encuentra conformada por uno o varios monómeros, que a lo largo de una cadena se pueden repetir. Los polímeros se caracterizan por poseer una masa molecular elevada y se origina a partir del proceso de la polimerización (Definiciones, 2018).

PRÓTESIS: Dispositivo diseñado para reemplazar una parte faltante del cuerpo o para hacer que una parte del cuerpo trabaje mejor (Medlineplus, 2018).

REHABILITACIÓN: Proceso global y continuo de duración limitada y con objetivos definidos, encaminados a promover y lograr niveles óptimos de independencia física y las habilidades funcionales de las personas (Tápanes, 2018).

REHABILITACIÓN OCUPACIONAL: Según la definición de la Organización Mundial de la Salud (OMS), “es el conjunto de técnicas, métodos y actuaciones que, a través de actividades aplicadas con fines terapéuticos, previene y mantiene la salud, favorece la restauración de la función, suple los déficit invalidantes y valora los supuestos comportamentales y su significación profunda para conseguir la mayor independencia y reinserción posible del individuo en todos sus aspectos: laboral, mental, físico y social” (Vithas, 2018).

RESINA EPOXICA: Resina sintética termoestable, de gran tenacidad, resistente a los agentes químicos y de gran poder adherente, empleada en la fabricación de revestimientos (Parró, 2018).

SÍNDROME: Grupo de signos y síntomas que se presentan juntos y caracterizan una anomalía o condición particular (salud P., 2018).

SOSTENIBILIDAD: Característica o estado según el cual pueden satisfacerse las necesidades de la población actual y local sin comprometer la capacidad de generaciones futuras o de poblaciones de otras regiones de satisfacer sus necesidades (Facts, 2018).

TRACCIÓN: Acción de las fuerzas que mantienen un cuerpo estirado al tirar de sus extremos, de la que resulta un elongamiento del mismo. También llamado tensión (Parró, 2018).

USABILIDAD: Es la medida de la calidad de la experiencia que tiene un usuario cuando interactúa con un producto o sistema. Esto se mide a través del estudio de la relación que se produce entre las herramientas y quienes las utilizan, para determinar la eficiencia en el uso de los diferentes elementos ofrecidos por el producto y la efectividad en el cumplimiento de las tareas que se pueden llevar a cabo a través de él (Digital, 2018).

YUTE: Material textil que se saca de la corteza interior de varias especies de plantas del género corchorus (Definiciones, 2018).

RESUMEN

CIREC (Centro Integral de Rehabilitación de Colombia) busca facilitar la rehabilitación de pacientes con síndrome del túnel carpiano haciendo que la producción de sus férulas sea más económica con ayuda de materiales novedosos que, además de su economía aporten al desarrollo de producción sostenible en el país. Esto gracias a estudios enfocados en los biocompositos fabricados con fibras naturales y matriz epóxica a partir de técnicas de vacío que faciliten la impregnación del material (resina en fibra), donde su tiempo de degradación sea menor en comparación con otros materiales usados comúnmente a partir de polímeros petroquímicos. Se analizó la viabilidad técnica para comprobar la usabilidad de un biocomposito reforzado con fibra de *Guadua angustifolia* en prótesis de antebrazo; se hicieron ensayos mecánicos de flexión y tracción en el cual se evidenció que el comportamiento mecánico del biocomposito se debe a la combinación de los materiales donde la resina con un 20% de la masa total aporta rigidez y unión a las fibras (80% de la masa) que disminuyen la densidad y aumentan la deformación antes de perturbar el material; paso a seguir se hizo un análisis físico y morfológico con MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) y se verificó la afinidad entre la matriz y la fibra gracias a la técnica de fabricación. Posteriormente, con el AEF (Análisis de Elementos Finitos) se buscó conocer la resistencia del material al aplicar los vectores de flexión, aducción y abducción de la muñeca sobre la férula, y, por último, el análisis de ciclo de vida del material para conocer el impacto ambiental en la etapa de transformación del Polipropileno como material comúnmente usado en férulas de tratamiento de Síndrome del túnel carpiano y el biocomposito. Para con estos resultados establecer la viabilidad del biocomposito para ser usado en férulas para el tratamiento del síndrome del túnel carpiano como positiva.

BIOCOMPOSITO, ÓRTESIS, TÚNEL CARPIANO.

INTRODUCCIÓN

El síndrome de túnel carpiano es una patología que se presenta en su mayoría en las personas que durante sus actividades laborales ejercen movimientos repetitivos con las manos, el diagnóstico se debe a una inflamación en los tendones de la muñeca, una de las opciones para su tratamiento es el uso de una férula en el antebrazo. CIREC (Centro Integral de Rehabilitación de Colombia) es una fundación sin ánimo de lucro que trabaja a favor de la medicina reconstructiva, especialmente en la rehabilitación física de las personas, cuenta con un gran equipo de trabajo que se esfuerza por la atención integral de los pacientes, con este fin realiza investigaciones sobre los materiales y procedimientos de producción que busquen reducir los costos. Por su enfoque sostenible, CIREC se ha interesado por los materiales de origen natural y sostenible que cumplan con cada uno de los requerimientos como fabricantes de prótesis y órtesis, que como fundación buscan ayudar de manera física y económica haciéndose cargo de la rehabilitación y del pago de ciertos porcentajes a pacientes de escasos recursos económicos.

Una asociación entre investigadores de la Universidad del País Vasco (País Vasco, España), la Universidad de Pamplona (Norte de Santander, Colombia) y la Universidad El Bosque (Bogotá D.C., Colombia) se han propuesto realizar un estudio del comportamiento mecánico de diferentes biocompositos con el fin de aportar a los intereses de CIREC, la fundación busca anexar a sus estudios las posibles aplicaciones de biocompositos reforzados con fibra de *Guadua angustifolia* como solución a un problema específico, en este caso se decidió que la mejor alternativa es aplicarlo en el tratamiento del síndrome del túnel carpiano.

Con el fin de tener un aporte significativo a los estudios que este grupo de investigadores realiza, el presente estudio incluye diferentes ensayos y análisis que se le pueden realizar a un material con el fin de determinar sus propiedades mecánicas para lo cual se utilizó una máquina de ensayos universal, un microscopio electrónico de barrido y un software para el estudio de AEF (Análisis de Elementos Finitos) con lo que se busca complementar el estudio permitiendo conocer el comportamiento mecánico del material; además de conocer su condición frente a un contexto ambiental en la etapa de transformación haciendo uso del análisis de ciclo de vida. Con esto se valorará la viabilidad que tiene el material en la fabricación de una férula para el antebrazo en posición funcional de la mano para el tratamiento del síndrome del túnel carpiano.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los materiales que se utilizan comúnmente en la fabricación de prótesis y órtesis suelen contener matrices poliméricas de origen sintético y petroquímico que se manipulan con el fin de lograr las propiedades mecánicas ideales de acuerdo a la necesidad; según la Contraloría General de la Nación, en 4 años Colombia dejará de contar con el recurso del petróleo, pues el consumo que se le da hoy en día no es sostenible, lo que conduce a la búsqueda de otros materiales que reemplacen el uso del petróleo (Colprensa,2017). En el mundo de la rehabilitación ortopédica, se cuenta con una diversidad de materiales que buscan cumplir necesidades específicas en cuanto a producción y uso del cliente final; en general, para la producción se tiene en cuenta la usabilidad, economía, bajo riesgo de obtención y manejo, facilidad y rapidez de adquirir su materia prima; por otro lado, el usuario del producto final requiere principalmente ergonomía, asepsia y comodidad, entre otros. Por esto los fabricantes de órtesis y prótesis se han dedicado a producir y realizar investigación y desarrollo científico alrededor de cumplir cada una de las necesidades propuestas a partir del aprovechamiento de diferentes fuentes de materia prima, en especial el petróleo que suele ser contaminante en todos sus procesos de manipulación. CIREC en su propósito de fabricar de forma sostenible sin dejar de lado la calidad de sus productos, busca centrar sus investigaciones en biocompositos reforzados con fibras vegetales que cumplan con propiedades físicas y mecánicas específicas para la fabricación de férulas para el tratamiento del síndrome del túnel carpiano.

Para el 2013 en Colombia, el 1,5% de los desórdenes musculoesqueléticos relacionados con actividades laborales se presentan en las personas que flexionan repetidamente la articulación de la muñeca (Palencia, García & Riaño, 2013), de tal forma que pueden llegar a padecer síndrome del túnel carpiano (Baker, 2002). Esta patología generó un costo asistencial de \$38'549.402 en el 2004 con 169 casos registrados, es decir que el valor medio por caso es de \$228.103, cabe destacar que, entre los costos mencionados anteriormente, no se tienen en cuenta los gastos indirectos por contratación de personal de reemplazo y los casos no registrados. Como tratamiento a esta patología se encuentran antiinflamatorios, férula dorsal que abarque mano y antebrazo para la inmovilización parcial o completa de la articulación (Benjamín, 2015), rehabilitación ocupacional y en el peor de los casos cirugía (Amillo, 2015).

Las variables que se deben tener en cuenta para la evaluación de la viabilidad de un compuesto son: la resistencia a las diferentes fuerzas que se le van a aplicar, la adherencia y morfología de la microestructura matriz-refuerzo, además de las características físico-mecánicas que se deben tener en cuenta en la aplicación en una prótesis u órtesis (Guía Ortopedia, 2011) y la carga ambiental asociada a la transformación del material.

2. JUSTIFICACIÓN

El síndrome del túnel carpiano es una molestia que se debe a una serie de movimientos repetitivos generalmente laborales de la muñeca que generan inflamación del túnel carpiano; el tratamiento de esta patología depende de la etapa en que se encuentre, para la etapa intermedia el tratamiento más común es la inmovilización parcial de la articulación con ayuda de una férula la cual mantenga la mano en una posición funcional, pues al mantener la muñeca en una posición funcional se maximiza el espacio del túnel carpiano y minimiza la compresión del nervio medio, proporcionando alivio en el paciente; estudios demuestran que el uso de férulas para pacientes con síndrome del túnel carpiano en etapa intermedia y temprana es la mejor solución, alivian el dolor al 67% de la población, su uso puede tener una duración máxima de 12 meses y es un tratamiento no invasivo (Armenteros, 2000).

Las férulas son principalmente fabricadas con polímeros termoestables, pues una de las principales condiciones en la producción de los plásticos es la hidrofobicidad, esta condición es una ventaja para los polímeros de alta densidad, pero otorga a las fibras naturales una gran desventaja debido a la capacidad de absorción de humedad del ambiente que estas tienen, lo que les proporciona inestabilidad térmica; pero las fibras de guadua en el proceso de extracción pierden esta capacidad, lo que hace que tengan una buena estabilidad térmica y las hace un material idóneo al momento de querer emplearlas (Forero, 2007).

Latinoamérica produce el 2% de composites que se consumen en el mundo y tiene una tasa de crecimiento del 8%, a diferencia de estados Unidos que produce el 47% y cuenta con una tasa de crecimiento anual del 4,5%, lo que demuestra la importancia del desarrollo de los biocomposites en el país y la competencia en crecimiento investigativo con otros países. Es importante reconocer los recursos naturales como fuentes renovables que aportan al desarrollo económico del país, sin dejar de lado la planificación en la extracción de la materia prima (Forero, 2007).

Así que con este estudio busca una alternativa combinando dos materiales diferentes donde uno es de origen vegetal y el otro es una resina polimérica, lo que permite combinar sus características mecánicas. Las mallas de fibra vegetal cuentan con propiedades mecánicas como fuerza, resistencia y baja densidad lo que las convierte en una de las mejores elecciones en el momento de requerir un refuerzo (Gunn, 2010). La resina epóxica es un polímero termoestable utilizado comúnmente en la producción de composites junto con otros materiales fibrosos que mejoran su rendimiento mecánico y estabilidad térmica, como fibras de vidrio o carbono, que se pueden reemplazar por fibras vegetales (Ramón, 2011). Este ejemplo muestra la existencia de una investigación en biocomposites.

Las fibras de origen vegetal se han utilizado en la industria automovilística, aeronáutica y construcción civil, en el campo de la medicina han sido empleadas como suplemento y reemplazo de tejidos naturales, esto comprueba su capacidad de degradación, biocompatibilidad y esperanza de vida; con estos estudios se busca en un futuro lograr el crecimiento gradual en producción y conocimiento acerca de los materiales reforzados con fibras de origen vegetal (Gunn, 2010).

Los datos obtenidos de una caracterización mecánica del biocomposito y de un análisis MEB permiten evaluar la viabilidad con la que cuenta el material para ser usado en diferentes aplicaciones y, llevando a cabo el análisis de elementos finitos se puede determinar su uso en férulas médicas para tratamiento de síndrome de túnel carpiano. El análisis de ciclo de vida en etapa de manufactura, procesado y formulación del biocomposito y otros materiales empleados por CIREC para la fabricación de férulas para el tratamiento de síndrome del túnel carpiano permite la comparación de la carga ambiental y viabilidad de uso del biocomposito en estudio.

Estos estudios se encuentran estrechamente relacionados con las investigaciones que se adelantan hoy en día, con el fin de generar y dar uso a materiales que puedan ser sostenibles como las fibras de los compuestos actuales y por eso, esta información va dirigida a las personas que se encuentren interesadas en la solución de patologías a partir de materiales biocompuestos con estructuras de soporte que lo puedan requerir.

Tabla 1. Fibras vegetales y sus propiedades mecánicas

Fibra	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Coco	1,15 - 1,25	131 - 220	4 - 6
Bagazo	0,55 - 1,25	20 - 290	2,7 - 17
Madera	0,38 - 0,55	160	23
Algodón	1,2 - 1,6	287 - 800	5,5 - 12,6
Banano	1,35	550	20
Guadua	0,6 - 0,8	187 - 1152	8 - 150
Lino	1,38 - 1,5	343 - 1500	6 - 80
Cáñamo	1,35 - 1,48	580 - 1110	70

Fuente Benazco. Preparación y caracterización de fibras naturales

En la Tabla 1 se presenta la comparación de las propiedades físicas de las fibras naturales con las que se han realizado estudios de compuestos, resaltando las ventajas de la guadua, siendo un material de baja densidad y muy resistente. Así que por las características y propiedades físicas de flexibilidad y resistencia que

se les atribuyen a las fibras de guadua, se decide iniciar este estudio en torno a compuestos que lo incluyan.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica de un biocomposito reforzado con fibras de *Guadua angustifolia* para la fabricación de una férula para el tratamiento del síndrome del túnel carpiano en etapa intermedia.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la mecánica a tracción y flexión de un biocomposito reforzado con fibras de *Guadua angustifolia*.
- Analizar mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) la composición mecánica interna del biocomposito.
- Analizar por simulación de elementos finitos la aplicación del biocomposito en una férula para tratamiento de síndrome del túnel carpiano en etapa intermedia a partir de los diseños proporcionados por CIREC.
- Realizar análisis de ciclo de vida conceptual en la etapa de manufactura, procesado y formulación del biocomposito y de los materiales usados habitualmente en CIREC para el tratamiento de síndrome del túnel carpiano en etapa intermedia.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

En el mundo de la rehabilitación ortopédica, se cuenta con una diversidad de materiales que buscan cumplir necesidades específicas en cuanto a producción y uso del cliente final; para la producción se recurre a la usabilidad, economía, bajo riesgo de obtención y manejo, facilidad y rapidez de adquirir su materia prima; por otro lado, el usuario del producto final requiere principalmente ergonomía, asepsia y comodidad, entre otros. Por esto los fabricantes de órtesis y prótesis se han dedicado a producir y realizar investigación y desarrollo científico alrededor de cumplir cada una de las necesidades propuestas a partir del aprovechamiento de diferentes fuentes de materia prima, en especial el petróleo que suele ser contaminante en todos sus procesos de manipulación. Gracias a todo este desarrollo, en la fabricación de dichos elementos se utilizan diversos materiales como: plástico, metal, silicona, PC-ABS y uno de los más utilizados es el poliuretano termoestable; también existen otros materiales más avanzados como el superskin que se caracteriza por la calidad de sus fundas de espuma y estética (Orliman, 2013). Estos materiales son utilizados ya que son aptos para estar en contacto con el cuerpo humano temporal o permanentemente, donde pueden existir procesos de degradación haciendo que se cumpla el periodo útil de los materiales, por lo tanto, deben ser reemplazados para evitar problemas de salud por toxicidad o por pérdida de sus propiedades físicas (Martínez, 2016).

En la actualidad, la industria se encuentra enfocada principalmente en el desarrollo de materiales y nanocompuestos “verdes” para obtener propiedades mecánicas, físicas y ambientales que promuevan el cuidado y sostenibilidad del medio ambiente (Brief, 2011). Se han desarrollado biocompuestos a partir de matrices poliméricas como Polipropileno (PP) y Polietileno (PE), también con biopolímeros como el ácido poli láctico (PLA) y polihidroxialcanoatos (PHAs) reforzados con fibras naturales o sintéticas. Los compuestos pueden poseer propiedades de varios materiales como por ejemplo urea, fibra de vidrio y fibra de carbono que proporcionan a los nuevos materiales compuestos propiedades mejoradas; por otro lado, las fibras de origen natural llaman la atención por su origen y propiedades, entre las que se destacan su baja densidad, ligereza y que se adaptan fácilmente a aplicaciones específicas (Mohanty, 2005). Aunque existen varios tipos de fibra de refuerzo usados en materiales compuestos, las fibras de vidrio son las que más se utilizan como refuerzos de matrices poliméricas (Bladimir, 2011).

La fibra de guadua suele ser utilizada como estructura de construcciones sismorresistentes, ya que es capaz de absorber grandes cantidades de energía y contiene un gran nivel de flexión, lo que la hace muy útil en diferentes campos y además es de costo bajo en comparación con otros materiales utilizados con los mismos fines (Sannas, 2015). Gracias a su capacidad de resistencia a

diferentes tipos de esfuerzo, la guadua se ha utilizado también en la industria del deporte para la fabricación de bicicletas y cascos donde se entrega la vida del deportista totalmente a la seguridad que el material pueda ofrecer, así es posible ver como también los materiales fabricados a partir de fibras vegetales reemplazan a pasos agigantados a otros materiales metálicos y poliméricos (bambú, 2012).

Los materiales compuestos por matrices poliméricas como la resina epoxi son actualmente utilizados en la industria automovilística, naval, aeronáutica, aeroespacial, para fabricación de material deportivo y de construcción; en esta última es utilizada para la unión de bloques y reparación estructural, y en las otras como recubrimiento y protección de artefactos y mecanismos (Bladimir, 2011). Se han realizado estudios con la conformación de biocompositos que combinen matrices sintéticas como la resina epoxi y fibras vegetales como el lino o fique, demostrando las propiedades fisicoquímicas del compuesto y su satisfacción con respecto a los usos que se les da comúnmente, por ejemplo la relación de deformación a tracción de ambos elementos, donde este valor es mayor en la matriz y se complementa con la combinación en el compuesto con fibra de lino que disminuye su magnitud, aumentando la resistencia y dureza del producto final.

4.2 CONCEPTOS DE MECÁNICA

Para poder llevar a cabo el análisis mecánico de una articulación es importante tener en cuenta diversos conceptos de física como estática, dinámica y cinética, que facilitan la explicación cuantitativa del movimiento (Viladot, 2001).

4.2.1 Estática: Estudia las condiciones para que un sistema se encuentre en equilibrio (Viladot, 2001).

4.2.2 Dinámica: Establece las relaciones fisiológicas que generan el movimiento de un cuerpo o sistema (Viladot, 2001).

4.2.3 Cinemática: Aporta la descripción matemática del movimiento de un sistema (Viladot, 2001).

De esta forma es posible observar las áreas de estudio que permiten el análisis de cualquier movimiento, si se aplican a un sistema específico como lo es la articulación de la muñeca, es posible determinar que para llegar a una descripción cualitativa de movimiento a partir de la cinemática, entonces se requiere conocer la fuente del movimiento o la fisiología del mismo, donde se tienen en cuenta las partes de cuerpo que se involucran y en qué forma (desde un impulso eléctrico cerebral hasta el movimiento muscular), lo que explica la dinámica, se sabe que para poder llevar a cabo un movimiento se deben superar las condiciones de equilibrio de un cuerpo, pero como se trata de una articulación, entonces los conceptos de estática permiten también estudiar las condiciones para evitar daños (Viladot, 2001).

En general, el cuerpo humano se mueve con un fin, genera una fuerza sobre otro cuerpo. Las fuerzas se representan mediante vectores que indican su punto de origen, dirección, sentido y magnitud.

Algunas de las fuerzas que siempre se presentan para el movimiento de un cuerpo son: peso del cuerpo y rozamiento entre los dos cuerpos. Las partes del cuerpo se exponen a constantes esfuerzos debido a los movimientos que ejerce y que esto depende también de la elasticidad del material sobre el que se aplique la fuerza. Por ejemplo, el rozamiento entre dos huesos o la compresión de unos sobre otro, la tracción de un músculo o compresión de un tendón (Viladot, 2001).

4.3 TEJIDOS

Los músculos y tejido conectivo son los tejidos que mayor abundancia tiene el cuerpo humano. El tejido conectivo como su nombre lo indica, es un tejido que se encarga de la unión de órganos y tejidos, mantiene la estabilidad y rigidez del cuerpo. Por otro lado, los músculos son los encargados de ejercer los movimientos del cuerpo a partir de la contracción de fibras proteicas que se activan gracias a impulsos cerebrales.

Los huesos son otro tipo de tejido, que también se puede considerar como la estructura del cuerpo, este funciona gracias a las sustancias que lo componen como el calcio y el colágeno. Los huesos se dividen en tubulares y no tubulares, entre los que se encuentran los planos y cubiformes, a los que pertenecen los carpianos. La estructura ósea se encuentra articulada con fin de permitir los movimientos, de esta forma también son transmitidas las fuerzas de un hueso a otro, de forma que cada hueso tiene sus propiedades mecánicas (Viladot, 2001).

La resistencia de un hueso puede evaluarse mediante la carga o la deformación que puede resistir o la energía que es capaz de almacenar antes de romperse, esta condición está determinada por la forma y longitud del hueso. La rigidez de un hueso está determinada por la pendiente de la curva de esfuerzo vs deformación en su región elástica, medible mediante el módulo de Young. Un hueso cortical y uno esponjoso tienen comportamientos muy diferentes, el hueso cortical soporta más carga, pero menos deformación que el esponjoso. Por esto, un hueso cortical se fractura cuando se excede el 2% de deformación, mientras que el esponjoso con el 7% y por su porosidad tiene mayor capacidad de almacenamiento energético (Viladot, 2001).

Por la diversidad de movimientos que presenta el cuerpo humano, un hueso puede someterse a diferentes fuerzas como: compresión, torsión, cizallamiento, flexión y tensión.

Para continuar con el estudio de la articulación, también se debe comprender la importancia de los tendones, pues son tejidos que tienen funciones específicas en el movimiento. El tendón es el tejido que debe soportar grandes cargas y esfuerzos a tensión, flexión, torsión, pero sobre todo a tracción, lo que puede producir inflamaciones (tendinitis) o roturas. El tendón cuenta con propiedades

de elasticidad, plasticidad y viscosidad que dependen de su función, estructura, ubicación y vascularización. Estos tejidos también cuentan con las mismas proteínas de los músculos que les permiten ser contráctiles, células alargadas en disposición de la fuerza, agua y colágeno (Viladot, 2001).

4.4 ARTICULACIÓN

Las articulaciones son unidades funcionales que permiten la unión entre dos o más huesos, llevando a cabo el movimiento. Se clasifican según la amplitud de este en: sinartrosis o fibrosas (movimiento muy limitado), anfiartrosis o cartilaginosas (semimóviles) y Diartrosis o sinoviales (amplio grado de movimiento) que contienen ligamentos, membrana sinovial, cartílagos y en algunos casos, meniscos. Las articulaciones se mueven en uno o más ejes: transversal (flexo-extensión), vertical (rotación) y anteroposterior (aducción-abducción).

Dependiendo de la forma de la articulación y la cantidad de grados de libertad, se pueden dividir en:

- Un grado: Trocoides (radio cubital) y Trocleartrosis (codo).
- Dos grados: Condilartrosis (radiocarpiana) y silla de montar (trapecio metacarpiano).
- Tres grados: Enartrosis.

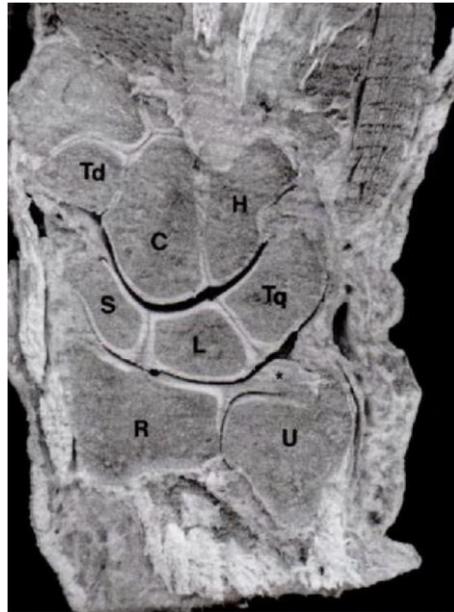
Uno de los tejidos que hace parte de una articulación es el cartílago, que está formado por células condrocitos, colágeno, proteoglicanos y agua en un 80%. Este facilita la transmisión de fuerzas entre huesos, mediante una gran superficie de contacto que evita las cargas puntuales que dañan los huesos y disminuye también el rozamiento entre las estructuras óseas, lo que evita su desgaste (Salud, 2018).

4.5 BIOMECÁNICA DE LA MUÑECA

La muñeca es una articulación ubicada en la parte distal de las extremidades superiores, se encarga de unir la mano al antebrazo y permitir su movimiento. Es una articulación compleja, ya que permite realizar diferentes movimientos y es capaz de soportar diferentes fuerzas de compresión, cizallamiento y torsión sin desestabilizarse.

De la muñeca hacen parte los ocho huesos carpianos, unidos por ligamentos y agrupados en dos hileras transversales. La hilera proximal formada por el escafoides, el semilunar, el piramidal y la hilera distal formada por el trapecoide, el hueso grande y el ganchoso (Viladot, 2001).

La superficie distal del radio es cóncava y está inclinada en dos sentidos: en el plano sagital (12°) y en el plano frontal (22°). La estructura fibrocartilaginosa tiene una sección bicóncava y se encarga de estabilizar la articulación radio cubital y de amortiguar las cargas existentes entre la parte convexa de la cabeza del cúbito y la misma convexa de la parte medial del carpiano (Viladot, 2001).



*Figura 1. Corte frontal de la muñeca. Td) piramidal; C) hueso grande; H) hueso gancho; S) escafoides; L) semilunar; Tq) trapezoide; R) radio; U) cubito; *) fibrocartílago triangular (A, Viladot. Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor)*

En la articulación medio carpiana se encuentran tres zonas con características particulares diferentes: una zona en la que se relaciona una superficie convexa proximal con una superficie cóncava distal; una zona central con superficie cóncava proximal con una superficie convexa distal y una zona medial con una forma helicoidal (Viladot, 2001).

En la Figura 2, la muñeca posee dos tipos de ligamentos distintivos: extrínsecos (1,2,7) e intrínsecos (3,4,8,9). Los ligamentos extrínsecos unen el carpo con el radio o cubito, son más largos y menos vulnerables a los traumatismos que los ligamentos intrínsecos, los cuales relacionan los huesos carpianos entre sí (Viladot, 2001).

Los tendones responsables de la movilidad de la muñeca se insertan en la hilera distal o en la base de los metacarpianos, primer radial (10) en el dorso del segundo metacarpiano, segundo radial (10) en el dorso del tercer metacarpiano, cubital posterior (11) en el dorso del quinto metacarpiano, palmar (6) mayor en la base del segundo metacarpiano y abductor largo del pulgar (12) en la cara del primer metacarpiano. Aparte de los tendones, todos los músculos que cruzan la articulación de la muñeca también intervienen en su movimiento. Todos

producen más o menos flexión-extensión e inclinación radial-inclinación cubital (Viladot, 2001).

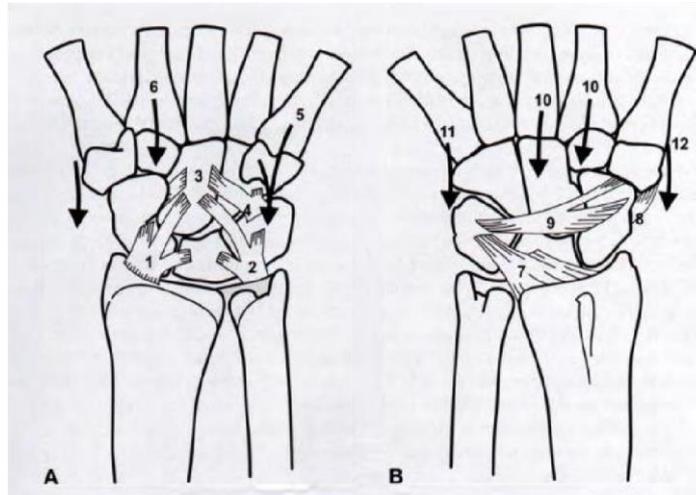


Figura 2. Origen, inserción y dirección de los principales ligamentos de la muñeca. A) cara palmar; B) cara dorsal; 1,2,7) ligamentos extrínsecos; 3,4,8,9) ligamentos intrínsecos; 5,11) tendón cubital; 6) tendón palmar; 10) tendón radial; 12) tendón abductor (A, Viladot. Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor)

En la articulación de la muñeca, también se encuentra el túnel carpiano, a través de este pasa el nervio mediano de la mano que controla las sensaciones de los dedos medio, pulgar e índice. Alrededor de este túnel se encuentran los ligamentos carpianos extrínsecos (1 y 2 en la Figura 2) que nacen del cúbito y radio hasta uno de los huesos carpianos. Los tendones flexores de los dedos nacen en la epitroclea humeral y se dirigen hacia la cara palmar de la mano a través del túnel donde se protegen, estos se encuentran envueltos por una vaina sinovial que actúa como lubricante para disminuir la fricción en los movimientos que estos ejercen (Viladot, 2001).

La muñeca es un complejo pluri articular donde todo movimiento debe considerarse como resultado de la interacción y acumulación de los movimientos que ocurren en las diferentes articulaciones que componen a la muñeca. El conocer la cinemática de estas articulaciones facilita la interpretación y tratamiento de diferentes trastornos relacionados con la muñeca (Viladot, 2001).

La flexión y extensión son movimientos producidos alrededor de un eje transversal que permite a la palma de la mano acercarse a la cara anterior del antebrazo o alejarse de ella.

Tabla 2. Movimientos y ángulos de la muñeca

Movimiento	Ángulo
Flexión activa (dedos extendidos)	90°
Flexión activa (puño cerrado)	65°
Extensión activa	80°
Extensión pasiva	95°
Flexión-inclinación pasiva (dedos extendidos)	125°

Fuente A, Viladot. Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor.

Los tendones flexores alejados del eje radio cubital están ubicados en la cara anterior de la muñeca, al contraerse producen una potente flexión-inclinación cubital de la muñeca. Del mismo modo como los tendones utilizados en la extensión están situados en la mitad externa de la muñeca, toda extensión tiene una relativa inclinación radial. Los movimientos de rotación inician en la hilera distal y van cambiando de posición a medida que la muñeca se horizontaliza. El conjunto de estos ejes suele converger alrededor de la cabeza del hueso grande. En estos desplazamientos los huesos de la hilera distal permanecen unidos. La hilera proximal empieza a flexionarse, el escafoides se flexiona en este movimiento un promedio de 55°, mientras que el semilunar se flexiona 45° lo cual muestra que durante la flexión la articulación experimenta unos 10° de rotación intrínseca (Viladot, 2001).

La extensión se inicia en la hilera distal y se propaga hacia la hilera proximal a través de los ligamentos intrínsecos que cruzan la articulación medio carpiana. En este caso el escafoides se extiende 56° y el semilunar 31° promedio.

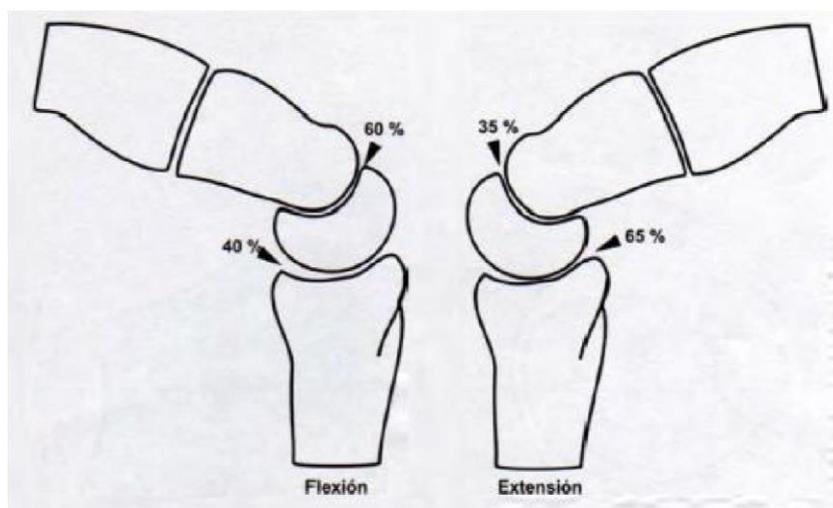


Figura 3. Flexión y extensión de la muñeca. Donde: Rotación medio carpiana 60%, Rotación radiocarpiana 40%, Rotación radiocarpiana 35% y Rotación medio carpiana 65%. (A, Viladot. Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor)

La inclinación radial-cubital o abducción-aducción, es un movimiento en el cual la mano se acerca o aleja respecto al eje del cuerpo. La inclinación cubital acerca la mano hacia el cuerpo, mientras que la inclinación radial la aleja. Los movimientos de inclinación se localizan alrededor del centro de la cabeza del hueso grande (Viladot, 2001).

Al tomar el tercer metacarpiano como referencia de amplitud, la inclinación cubital llega entre 30° a 40° y la amplitud de la inclinación radial, en cambio, no sobrepasa los 15°. En la inclinación cubital, el hueso semilunar se desplaza 15° radialmente y se extiende 5° de promedio. En cambio, el escafoides se extiende 8° y se desplaza 17° radialmente (Viladot, 2001).

Debido al gran conjunto de elementos que componen la articulación de la muñeca, la distribución de cargas se hace posible en todos ellos con el fin de evitar sobrecargas puntuales que puedan generar degradaciones en los diferentes tejidos. Esta distribución normalmente no depende de la magnitud ni origen de la fuerza, en posición neutral, aproximadamente el 80% de la carga es transmitida al radio y sólo el 20% viaja a través del fibrocartílago triangular al cubito. De las fuerzas transmitidas al radio, el 60% pasa a través de la articulación radio-escafoides y el 40% a través de la fosa del semilunar (Viladot, 2001).

Se considera que la muñeca es una articulación estable debido a que es capaz de soportar grandes cargas sin alterar su alineación normal. Esto se logra gracias a los ligamentos extrínsecos radiocarpianos palmares y dorsales que evitan el deslizamiento en sentido cubital. Pero, así como este ligeramente se apoya en la articulación radio cubital, hay otros ligamentos interóseos que se encuentran entre las dos hileras distales que se oponen a ciertos movimientos y apoyan en la estabilidad (Viladot, 2001).

4.6 SÍNDROME DEL TÚNEL CARPIANO

La principal patología que se presenta en la zona de la muñeca es el síndrome del túnel carpiano. Para el 2013 en Colombia, el 1,5% de los desórdenes musculoesqueléticos relacionados con actividades laborales se presentan en las personas que flexionan repetidamente la articulación de la muñeca (Palencia, García & Riaño, 2013), de tal forma que pueden llegar a sufrir una inflamación en el tendón del túnel carpiano, por consiguiente genera presión en el nervio medio de la mano, lo que produce dolor y falta de sensibilidad (Baker, 2002), esto es lo que se conoce como síndrome del túnel carpiano. Esta patología generó un costo asistencial de \$38'549.402 en el 2004 con 169 casos registrados, es decir que el valor medio por caso es de \$228.103, cabe destacar que, en los costos mencionados anteriormente, no se tiene en cuenta los gastos indirectos por contratación de personal de reemplazo y los casos no registrados.

El síndrome se debe a la compresión que se realiza sobre el nervio mediano de la mano. Este nervio se encarga de controlar las sensaciones del lado palmar de

los dedos pulgar, índice y medio, además de dirigir algunos movimientos del pulgar. Viaja desde el antebrazo hasta la mano, pasando a través de un túnel en la muñeca que lo protege (túnel carpiano), por el cual también cruzan los tendones flexores de los dedos (American Academic of Orthopaedic Surgeons, 2010).

El túnel carpiano está formado por los huesos carpianos y cubierto por el ligamento carpiano transverso.

El síndrome del túnel carpiano se presenta cuando las membranas sinoviales que recubren los tendones flexores se inflaman y presionan el nervio medio, causando dolor y adormecimiento de las manos y puede llegar hasta el hombro. Se presenta con mayor frecuencia en las mujeres que en los hombres. Existen diversos factores que influyen para la generación de la patología, y normalmente cuando se presenta no hay una única causa, estos factores son: la herencia, debido al tamaño del túnel carpiano; el uso de la mano; cambios hormonales presentados durante el embarazo; la edad, pues se presenta más en personas mayores; condiciones médicas, como artritis, diabetes o desequilibrio en la glándula de la tiroides (American Academic of Orthopaedic Surgeons, 2010).

Comúnmente, el síndrome del túnel carpiano se presenta progresivamente, es decir, que empeora con el tiempo si no se realiza ningún tipo de tratamiento, pero puede interrumpirse e incluso detenerse en etapas tempranas. Si se presenta por alguna ocupación repetitiva, puede detenerse en el momento de modificar o dejar de ejecutar la actividad

Tabla 3. Etapas del síndrome del túnel carpiano

Etapas	Síntoma
Leve	Síntomas sensitivos.
Intermedia	Dolor, hormigueo, entumecimiento y/o sensación reducida en al menos tres de los cinco dedos de mano.
Avanzada	Compromiso sensitivo y/o motor.

Fuente American Academic of Orthopaedic Surgeons. Síndrome del túnel carpiano (Carpal Tunnel Syndrome).

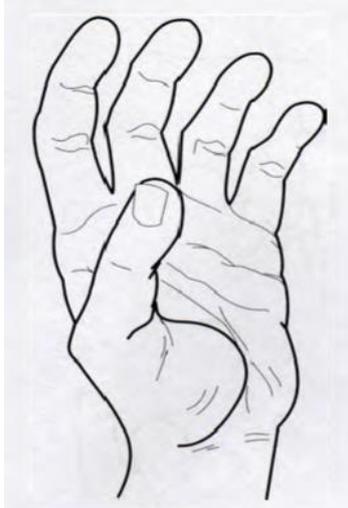


Figura 4. Posición funcional de la mano (American Academy of Orthopaedic Surgeons. Síndrome del túnel carpiano (Carpal Tunnel Syndrome))

Para el tratamiento del síndrome del túnel carpiano se pueden llevar a cabo diferentes procesos de acuerdo a su evolución, en los casos más críticos se puede intervenir mediante cirugía. Pero también pueden implementarse otros tratamientos para detener el progreso en etapas tempranas como cambios de actividad, medicamentos, corticosteroides o inmovilización con férula (American Academic of Orthopaedic Surgeons, 2010).

Para la inmovilización de la muñeca después de un traumatismo, es importante conservar la posición funcional de la mano como se muestra en la Figura 4, donde la muñeca se encuentra en extensión e inclinación cubital leve, los dedos ligeramente flexionados y el pulgar en MEBi oposición, 40° en antepulsión y 20° de abducción, esto con el fin de tener una mano funcional con ayuda de las otras articulaciones.

Para el tratamiento del Síndrome de túnel carpiano se implementan ortesis pasivas posturales que generalmente son temporales, deben conservar la posición funcional de la mano mediante la inmovilización de la articulación de la muñeca y el pulgar, de acuerdo al tiempo indicado por el médico tratante. Estas pueden ser de material termoplástico o yeso si es temporal, deben ser más extensas que la sola articulación para poder realizar la fuerza necesaria que les permita mantener la postura, entonces debe abarcar antebrazo y mano (American Academic of Orthopaedic Surgeons, 2010).

4.7 ORTESIS

Es un aparato ortopédico que se coloca externamente y suplente una función del aparato locomotor que haya sufrido pérdida definitiva o provisional. Se dividen en activas y pasivas, las activas son las que sustituyen una actividad mecánica como función muscular o ligamentosa; las pasivas, en cambio, se encargan de mantener un segmento del aparato locomotor en una posición específica y a su

vez se clasifican en correctoras y posturales. Donde las correctoras, como su nombre lo indica, buscan corregir alguna deformidad, las posturales en cambio buscan mantener la posición de una articulación en un ángulo determinado. Por otro lado, las ortesis también se pueden dividir según su tiempo de uso en temporales, que se usan para trastornos limitados de tiempo y definitivas para discapacidades definitivas (Viladot, 2001).

Para el diseño de una ortesis, es importante que esta se encuentre alineada con la articulación y que los ejes de angulación coincidan con los ejes de movimiento debido a que son segmentos móviles del cuerpo y se pueden causar lesiones incluso peores. Si la articulación cuenta con más de un grado de libertad, se debe intervenir la función principal o el grado más funcional de ese segmento. Entonces el diseño debe basarse en las funciones que va a suplir y en las fuerzas que ejerce el segmento que va a tratarse, de esta forma se tiene en cuenta la longitud de los brazos de palanca que especifican los vectores de fuerza que se van a aplicar sobre la ortesis (Viladot, 2001).

Los materiales que se utilizan para la fabricación de ortesis deben ser muy ligeros con el fin de no aumentar el gasto energético en la movilidad de la zona afectada. Es diferente la implementación en una extremidad inferior que, en una superior, pues en las extremidades inferiores se debe tener en cuenta además de la ligereza, la resistencia para soportar cargas, lo que brindan materiales como el plástico, resinas, fibra de vidrio o de carbono. Existen también órtesis elásticas que se confeccionan con materiales ligeros, transpirables y que no produzcan irritación. Si es una ortesis definitiva se deben utilizar materiales que sean duraderos, aunque sean más costosos.

Como se ha dicho anteriormente, las férulas se pueden fabricar de diversos materiales que se especifican en la Tabla 4.

Tabla 4. Materiales utilizados en férulas

Material	Materia prima	Características	Ventajas	Desventajas
PP (Toscano, 2010)	Polimerización del propileno o propeno	Termoplástico, parcialmente cristalino. Gran resistencia a solventes químicos como álcalis y ácidos	Varios tamaños	Se trabaja a muy altas temperaturas
Pelite plastazote (Hospitales Nisa, 2014)	Etilvinilacetato	Plásticos blandos	Almohadilla que absorbe fuerzas de impacto. Mediadores de relleno	Pierden eficacia al poco tiempo de uso, se debe renovar con frecuencia

Material	Materia prima	Características	Ventajas	Desventajas
PVA (Hospitales Nisa, 2014)	Alcoholato de polivinilo	Laminado de resina poliéster y acrílico	Sellado electrónicamente	Es sensible a temperaturas altas y puede ocasionar reacciones químicas
PU (Hospitales Nisa, 2014)	Condensación de poliols con poliisocianatos. Pigmentos	Termoestable. Aislante térmico, adhesivo y sellador. Medio para dar forma al encaje rígido	Se puede mezclar con pigmentos. Diferentes medidas	Corta durabilidad, daño ambiental
Resina (Hospitales Nisa, 2014)	Malla de fibra de vidrio impregnada en una resina de poliuretano que al contacto con agua provoca el endurecimiento	Flexible y resistente. Se puede retirar y volver a poner con velcro	Se moldea sobre el paciente y se adapta a su estructura y características anatómicas Económico	No logra inmovilizar la articulación. Tiempo de vida medio de 6 meses a un año. Se requiere ayuda si el paciente es hemiparético
Hule espuma (DuPont)	Sintético de polímeros de plásticos	Presentación en láminas	Higiénico, elástico	Deformabilidad
Neopreno (DuPont)	Gomas sintéticas basadas en el policloropreno	Presentación en rollos textiles	Confección de órtesis	Tiende a corroerse con el sol y la lluvia, daño ambiental
Madera de Boj (DuPont)	Especies europeas, asiática africana. Secarse adquiere propiedades ideales	Textura fina y uniforme. Pesada	Fácil manipulación	Pesada. Propenso a agrietarse
Duraluminio (DuPont)	Conjunto de forja de aluminio, cobre, magnesio y silicio. Zona medial en acero inoxidable	Elevada resistencia mecánica. Baja aptitud para anodizado	Varios tamaños. Permite tomar radiografía	Baja resistencia a la corrosión, soldabilidad
Acero inoxidable (DuPont)	Aleación de diferentes metales (níquel, cobre, cromo)	Elevada resistencia mecánica	Resistente a la corrosión, buenas, facilidad de limpieza	Relación Masa-costos

4.8 MATERIAL COMPUESTO

Un material compuesto se encuentra formado por dos o más elementos o sustancias con características y propiedades diferentes e individuales, que al unirse crean un compuesto con propiedades específicas de ambos componentes. En el compuesto se pueden diferenciar dos elementos: el refuerzo, que provee la resistencia a la tensión; y la matriz, que proporciona la rigidez del material (Forero, 2007).

4.8.1 Matrices: Son los componentes que funcionan como sustancia de aglutinamiento en un material compuesto (UCA), provee soporte a las fibras de refuerzo y transmite el esfuerzo que viaja de una fibra a otra. La matriz de un compuesto es la que se encarga de dar la forma, apariencia y superficie, protege las fibras ante agentes externos. Las más utilizadas son las poliméricas, metálicas y cerámicas, pero para el 2010 las poliméricas representaban el 90% de los compuestos (Ramírez,2010) y pueden ser:

- Polímeros termoplásticos
- Resinas termoestables
- Polietileno Tereftalato (PET)
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Polietileno (PE)
- Resina poliéster
- Polipropileno (PP)

4.9 MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRAS NATURALES

O también denominados “biocompuestos”, son materiales que están compuestos por al menos una de sus partes (matriz o refuerzo) de origen natural u orgánico. Puede ser una fibra natural reforzada con matrices poliméricas no biodegradables. Las fibras naturales pueden ser empleadas con resinas poliméricas termoestables, termoplásticas o elastoméricas, también se pueden combinar con polímeros naturales lo cual la convierte totalmente en un material biodegradable. Las propiedades del compuesto dependen de los elementos por los que está formado y de la compatibilidad que tengan entre ellos. (Thomas, 2011). Las fibras naturales más utilizadas son las celulósicas debido a su densidad y porque son renovables (Kozlowski, 2004).

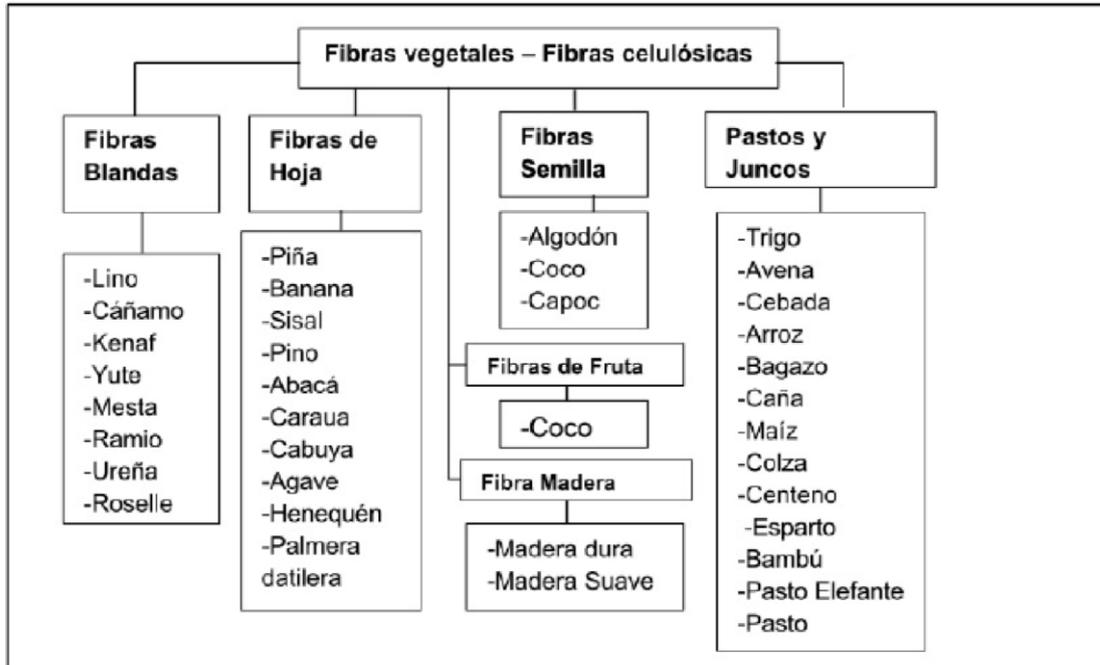


Figura 5. Principales fibras vegetales utilizadas en materiales compuestos. (R, Kozlowski. State of the art in the research on natural fibers and their properties used in composites)

4.10 FIBRA DE BAMBÚ (*Guadua angustifolia*)

La *Guadua angustifolia* pertenece a la familia de los pastos y juncos, es conocida mundialmente como bambú y tiene una forma característica similar a un tallo nudulado largo con crecimiento en línea recta, es liviana, hueca en su centro, resistente y de rápido crecimiento (puede cosecharse cada 4 o 6 años) (Vélez, 2007).

4.10.1 Generalidades de la *Guadua angustifolia*: El mejor desarrollo de esta planta, para obtener tallos de gran diámetro y altura (30m aprox.), se da entre los 900 y 1600 m.s.n.m., con precipitaciones de 2000 a 2500 mm, humedad de 80% y temperatura alrededor de 20°C. En Colombia la *Guadua angustifolia* ha sufrido una gran crisis de deforestación, pues sus suelos son fértiles y aptos para la implantación de cultivos, así que hoy en día sólo se cuenta con grandes áreas cultivadas residuales en el occidente del país que se deben preservar para conservar y recuperar la especie (Maya & Sabu, 2008).

Las propiedades mecánicas de la *Guadua angustifolia* son comparables con las de otras maderas y en la mayoría de los casos son mucho mejores.

Tabla 5. Comparativo de propiedades mecánicas de *Guadua Angustifolia* en Colombia

Material	MET (GPa)	MEC (GPa)	MEF (GPa)	RT (MPa)	RC (MPa)		RF (MPa)
					Perpendicular fibra	Paralelo fibra	
Guadua	190	184	179	430	560	650	740
Aliso	-	-	-	108	68	357	460
Arboloco	-	-	-	500 - 1500	132	405	390
Otras maderas	90 - 180	96 - 169	108 - 128	1000	50 - 144	400	500 - 720

Fuente Biagiotti. Biofibras and biocomposites.

Las fibras de la zona medial de la estructura de la guadua son las que se consideran en la producción de compuestos, pues este material laminado es el que se posee las mejores propiedades de resistencia (Maya & Sabu, 2008).

4.10.2 Ventajas *Guadua angustifolia*: Es una planta perenne, tiene la capacidad de regenerarse naturalmente y su volumen por hectárea es grande. Por su crecimiento rápido es una planta de bajo costo. La *Guadua angustifolia* posee efectos protectores en los suelos y en las microcuencas, ya que con sus raíces evitan erosión del suelo y desbanques. Esta especie vegetal es una gran productora de oxígeno y fijador de CO₂ por lo que brinda un efecto de purificación en el medio ambiente (Valarezo, 2013).

4.11 PROCESO DE INYECCIÓN DE RESINA ASISTIDO POR VACÍO (RTM LIGHT)

El proceso RTM nació en la industria a partir de los años 60 con base en la necesidad de poder fabricar piezas con mejores acabados y menor desperdicio de material. El proceso de Transferencia de Resina en Molde cerrado a baja presión (RTM light) para la fabricación de materiales compuestos es un proceso alternativo debido a su baja inversión inicial y fácil implementación en comparación con el RTM tradicional.

El RTM light es un proceso asistido por vacío, usado para la fabricación de piezas de compuestos poliméricos termófilos. La tecnología del sistema, consiste en inyectar resina catalizada, utilizando presión hidrostática transmitida por una bomba de volumetría asistida por vacío en un molde cerrado herméticamente, con los refuerzos posicionados en su interior. La presión de inyección está entre 0.5 y 1 Bar (RTM, 2008).

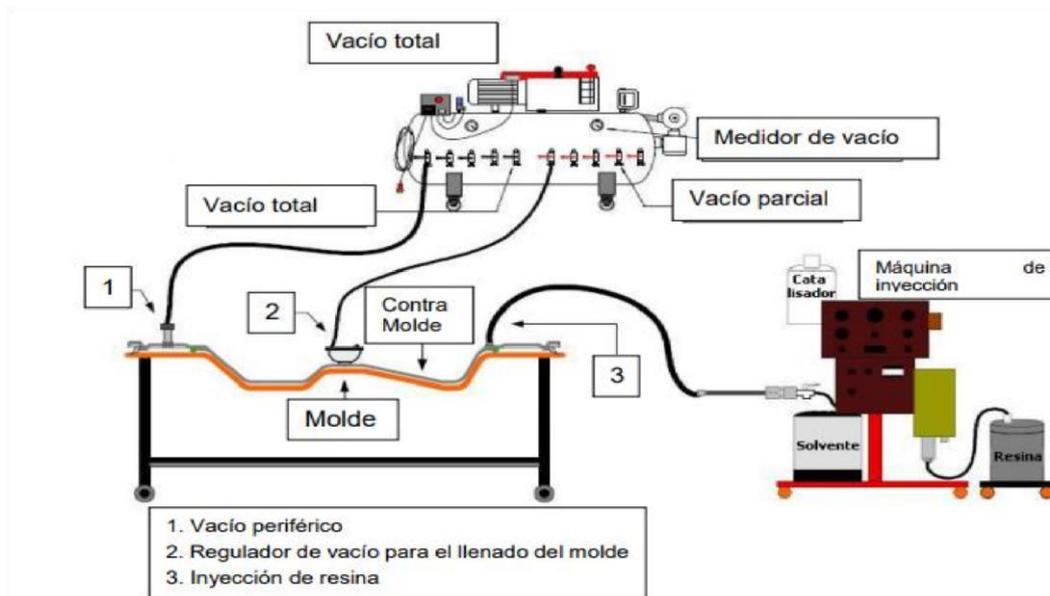


Figura 6. Esquema del proceso de RTM light. (RTM. composites equipment & engineering)

El proceso de RTM Light no requiere de inversiones grandes o de moldes muy estructurados, únicamente los siguientes componentes:

- Máquina de Inyección (sencilla y resistente)
- Bomba de vacío (para sellado del molde e Inyección de la resina catalizada)
- Molde (puede ser de compuesto o hecho en casa)
- Accesorios especiales (selladores, recipiente de vacío y conexiones)

La materia prima utilizada para RTM light es:

4.11.1 Refuerzos: la elección del tipo de tipo de refuerzo para el proceso debe ser realizada, teniendo en cuenta su adaptación al proceso de moldeo por RTM Light, forma, propiedades mecánicas y el aspecto de la superficie a ser moldeada.

4.11.2 Resinas: la mayor parte de los tipos de resina líquida pueden ser procesadas por la Inyección.

La resina por utilizar debe tener buena fluidez, baja viscosidad a temperatura ambiente, ciclo de curado rápido, reactividad media a cargas altas: pueden ser impregnadas en combinaciones con las resinas para el proceso RTM Light, en la misma proporción en que la viscosidad y la mezcla permitan la Inyección y la impregnación (RTM, 2008).

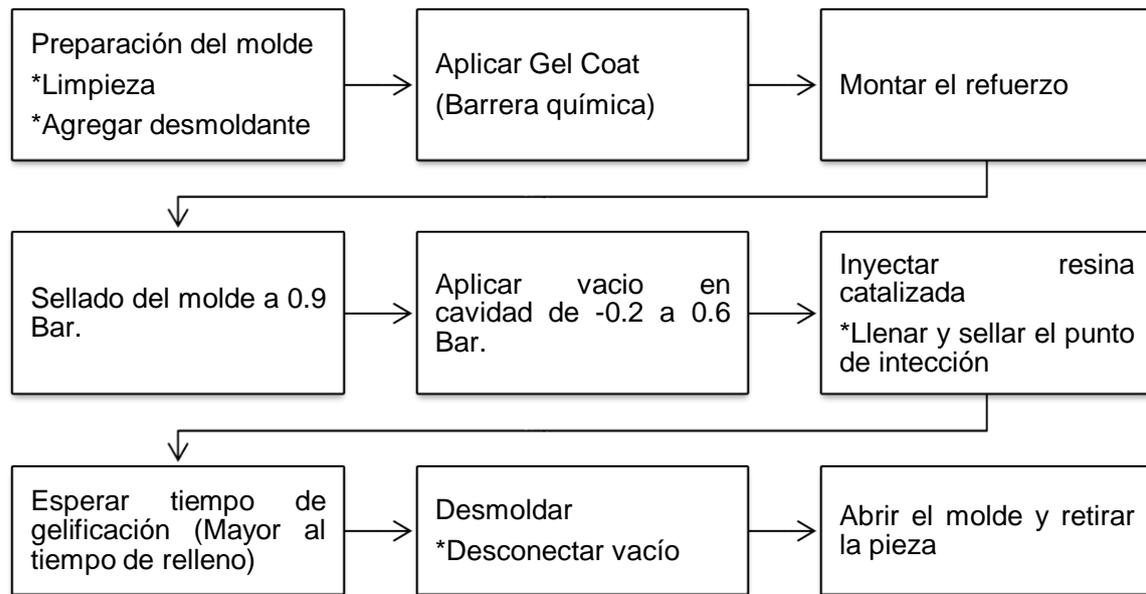


Figura 7. Metodología de proceso RTM light (RTM. composites equipment & engineering)

4.12 ANÁLISIS MECÁNICO DE MATERIALES

4.12.1 Norma internacional ASTM D3039: Esta norma se desarrolló de acuerdo a los principios de normalización reconocidos internacionalmente establecidos en la decisión sobre los principios para el desarrollo de normas internacionales, guías y recomendaciones del OTC (comité de obstáculos técnicos al comercio) de la Organización Mundial del Comercio. La norma determina el método de prueba estándar para ensayo de tracción en materiales compuestos de matriz polimérica en probetas de diferente forma y tamaño. Las formas del material compuesto se limitan al tipo de fibra, si es continua o no y si es simétrico con respecto a la dirección de prueba (ASTM, 2017).

Los valores que se van a utilizar en el ensayo deben ir siempre en el mismo sistema de unidades, SI o en unidades de pulgada-libra, se debe considerar por separado como estándar, pues “los valores establecidos en cada sistema no son equivalentes exactos; por lo tanto, cada sistema debe usarse independientemente del otro. La combinación de valores de los dos sistemas puede provocar una disconformidad con el estándar” (ASTM, 2017).

La cantidad mínima de muestras especificada por la norma es de 5 probetas. La muestra debe colocarse en las mordazas de la Máquina Universal de Ensayos con la orientación de las fibras paralela al esfuerzo y se tiran hasta la falla. La velocidad de prueba puede determinarse por la especificación del material y el tiempo hasta la falla (de 1 a 10 minutos). Una velocidad de prueba típica para

probetas estándares es de 2 mm/min, se usa un extensómetro o medidor de tensión para determinar la elongación y el módulo de tracción. La muestra más común para ASTM D3039 es de 25mm de ancho y de 250mm de largo para compuestos de 2,5mm de grosor (ASTM, 2017).

4.12.2 Norma internacional ISO 14125: Esta norma habla de la determinación de las propiedades de flexión en compuestos plásticos reforzados con fibras. Permite aplicarse en compuestos con materiales aislantes eléctricos en forma de barras rectangulares moldeadas o cortadas en láminas. La prueba de flexión permite conocer el comportamiento del material en condiciones reales y por lo tanto otorga un gran aporte a la caracterización y ficha técnica del material, esta prueba permite entonces identificar cuánto puede flexionarse un material antes de la falla (ISO 14125).

La norma permite medir la fuerza, el desplazamiento del cabezal de flexión y la deformación del material y se puede llevar a cabo el ensayo sobre 3 o 4 puntos. Los resultados que se pueden obtener se usan comúnmente con fines de control de calidad y son la deformación máxima en las fibras, resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad (ISO 14125).

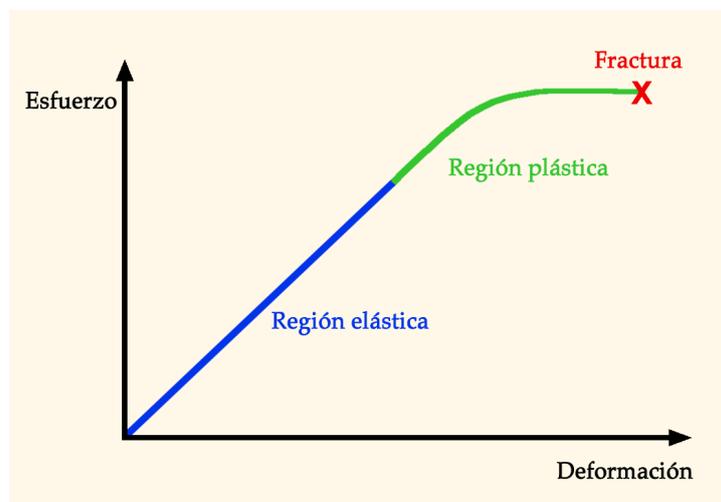


Figura 8. Diagrama esfuerzo Vs. deformación (Rivas & Contreras, 2011)

El comportamiento mecánico de todos los materiales se puede representar mediante una gráfica de Esfuerzo Vs. Deformación como la de la Figura 8, que permite identificar las fases por las que el material debe atravesar hasta el punto de fractura de acuerdo a la carga que se aplique. Dichas fases son representadas por las regiones (elástica, plástica y fractura), donde las cargas que se apliquen al material y se encuentren dentro de la zona elástica no van a deformar el material permanentemente, sino durante la aplicación de la fuerza. Las cargas que se apliquen de la zona plástica efectuarán una deformación permanente en el material, es decir que el material no vuelve a su forma original (sin quebrarse) y; por último, el esfuerzo con que el material se fractura.

Para la determinación de las propiedades mecánicas de un material se realizan una serie de pruebas que permitan la creación de la gráfica específica para ese material y se pueden llevar a cabo de diversas formas, por análisis de imágenes, modelos matemáticos, por micromecánica de compuestos o pruebas físicas de esfuerzo a tracción (determina la ductilidad), compresión (resistencia a fuerzas que tienden a aplastar) y flexión (determina rigidez y módulo de elasticidad). Existen diversas máquinas y metodologías que permiten el análisis físico de los materiales que permiten ejecutar algunas de las pruebas nombradas anteriormente de la siguiente forma:

Ensayo de compresión: Este tipo de ensayos permite determinar las constantes elásticas y de compresión de un material (Tsai & Miravete, 1986). El ensayo de compresión se realiza en una máquina de ensayo de tracción siempre y cuando la máquina posea una plataforma inferior resistente sobre la que se pondrá la probeta y una plancha adecuada para comprimir la misma (Bernau, 2008).

Ensayo de tracción directa: Este ensayo es utilizado en ingeniería para determinar las características de resistencia y deformabilidad, también sirve como herramienta para verificar las especificaciones de aceptabilidad o rechazo del material. Este método también permite determinar la tenacidad, la deformación unitaria de rotura, la tensión máxima y el módulo de rigidez (Garrote, 2012), en un material compuesto con fibras de un sólo sentido, este ensayo se lleva a cabo ejerciendo la fuerza en dirección paralela a la disposición de las fibras con el fin de determinar la deformación y elasticidad de las fibras.

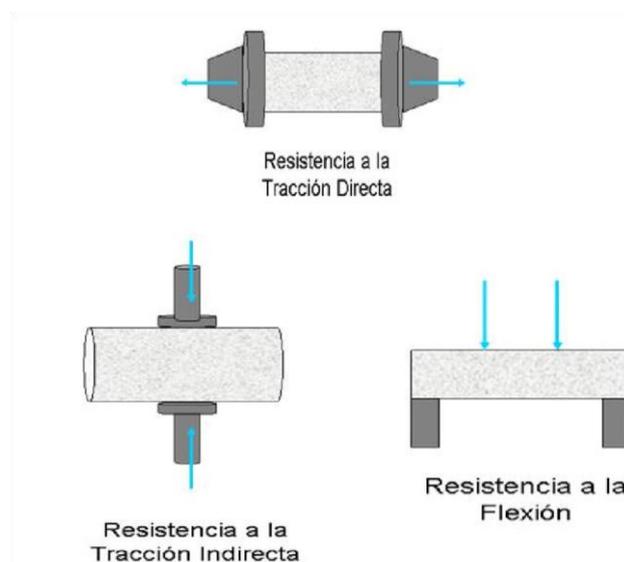


Figura 9. Pruebas de resistencia de Materiales (Garrote. El ensayo de tracción directa)

Según el tipo de ensayo que se va a realizar, se requieren una serie de aditamentos que le permitan llevar a cabo los análisis correspondientes. Para la prueba de tracción se requieren un par de mordazas que permitan ejercer

fuerzas en dirección opuesta y se mide la elongación de la probeta; para la de compresión, un plato de compresión y suplemento elevador que ejercen presión sobre el material donde se mide el diámetro de la probeta antes y después de la prueba, por último; para la de flexión, un presionador y apoyo, en este ensayo se mide la deformación de acuerdo al incremento de cargas durante un tiempo determinado. Los resultados que se obtienen de estas pruebas son:

Módulo de Young: O módulo de elasticidad, es un valor que representa el comportamiento de un material elástico siempre que no se supere el límite elástico y es siempre mayor que cero, pues representa la razón entre el aumento de longitud del material de acuerdo al esfuerzo aplicado. En un material lineal e isótropo, este valor es el mismo en una prueba de tracción y una de compresión (Martínez & Azuaga, 1997).

Es un parámetro que evidencia el comportamiento de un material luego de ser deformado y de haber regresado a su forma original una vez son quitadas las cargas aplicadas, la mayoría de los materiales son elásticos hasta cierto límite de carga. Se representa como:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde:

E = Módulo de Young

σ = Deformación

ε = Esfuerzo

Esfuerzo máximo: Es el mayor esfuerzo que puede soportar el material antes de entrar en su zona plástica, es decir, hasta que la deformación sea permanente o alcance su límite elástico (MECA, 2011).

Deformación: Es el porcentaje que muestra la diferencia entre la longitud inicial y la longitud final del material después de la prueba de tracción, representa la cantidad de deformación que tuvo el material a partir de una calibración previa que se le realiza al material (Ramos & Suárez).

Criterio de Von Mises: Es un criterio de resistencia estática que se basa en la teoría de Von Mises-Hencky o teoría de la energía de cortadura, que indica que un material no comenzará a ceder en un punto hasta que la tensión de Von Mises supere energía de distorsión por unidad de volumen o límite de tensión (SolidWorks, 2010).

4.13 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electrodensa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0,1kV hasta 30 kV. El haz de electrones se

desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La interacción del haz de electrones con la muestra produce diversas señales (electrones secundarios, electrones retro dispersados, emisión de rayos X, etc.), que son recogidas por distintos detectores; los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales tanto orgánicos como inorgánicos (Andes, 2015).

4.13.1 Funcionamiento de un MEB: Un microscopio de barrido de electrones funciona con un haz de electrones producido por una fuente que puede ser un cañón termoiónico. Al cañón se le aplica un potencial eléctrico que acelera el haz de electrones hacia una columna, éste es focalizado por medio de lentes electromagnéticas sobre la muestra. Los electrones chocan e interactúan con la muestra produciendo varias señales que podrán ser recogidas de acuerdo con la señal y con los detectores presentes. La magnificación de la imagen se produce por un conjunto de lentes electromagnéticas que mediante un tratamiento adecuado de las señales electrónicas son proyectadas en un tubo de rayos catódicos (Andes, 2015).

4.13.2 Interacción del MEB: Cuando los electrones colisionan con la muestra se producen varios fenómenos:

- **Electrones secundarios:** La propia muestra emite electrones secundarios debido a la colisión con el haz incidente para generar imágenes tridimensionales de alta resolución, la energía de estos electrones es muy baja, inferior a 50 eV, por lo que los electrones secundarios provienen de los primeros nanómetros de la superficie.
- **Electrones retro dispersados:** Algunos electrones primarios son reflejados o retro dispersados tras interactuar con los átomos de la muestra. La intensidad de emisión de estos electrones está directamente relacionada con el número atómico medio de los átomos de la muestra, así los átomos más pesados producen mayor cantidad de electrones retro dispersados, permitiendo la obtención de imágenes planas de composición y topografía de la superficie.
- **Absorción de electrones:** La muestra absorbe electrones en función del espesor y la composición; esto produce la diferencia de contraste en la imagen.
- **Emisión de rayos X:** Cuando los electrones de niveles internos son expulsados por la interacción de los electrones primarios, habrá transiciones entre los niveles de energía con emisión de rayos X, esta energía y longitud de onda están relacionadas con la composición elemental del espécimen, permitiendo realizar análisis químicos mediante espectroscopia por dispersión de energía y de longitud de onda.
- **Emisión de electrones Auger:** Cuando un electrón es expulsado de un átomo, otro electrón más externo puede saltar hacia el interior para llenar esta vacante, resultando en un exceso de energía. Esta energía extra puede ser

liberada emitiendo un nuevo electrón de la capa más externa. Son utilizados para obtener información sobre la composición de pequeñísimas partes de la superficie de la muestra (Andes, 2015).

4.14 MÉTODO DE ANÁLISIS NUMÉRICO

Los métodos de análisis numérico en ingeniería y ciencias aplicadas se clasifican en tres grupos: diferencias finitas, elementos finitos y elementos de contorno (Cerroloza, 2007).

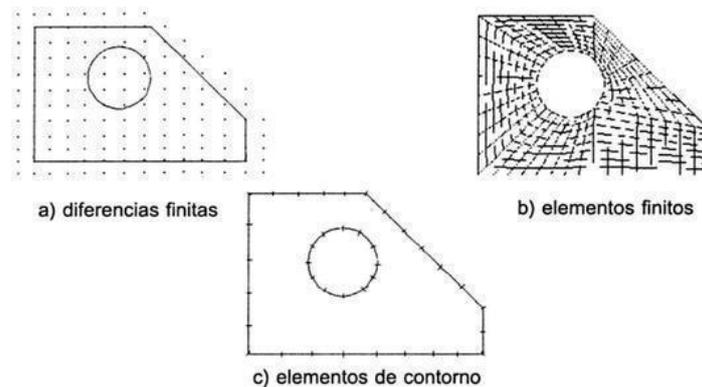


Figura 10. Métodos de análisis numérico (Cerroloza. El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas)

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los métodos de análisis numérico

Diferencias Finitas	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> -Simple de usar -No requiere integración numérica -Se usa en mecánica de fluidos y problemas de turbulencia 	<ul style="list-style-type: none"> -Necesita mallas estructuradas -Difícil representación de la condición en los contornos -No hay nuevas aplicaciones -No es adecuado para dominios infinitos
Elementos finitos	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> -Es de propósito general -Es un método bien establecido No Necesita mallas bien estructuradas -Matrices simétricas 	<ul style="list-style-type: none"> -Necesita mallas en el dominio -No es adecuado para problemas infinitos -Se debe modelar el dominio y el contorno
Elementos de contorno	

Ventajas	Desventajas
-Modela bien las condiciones de contorno	-Necesita soluciones fundamentales
-Adecuado para problemas infinitos	-Está en desarrollo
-Precisión en los valores de contorno	

Cerrolaza. El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas

El método de Elementos Finitos (AEF) se utiliza para analizar la calidad de los productos. Básicamente se reproduce de forma virtual la geometría de la pieza (producto) y es sometida a cargas y restricciones, el software la subdivide en pequeñas partes que se llaman elementos. La división geométrica en pequeños elementos va a permitir que se resuelva el problema complejo en problemas más simples (elementos) y el software podrá realizar la tarea con eficiencia, de esta forma es posible reducir costos, tiempo, equipamiento y accesibilidad para un análisis real. El método propone que un número infinito de variables se cambien por elementos de comportamiento definidos cuyas divisiones pueden tener diferentes formas (triangular o cuadrangular) y como el número de elementos es limitado de ahí su nombre “elementos finitos”.

Los elementos finitos están conectados por puntos (nodos), al conjunto de nodos y elementos se les denomina malla. La precisión de los métodos de elementos finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y tipo de la malla. Cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos de la malla más precisos serán los resultados del análisis (Mirlisenna, 2016).

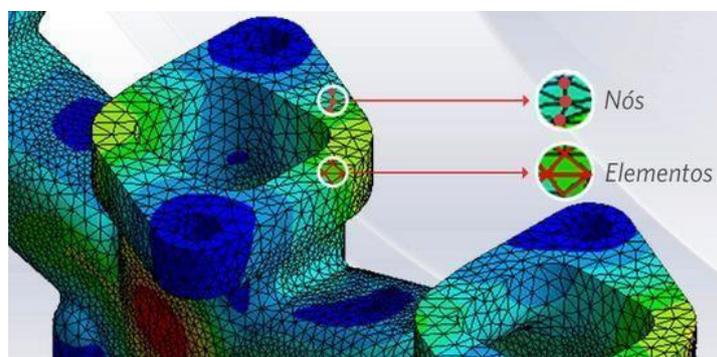


Figura 11. Nodos y Elementos De Una Malla (Fuente Mirlisenna. Ensayo método de elementos finitos)

Para llevar a cabo este tipo de análisis se requiere un Software que permita el diseño del producto y el análisis de propiedades físicas y mecánicas de los elementos. Algunos de los Software que se pueden utilizar para este tipo de análisis son:

- ANSYS: Es un ecosistema de programas que permite el diseño, análisis y simulación por partes de elementos finitos, incluye las fases de malleo, ejecución y post proceso, el programa ejecuta análisis en piezas sometidos a fenómenos físicos usados en ingeniería y mecánica (3dCAD, 2017).
- Abaqus Simulia: Es un programa CAE de cálculo por elementos finitos de propósito general parte de la plataforma SIMULIA de Dassault Systemes. Abaqus Simulia proporciona un portafolio de soluciones de análisis y simulación 3D por elementos finitos (3dCAD, 2017).
- RAEF: Es el software de ingeniería estructural definitivo para análisis lineal y no lineal según el método de los elementos finitos. Gracias al modelado flexible de estructuras compuestas, el software puede aplicarse a todos los posibles trabajos del cálculo y dimensionado de estructuras (Dlubal, 2017).
- Autodesk: La familia de productos de simulación de Autodesk proporciona un conjunto completo de herramientas de software de análisis de elementos finitos y simulación que se integran fácilmente en cada fase del proceso de desarrollo del producto. Desde presión, vibración y movimiento mecánicos a dinámica de fluidos computacional y multifísica, el software de análisis de elementos finitos y simulación de Autodesk proporciona un enfoque ágil, preciso e innovador para resolver retos de diseño complejos (Autodesk, 2017).
- Solidworks: Solidworks Simulation hace parte de la familia de Autodesk y, utiliza el método de formulación de desplazamientos de elementos finitos para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas. La geometría que se analiza se individualiza con elementos tetraédricos (3D), triangulares (2D) y de vigas, y se resuelve con un solver Direct Sparse o iterativo (Dassault Systemes, 2017).
- Nastran: es un programa de cálculo estructural que aplica el método de los elementos finitos (MEF). Fue desarrollado inicialmente por la NASA a finales de los 60 con fondos del gobierno de los EE.UU. para la industria aeroespacial (MSC, 2017).
- Matlab: Es un programa de cálculo numérico orientado a matrices con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Su capacidad para manipular matrices y resolver ecuaciones matriciales hace del mismo un instrumento idóneo para la implementación y desarrollo de un código de elementos finitos (Martínez, 2016).

4.15 ANÁLISIS CICLO DE VIDA (ACV)

Es un proceso objetivo que permite la visión global de todo el ciclo de vida de un producto o proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas, identificando y cuantificando tanto el uso de materia y energía para determinar el impacto de ese recurso y esas emisiones para evaluar y llevar a cabo la práctica de estrategias de mejorar el ambiente. Las normas que se encuentran relacionadas con ACV son la ISO 14040:2007 y la ISO 14044:2011 que permiten establecer los principios del análisis y oportunidades de mejor desempeño. El ACV tiene en cuenta las etapas de extracción de materias primas, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición final del producto (ISM, 2014).

Los Software que se pueden utilizar para este tipo de análisis son los siguientes:

- SimaPro: Permite realizar ACV mediante el uso de bases de datos propias y bibliográficas. Se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos de modo sistemático. La Universidad El Bosque cuenta con licencias disponibles para el uso de este Software.
- Gabi: Permite realizar ACV, Estudios de Ca, análisis de ciclo de costes (ACC). Contiene la base de datos de ACV más grande del mercado, permite utilizar diferentes metodologías de evaluación de impacto. Contiene una herramienta profesional para almacenar, analizar y realizar seguimiento de perfil ambiental de productos.

Según la norma ISO 14040:2007, el ACV es una técnica que determina los aspectos ambientales asociados a un producto: compila las entradas y las salidas del sistema e interpreta y evalúa los impactos ambientales asociados (PREAD). Además, existen distintos niveles de análisis:

- Conceptual: Es el más sencillo, es cualitativo, su finalidad es identificar los impactos más significativos, es muy general, pero permite hacer comparaciones para determinar la estrategia de un producto.
- Simplificado: Toma en consideración datos genéricos y abarca el ciclo de vida de forma superficial, simplifica en etapas y hace un análisis de fiabilidad de los resultados.
- Completo: Es el más avanzado, realiza un análisis en detalle de inventario y de impactos de forma cualitativa y cuantitativa.

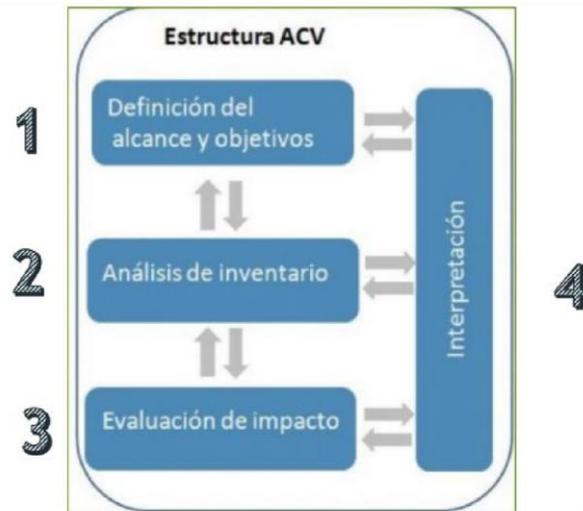


Figura 12. Etapas metodológicas de un ACV, según la ISO 14040:2007 (PREAD. Enfoque de ciclo de vida)

Definición de alcance y objetivos: Definición de objetivos del estudio, aplicación y destinatario. Extensión del estudio (Requisitos del inventario, hipótesis, limitaciones), el alcance debe incluir: Productos a estudiar, funciones del sistema, Definición de unidad funcional (propósito principal, referencia de entradas y salidas), límites (consistentes, justificados, nivel de detalle), metodología de toma de datos, características de los datos y suposiciones.

4.15.1 Análisis de inventario: El inventario son todas las entradas y salidas de cada sistema y que se tiene en cuenta en el producto y en cada proceso, en esta etapa se realiza la cuantificación de ese inventario. Este es el punto de partida para la evaluación de impacto de ciclo de vida, se debe analizar por las etapas del ciclo de vida del producto:

1. Adquisición de materias primas: Actividades necesarias para la adquisición de materias primas.
2. Manufactura, procesado y formulación: Comprende cada etapa desde que se introduce la materia prima en el proceso de transformación, hasta el producto final.
3. Distribución y transporte: Movimiento de materiales y energía en las diferentes etapas del ciclo de vida.
4. Uso-Reutilización-Mantenimiento: Esta etapa se aplica desde la distribución del producto hasta que se vuelve residuo.
5. Gestión de residuos: Mecanismos de tratamiento de residuos, se estudian las posibles alternativas de gestión.

4.15.2 Evaluación del impacto: La norma ISO 14042:2000 es la que reglamenta la evaluación de impacto en un ACV. Aunque el software permita la evaluación de impacto a través de diversos métodos, todos cumplen con:

1. Clasificación: Agrupar cargas ambientales por consumo de recursos y generación de emisiones y residuos.
2. Normalización: Calcula la contribución de cada compuesto detectado en el inventario, traslación de resultados a unidades comparables y que permitan su interpretación; con esto se obtiene un perfil ambiental de ciclo de vida.
3. Valoración: Se determina qué efecto causa menor impacto.

Tabla 7. Ventajas y desventajas de los principales métodos de evaluación de impacto

Método	Ventajas	Desventajas
CML 2000 Baseline	.Indicadores de impacto diseñados por el Centro de Estudios Medioambientales (CML).	.No usa categorías de daño .Puede generar incertidumbres significativas
Eco Indicador 99	.Cálculo de impacto ambiental de un proceso .Enfoque para prácticas agrícolas .Asignación de coeficientes de ponderación por proceso y material	.Su interpretación es subjetiva de acuerdo al objetivo o problema de aplicación.
Unidad funcional	.Medida de rendimiento funcional del producto. .Facilita la comparación entre sistemas.	.La comparación que realiza es entre tecnologías del mismo componente.
ReCipe	.Enfoque orientado al problema.	.Aplicado en normatividad Europea, lo que afecta en la bases de datos para uso Americano.

Fuente R, Charris. Principios y estrategias de la gestión ambiental.

4.15.3 Interpretación: Evaluación sistemática de las necesidades y oportunidades para reducir las cargas ambientales. Puede incluir medidas cualitativas, cuantitativas, mejoras, cambios en el proceso, producto, diseño, materias primas y gestiones.

4.16 ESTUDIO DE VIABILIDAD (BUSINESS SCHOOL, 2016)

Es un elemento indispensable en la ejecución de un proyecto, analizar la viabilidad de un proyecto importante para poder planificarlo y concluirlo, pues decide si aporta los beneficios esperados. Para estudiar la viabilidad de un proyecto se requiere:

- Identificar las limitaciones y restricciones.

- Detectar las oportunidades.
- Analizar el modo de funcionamiento actual.
- Definir los requisitos del proyecto.
- Evaluar las distintas alternativas.
- Llegar a un acuerdo sobre la línea de acción.

5. METODOLOGÍA

5.1 OBTENCIÓN DEL MATERIAL

Para la obtención del material se hizo el seguimiento del proceso de producción, pues fue necesario hacer el enlace entre las diferentes entidades y profesionales que hacen parte del proceso.

En primer lugar, se contactó con “La pequeña granja de mamá Lulú” en el departamento de Quindío, donde cuentan con artesanos que tienen la experticia para la extracción de las fibras del tallo de la planta de *Guadua angustifolia* y llevar a cabo un tejido de la fibra en forma cruzada (Figura 13), del cual se obtienen cuatro mallas de 30x60x0.5cm que se enviaron posteriormente a la ciudad de País Vasco en España con el fin de completar la fabricación del biocomposito en la Universidad del País Vasco. Allí se realizaron las pruebas de impregnación del material con el método RTM usando resina bioepoxi SuperSap 100/1000, pero se presentaron inconvenientes en el proceso, pues se produjo una gran cantidad de burbujas y baja impregnación debido a los espacios interfibras por su forma heterogénea y muy poco plana. Así que se decidió una forma de rehacer los tejidos que no requirieron la superposición de fibras y se puso la disposición de fibras paralelas unidas mediante hilos de nylon de baja densidad (Figura 14); la impregnación obtenida con ese tipo de tejido y conservando el tipo de resina fue exitosa, pues además de ser veloz, se logró una impregnación de calidad que no muestra grietas ni burbujas, de esta forma se concluye la fabricación del material con el tejido de fibra disponible (Figura 15).



Figura 13. Tejido de fibra cruzado (Autores)



Figura 14. Tejido de fibras paralelas



Figura 15. Proceso RTM en tejido de fibras paralelas

5.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Se llevaron a cabo dos ensayos que permitieron conocer las propiedades mecánicas que identificaron la resistencia a esfuerzos de tracción y flexión que puede soportar el material. Para ambos ensayos se implementó una Máquina Universal de Ensayos SHIMADZU (Figura 16) ubicada en la Universidad de Pamplona en Pamplona - Norte de Santander.



Figura 16. Máquina Universal de Ensayos SHIMADZU (Autores)

5.2.1 Ensayo de tracción: Para este ensayo se aplicó la norma ASTM D3039, así que se cortaron cinco probetas de tamaño 300x25x3,7mm. El ensayo consistió en someter cada una de las probetas a un esfuerzo axial que va aumentando con el tiempo hasta que se produce la rotura o falla de la probeta, con esto es posible medir la resistencia que tiene el material a la fuerza de tracción aplicada en la dirección de disposición de las fibras.

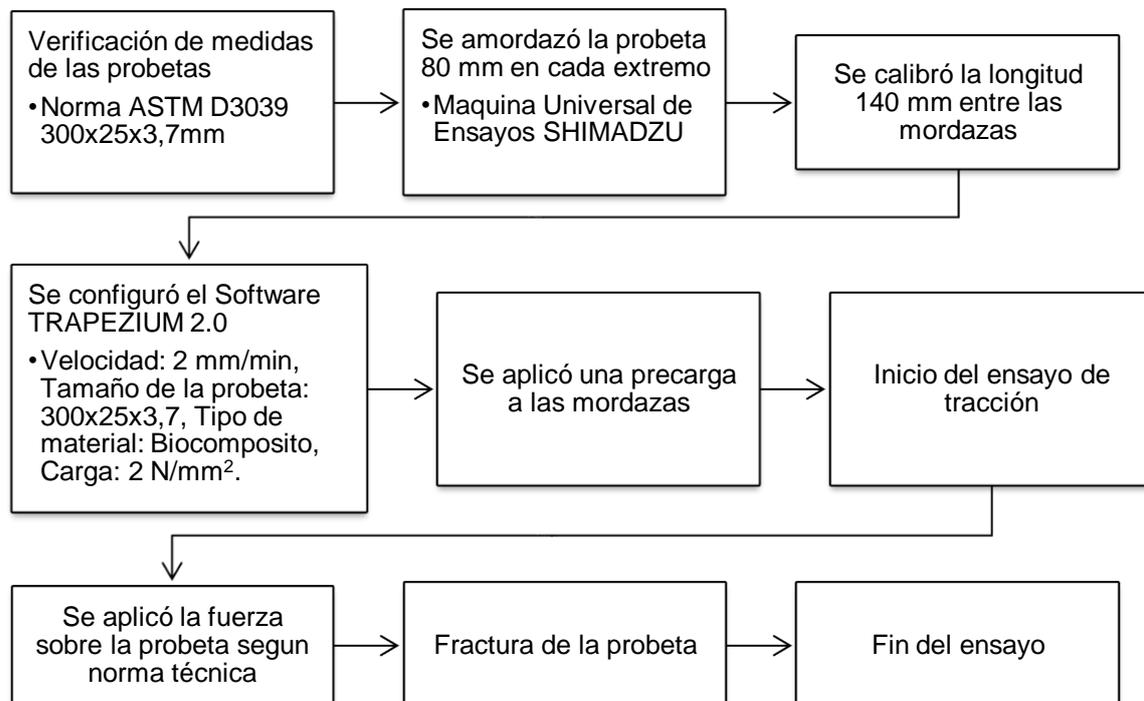


Figura 17. Metodología de ensayo mecánico de tracción (Autores)

Para ejercer el ensayo de tracción, inicialmente se verificaron las medidas de las probetas para poder utilizarlas en la Máquina Universal y se procedió a ubicar las probetas en la Máquina Universal de Ensayos haciendo que la mordaza superior e inferior sujetarán 80 mm en cada extremo de las probetas y se estableció una longitud calibrada de 140 mm entre ambas mordazas como se muestra en la Figura 18.

El siguiente paso fue configurar el software TRAPEZIUM 2.0, con el que cuenta el equipo, la Figura 19 muestra la interfaz del programa donde se calibro la máquina y se establecieron los parámetros que indica la norma:

- Velocidad: 2 mm/min.
- Tamaño de la probeta: 300x25x3,7mm.
- Tipo de material: Material biocompuesto.
- Carga: 2 N/mm².



Figura 18. Probeta sujeta en las mordazas de la Máquina Universal de Ensayos (Autores)

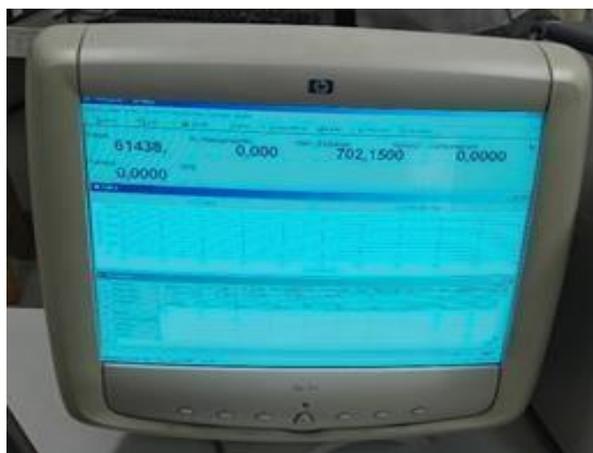


Figura 19. Interfaz TRAPEZIUM 2.0 (Autores)

Posteriormente, se aplicó una precarga a las mordazas para cada uno de los ensayos, lo cual dio inicio al ensayo por el sensado de la primera resistencia al esfuerzo. Una vez comenzó el ensayo, la mordaza que se encuentra en el cabezal móvil se empezó a desplazar en dirección opuesta a la otra con la velocidad previamente establecida, haciendo que la probeta se alargue en la dirección que es aplicada la fuerza, hasta que su resistencia sea nula debido a la generación de un corte o falla en el material. Una vez se detectó la falla, la Máquina Universal fue capaz de medir el alargamiento que se produjo en la probeta y calculo la resistencia del material a fuerzas de tracción.

5.2.2 Ensayo de flexión: Para este ensayo se aplicó la norma ISO 14125, así que se recortaron de igual forma cinco probetas de 120x16x3,7mm. Este procedimiento consistió en someter cada una de las probetas a un esfuerzo de flexión con tres puntos de apoyo, donde los extremos de la probeta se encuentran apoyados en un par de cilindros distanciados a 80 mm y en su centro se desplaza un cabezal en dirección perpendicular a la disposición de la fibra con la velocidad establecida hasta que se produjo la falla o flexión de 90° del material (Figura 21).

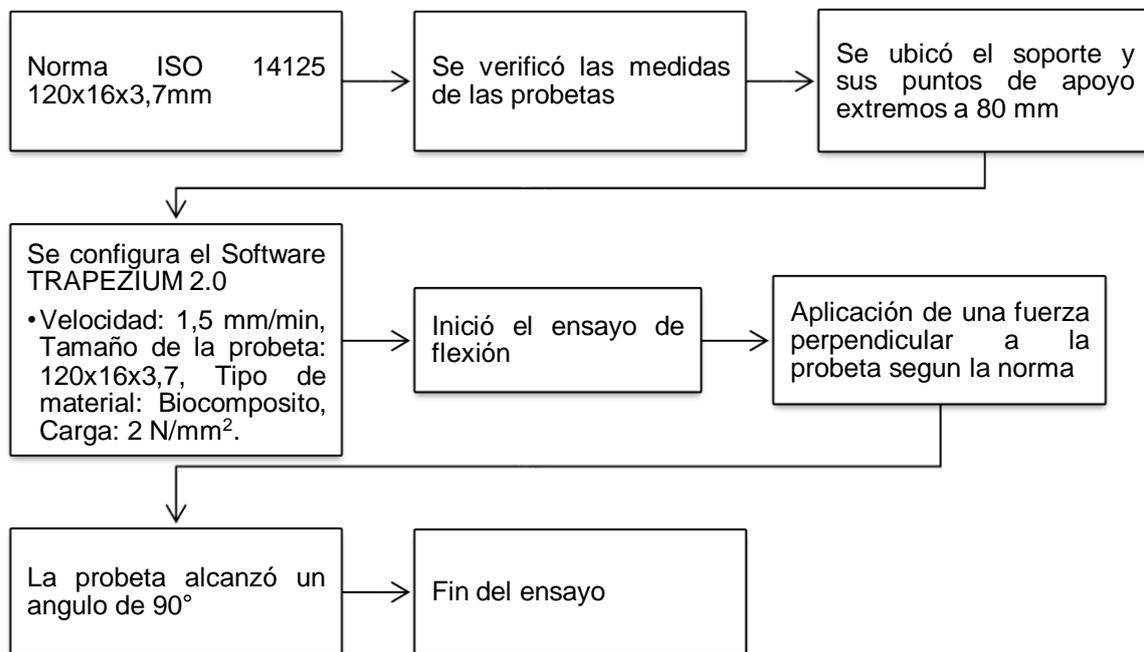


Figura 20. Metodología ensayo de flexión. (Autores)



Figura 21. Disposición de la probeta en Prueba de flexión (Autores)

De la misma forma que el ensayo anterior, se configuró el Software TRAPEZIUM 2.0, con el que cuenta la máquina, se establecieron los parámetros que indica la norma en cuanto a velocidad (1.5mm/min) y se procedió con el movimiento del cabezal hacia el centro de la probeta, que se empezó a doblar de acuerdo al tiempo que llevaba el ensayo, detectando la resistencia que el material tenía a la flexión.

5.3 ANÁLISIS DE MEB

La ejecución de este procedimiento se llevó a cabo con las probetas resultantes del procedimiento anterior, donde se evidenció la disposición de las fibras en el corte ejercido por los esfuerzos y la impregnación de la resina en el tejido de fibra.

La toma de imágenes mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) estuvo a cargo del Laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga, se utilizó un microscopio de barrido electrónico marca TESCAM, el cual es capaz de infiltrarse en el material a una profundidad de 2 μm y permitió tener una visibilidad de hasta 1'000.000X de aumento. Para llevar a cabo el procedimiento se debió asegurar:

- Que fuera una muestra sólida y seca, con lo cual se cumplió correctamente.
- Que fuera un material conductor para permitir el flujo de los electrones en el material. Debido a que no es así, se debió llevar a cabo un método de recubrimiento metálico del que se encargó el mismo laboratorio que realizó el procedimiento MEB y consistió en la creación de una capa delgada de oro en su superficie mediante bombardeo iónico con ayuda de un equipo de recubrimiento marca CRESSINGTON (Figura 22).



Figura 22. Equipo de recubrimiento marca CRESSINGTON (Autores)

- Las muestras tuvieron un tamaño de 10x10mm, así que los cortes se llevaron a cabo con una caladora común. (Procedimiento a cargo del laboratorio).
- Un laboratorio que cuente con aire acondicionado, humedad relativa mayor al 70% y que sea libre de vibraciones.

Para hacer el análisis de las imágenes que se obtuvieron mediante MEB, en primer lugar, se debió separar por tipo de muestra (Flexión y tracción), se hizo una visión general de cada una con cada uno de los aumentos (20X, 100X, 200X, 1.000X, 5.000X, 10.000X y 50.000X). Finalmente, se realizó una observación detenida y analítica para cada uno de los aumentos iniciando por el menor, de esta forma se conoció la orientación de cada una de las partes que se observaron.

5.4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS (AEF)

Este análisis permitió conocer el comportamiento mecánico del material en una aplicación real, mediante la reproducción virtual del producto se evaluó la aplicabilidad del material en una férula para el tratamiento del Síndrome del Túnel Carpiano. Esta prueba se llevó a cabo conociendo la ficha técnica del material el cual permitió identificar las propiedades y restricciones del comportamiento mecánico del biocomposito.

Se utilizaron dos softwares para este análisis, Ansys RV16 y SolidWorks debido a la manipulación de los mismos, la accesibilidad en la Universidad El Bosque y enfoque de análisis que ofrecen. Cabe resaltar que Ansys RV16 fue utilizado para la simulación de las correas de sujeción en la férula mientras que SolidWorks se utilizó para la simulación de los esfuerzos a los que es sometida la férula debido a los movimientos biomecánicos de la muñeca. Se utilizó un programa externo llamado CES EduPack el cual proporcionó las propiedades mecánicas del HDPP (polipropileno de alta densidad) utilizado normalmente en CIREC para la fabricación de férulas de antebrazo.

En primer lugar, antes de proceder con el software se debió determinar la densidad (ρ) del material a partir de la masa (m) y volumen (v) de las probetas con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v} \rho_B = \rho_G(\%_G) + \rho_R(\%_R)$$

Donde:

B=Biocomposito
G=Fibra de guadua
R=Resina

Una vez se obtuvo el valor de la densidad del material, fue posible llevar a cabo el procedimiento descrito en la Figura 23.



Figura 23. Metodología de AEF

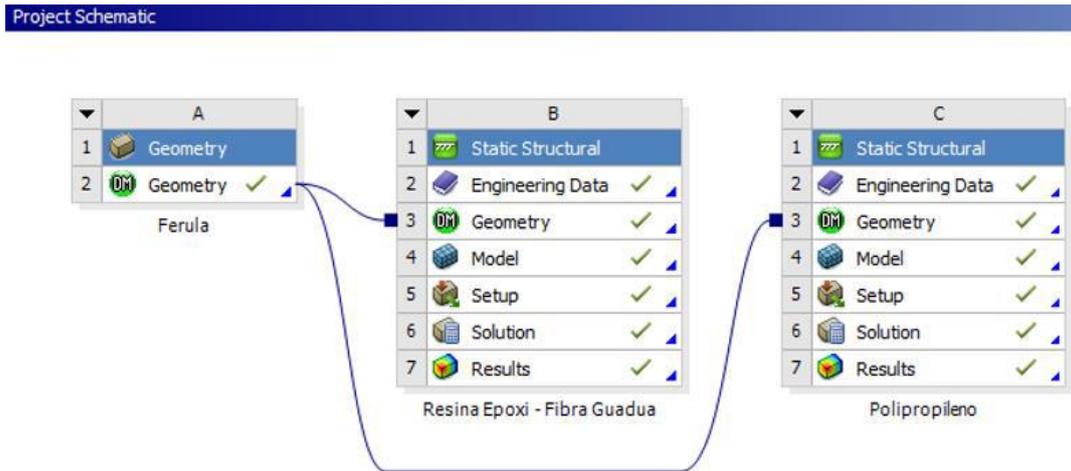


Figura 24. Workbench de Ansys (Autores)

En la Figura 24 se muestra el Workbench de Ansys RV16, el cual permite desplegar gráficamente la simulación y la relación mecánica que fue empleada en el AEF.

Outline of Materiales Cristhian					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Materiales Cristhian	Add	source		Description
2	Material				
3	Polipropileno	+	+	=	
4	Resina_Epoxi-Fibra_Guadua	+	+	=	

Figura 25. Base de datos de materiales de ANSYS R16 (Autores)

La Figura 25 muestra la interfaz en la cual se realiza la selección del material que fue utilizado para el AEF, se puede observar que se encuentran los componentes del biocomposito y del HDPP.

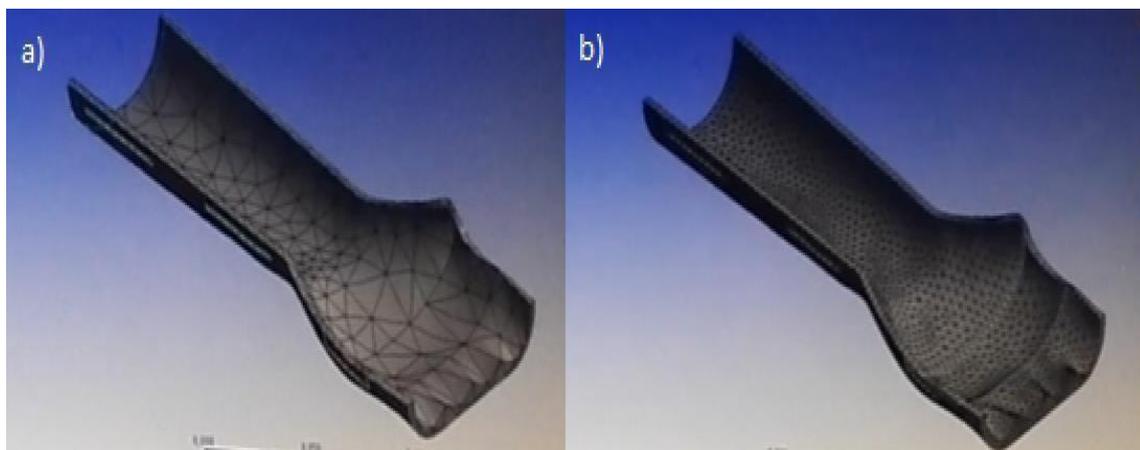


Figura 26. Optimización de la malla. Donde: a) Mallado brusco y grueso; b) Mallado fino (Autores)

Se observa en la figura 26 la optimización del mallado que se realizó a la pieza en Ansys RV16, la imagen a la izquierda muestra un mallado brusco y poco efectivo debido a la relación entre cantidad de elementos vs nodos mientras que al lado derecho se muestra el mallado optimizado después de variar las características y lograr la mejor relación.

5.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

De acuerdo a la norma ISO 14040, inicialmente se definió un objetivo por el cual se realizó el análisis y a partir de esto se definieron las fases que se tuvieron en cuenta en el estudio. En este caso, el objetivo fue comparar el impacto ambiental que ocasiona la transformación de HDPP y el biocomposito para convertirse en una férula de antebrazo para tratamiento del Síndrome del Túnel Carpiano y por lo tanto, la fase a tener en cuenta fue precisamente el procesado del material para obtener el producto final.

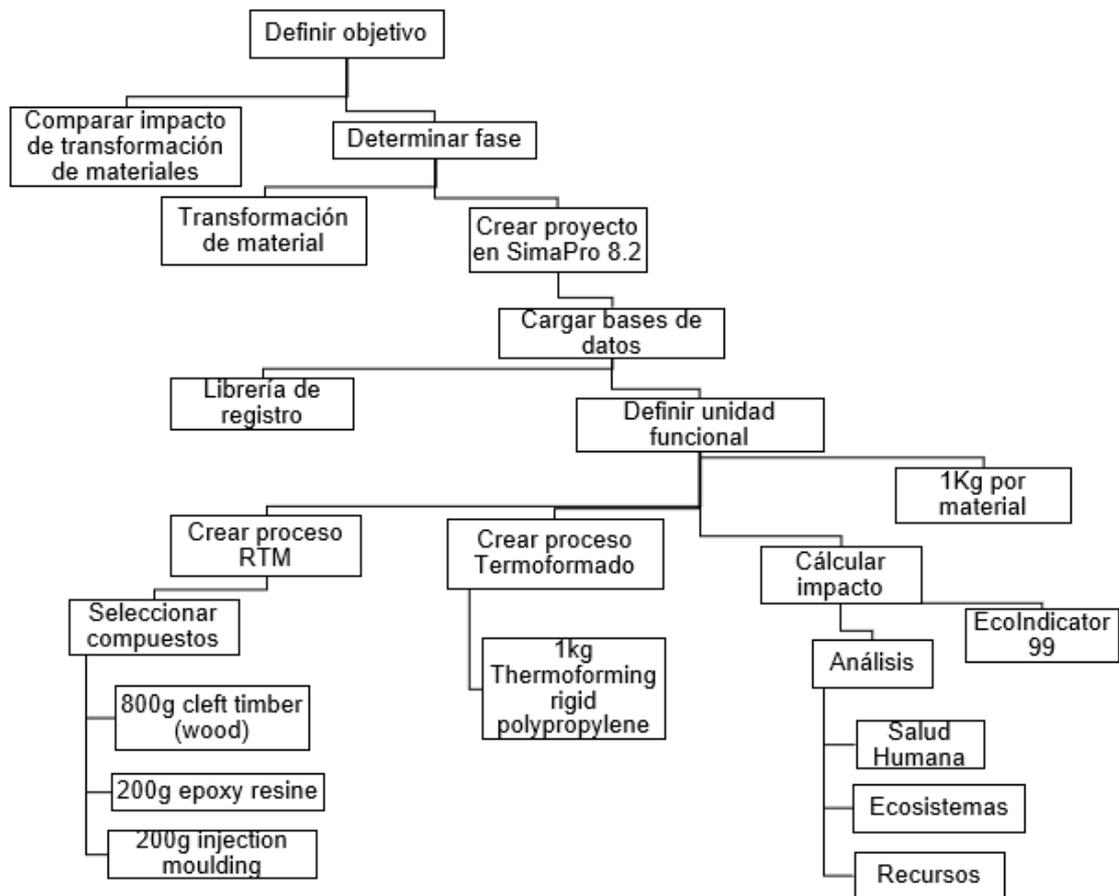


Figura 27. Metodología de ACV

Para ejecutar el ACV se utilizó el Software SimaPro debido a su disponibilidad en la Universidad El Bosque y su amplitud en base de datos. El procedimiento requirió conocer los datos precisos de consumo de energía y recursos en la etapa que se analizó para llevarlo a cabo:

1. Creación de proyecto: Consistió en la creación de una nueva base de datos que incluye las librerías que ya vienen contenidas en el Software, para mantener el registro de lo realizado.
2. Creación de los procesos de transformación de ambos materiales: En este paso de debió ir a la pestaña de “Procesos”, donde se encuentra la base de datos de los procesos con que cuenta el Software.
 - Al crear un nuevo proceso que incluya el procedimiento RTM con fibra de madera, se seleccionó como material “cleft timber (wood)” y se ensambló al proceso “injection moulding”, que contiene toda la librería de los recursos y procedimientos que se llevaron a cabo en este proceso.
 - El proceso que describe la termoformación del HDPP se encuentra en la base de datos como “Thermoforming rigid polypropylene” e incluye los procedimiento y recursos que se llevaron a cabo en este proceso.
3. Cálculo de impacto: Ir a la pestaña de “Cálculo de impacto”, dar un nombre al análisis, escoger el método de normalización del cálculo “Eco Indicator 99” debido a su enfoque ambiental y ponderación ordenada de los procesos, se seleccionaron los procesos previamente creados para generar el cálculo.
4. Análisis: Para llevar a cabo un análisis conceptual del ciclo de vida de los materiales, se asignaron categorías al grupo de parámetros los que evalúan el impacto entre: Salud humana, Ecosistemas y Recursos. De tal forma que los grupos quedaron conformados como se relaciona en la Tabla 8.

Tabla 8. Categorías asignadas a los parámetros evaluados por ACV

Salud Humana	Ecosistemas	Recursos
Cancerígenos	Ecotoxicidad	Minerales
Resp. Orgánicos	Acidificación	Combustibles fósiles
Resp. Inorgánicos	Uso del suelo	
Cambio Climático		
Radiación		
Capa de Ozono		

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 FABRICACIÓN DEL MATERIAL

Debido a que el método RTM se llevó a cabo con dos diferentes tejidos de la fibra, uno cruzado y el otro unidireccional, la Figura 28 muestra el resultado de la forma de la fibra involucrada en ambos tejidos, lo que nos permite reconocer que la velocidad de impregnación de la resina sobre el tejido unidireccional aumentó debido a su forma plana, pues el trayecto que debe recorrer es libre de obstáculos por curvaturas en la fibra y los espacios vacíos que requieren ser rellenados se reducen y además se disminuye el consumo de resina durante el proceso



Figura 28. a) Fibra extraída de tejido cruzado; b) Fibra extraída del tejido unidireccional (Autores)

La Figura 29 muestra el resultado final de la fabricación del biocomposito con una fibra en tejido unidireccional libre de burbujas o grietas que pudieran afectar la calidad de los análisis que se realizarán a continuación.



Figura 29. Biocomposito reforzado con fibra de Guadua angustifolia (Autores)

6.2 ENSAYOS MECÁNICOS

Para realizar los ensayos mecánicos, fue necesario cortar el material en probetas de dirección axial a las fibras de acuerdo a las normas ASTM 3039 e ISO 14125, como se muestra en la Figura 30. De acuerdo a lo descrito en el numeral 5.2 el final de las pruebas se alcanzó cuando se produjo la falla de la probeta, como es posible observar en las Figuras 31 y 32 que muestran las probetas del material al terminar los procedimientos de tracción y flexión respectivamente en la Máquina Universal de Ensayos.



Figura 30. Probetas cortadas con la norma ASTM D3039



Figura 31. Falla en la probeta por esfuerzo a tracción (Autores)



Figura 32. Probeta luego de ensayo de flexión (Autores)

Las Figuras 31 y 32 muestran las probetas utilizadas en los ensayos de tracción y flexión, donde se puede ver que para el ensayo de tracción se alcanzó el punto de fractura, mientras que para el ensayo de flexión se evidenció que la probeta se dobló 90° lo que determinó el final de las pruebas.

El Software TRAPEZIUM 2.0 mostró los resultados obtenidos en cada prueba, donde se verificó el comportamiento y las propiedades del material, el software es capaz de generar una gráfica de Esfuerzo vs Deformación durante cada una de las pruebas de tracción y flexión como se muestra en las Figuras 33 y 34, donde es posible observar la zona elástica, zona de fluencia, zona plástica y fractura; cada una de estas zonas proporciona los datos que se hayan consignados en la Tabla 6.

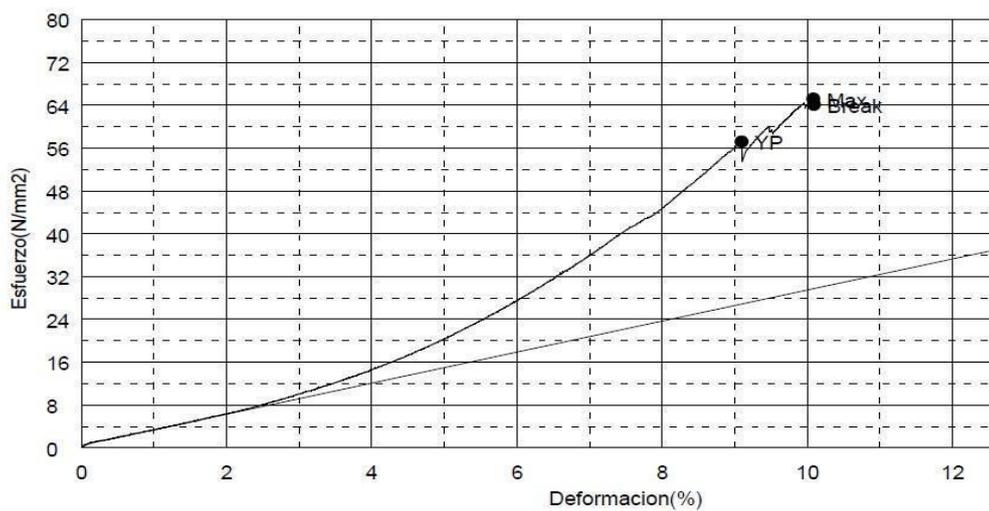


Figura 33. Gráfica Esfuerzo vs Deformación a tracción del biocomposito (Autores)

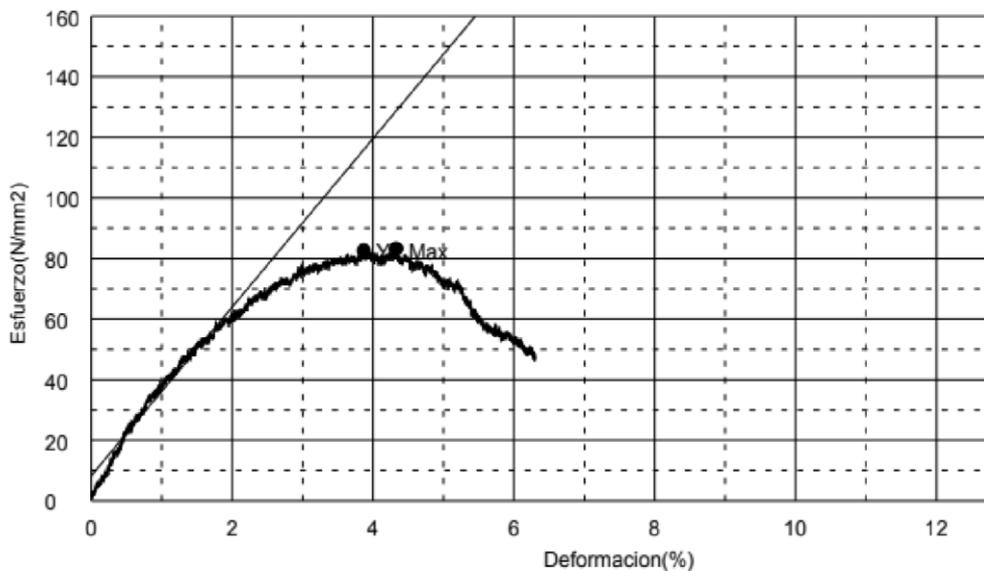


Figura 34. Gráfica de Esfuerzo vs Deformación a flexión del biocomposito (Autores)

De los resultados generados por el software después de haber realizado las pruebas y junto a la interpretación de las gráficas, se obtuvieron las características que se presentan en la Tabla 9, donde se evidencian las propiedades mecánicas (módulo de Young, esfuerzo máximo y deformación).

Tabla 9. Propiedades mecánicas del biocomposito a los diferentes esfuerzos a los que fue sometido

Propiedad	Tracción	Flexión
Módulo de Young	0,3836 GPa	2,8492 GPa
Esfuerzo Máximo	59,3822 MPa	79,9347 MPa
% Deformación	8,36%	3,77%

La Tabla 10 permite tener una visión de las propiedades físicas de los componentes del biocomposito, con el fin de demostrar y comparar con los resultados obtenidos de la tabla anterior, se evidencia que el comportamiento mecánico del biocomposito se debe a la combinación entre los materiales que lo componen, pues la resina funciona como recubrimiento impermeable de la fibra de guadua, le proporciona dureza y mantiene las fibras unidas en su posición más rígida que la fibra sin la resina. Por otro lado, se encuentra la fibra de guadua que por su composición de lignina y fibrosa disminuye la densidad del material y lo hace incluso flotante en el agua, aumenta el porcentaje de deformación antes de perturbarse como muestra de soporte y más aún en la necesidad de mantener la posición de la mano en una sola posición.

Tabla 10. Propiedades de los componentes del biocomposito (Nava, Siqueiros, González, 2018)

Propiedad	Resina Epoxi	Guadua angustifolia	Biocomposito
Densidad (g/cm ³)	1,25	0,7	0,93
Módulo de Young (GPa)	3,2	26,61	0,38
Deformación (%)	5,15	2,4	6,06
Esfuerzo máximo (MPa)	156,5	190	69,66
Módulo a flexión (GPa)	3,4	5,4	2,8

Fuente Nava Gastelum

En la Tabla 11 se expone la comparación de las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos realizados al biocomposito junto con los datos del HDPP que es el material que se utiliza en CIREC para la fabricación de férulas para el tratamiento del síndrome del túnel carpiano.

Tabla 11. Comparación de propiedades mecánicas entre HDPP y biocomposito

Magnitud	Polipropileno	Biocomposito
Módulo de Young	3,7 GPa	0,38 GPa
% Deformación	0,39	6,06
Esfuerzo Máximo	26,7 MPa	69, 66 MPa
Módulo a flexión	3,7 GPa	2,85 GPa

De acuerdo a la Tabla 11 es posible observar las diferencias que tienen los dos materiales. En primer lugar, se nota que por el Módulo de Young del HDPP es un material con gran módulo elástico que se debe a su composición polimérica, lo que le permite tener mayor flexibilidad y por lo tanto una zona plástica bastante amplia. Aspecto con el que no cuenta el biocomposito debido a sus fibras de refuerzo, lo que le proporcionan mayor rigidez, pero disminuyen su capacidad plástica en la dirección de las fibras.

La deformación a rotura en el HDPP es mucho menor que la del biocomposito debido a la existencia de fibras y composición viscosa de la resina que este contiene, lo que permite que en una prueba de flexión pueda deformarse en gran medida antes de llegar a la falla debido al soporte y flexibilidad que ofrece la fibra de *Guadua angustifolia*, es por este motivo que se utiliza en estructuras de construcción, pues en situaciones de movimientos telúricos es capaz de absorber la energía y flexionarse la suficiente antes de derrumbarse. Por otra parte, la fibra de guadua hace que el biocomposito sea más resistente a fracturas por flexión, siendo este un factor muy importante en la aplicación de una férula para el tratamiento del Síndrome del Túnel Carpiano, debido al movimiento que ejerce la muñeca y el esfuerzo que efectúa sobre el material en aplicación real.

Como se ha dicho anteriormente, el biocomposito gracias a sus fibras de refuerzo le permiten soportar mayores cargas a flexión que el HDPP. Por lo tanto, el esfuerzo máximo en biocomposito es mayor en la aplicación de férulas de antebrazo, pues el esfuerzo máximo al que será sometido constantemente será a flexión (110N aproximadamente en condiciones no patológicas) generada por los movimientos de la muñeca y dedo pulgar.

Por último, se observa el módulo a flexión de ambos materiales, el cual depende de la sección transversal de cada uno, en el caso del HDPP que se encuentra formada únicamente por matriz polimérica, la resistencia que tiene a los esfuerzos de tracción es mayor por su sección plástica y por ser un material isótropo. Pero el biocomposito por su contenido de fibras, mantiene una alta resistencia a los esfuerzos de flexión y de esta forma se logran valores cercanos entre ambos materiales.

6.4 ANÁLISIS DE MEB

Las imágenes obtenidas mediante el Procedimiento de MEB se muestran en las Figuras 35 a 37 donde se evidencian las zonas de fractura debido a los ensayos de tracción y las Figuras 38 a 44 para los ensayos de flexión.

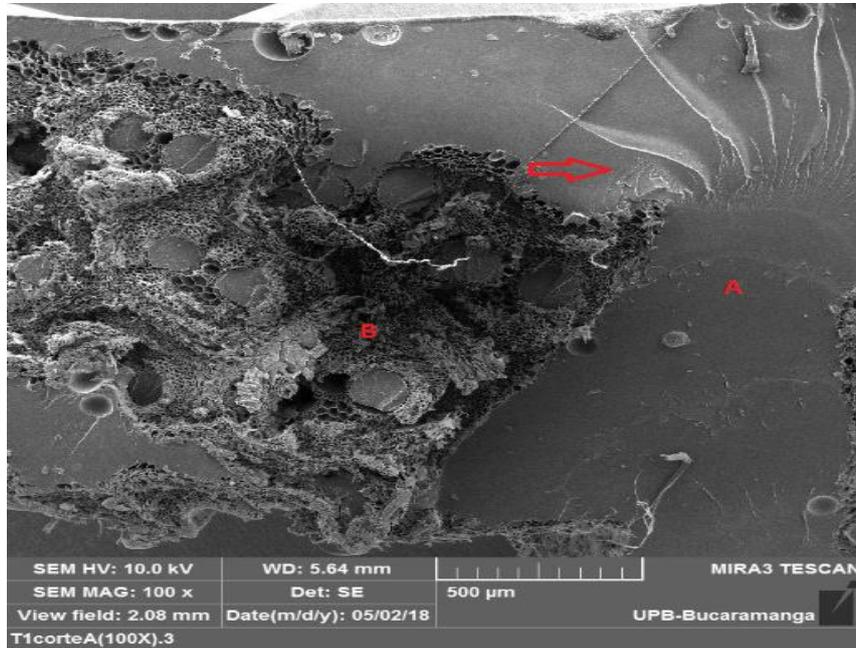


Figura 35. Micrografía de zona de fractura por ensayo de tracción con resolución de 100X y escala de 500 μm. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de Guadua angustifolia (Autores)

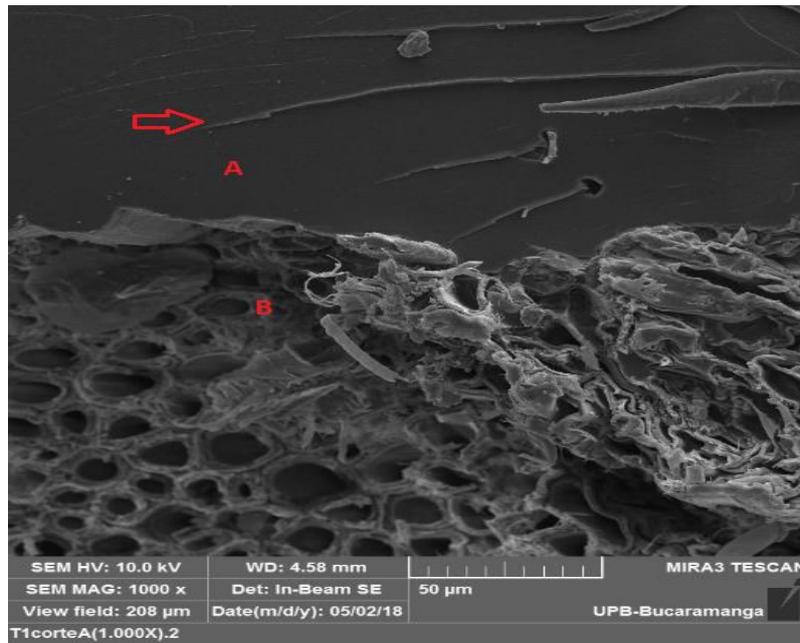


Figura 36. Micrografía de zona de fractura por ensayo de tracción con resolución de 1000X y escala de 50 μm. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de Guadua angustifolia (Autores)

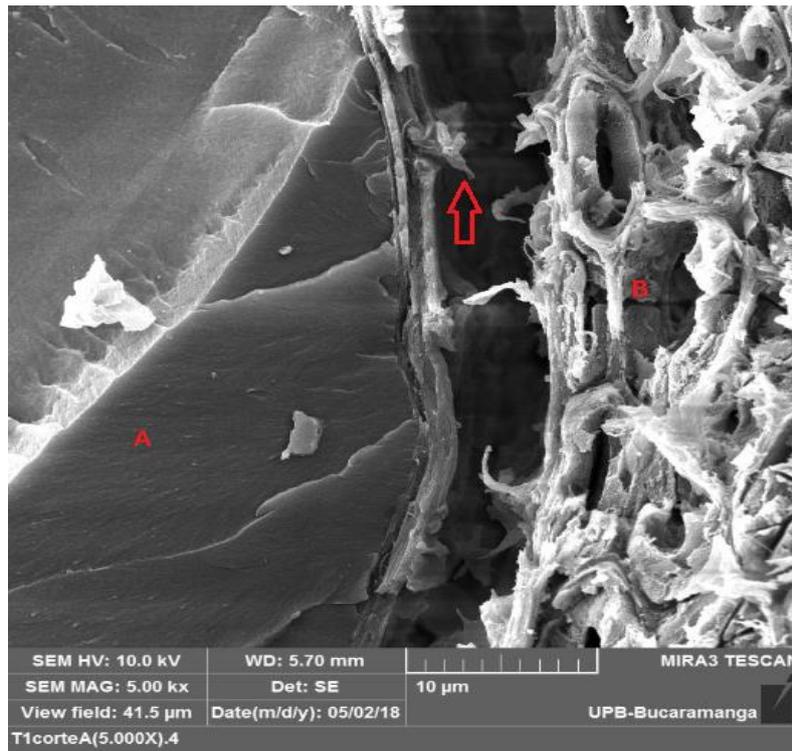


Figura 37. Micrografía de zona de fractura por ensayo de tracción con resolución de 5000X y escala de 10 μm. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de Guadua angustifolia (Autores)

Al observar las imágenes de la zona de fractura por ensayo de tracción, es posible observar, en primer lugar, la polaridad de las partes que componen el biocompuesto pues tienen muy buena adhesión en su interacción física, además de la organización de las fibras de la guadua debido a la impregnación, donde las más pequeñas se ubican en la interfase matriz-refuerzo. En cuanto a los detalles de la fractura, la Figura 35 señala las marcas de la fisura en la resina, y debido a la serie de burbujas que se formaron en la zona externa del material en la fabricación, se deduce que el corte inicia en esta zona de la transversal, la fisuras luego se forman hacia el centro donde posteriormente se fracturaron las fibras de guadua que se encuentran en la zona interna y que tienen mayor resistencia a la tracción que la resina.

Por su parte, la Figura 36 revela la dirección radial de las fisuras de la resina y, por último, la Figura 37 se especifica en la interfaz, donde en el momento de la tensión se mantiene la adhesión, pero es la fibra la que se rompe muy cerca a la interfaz debido al desplazamiento de las fibras en el momento de la impregnación con la resina y se evidencia el rompimiento de las fibras por separación de las microfibrillas.

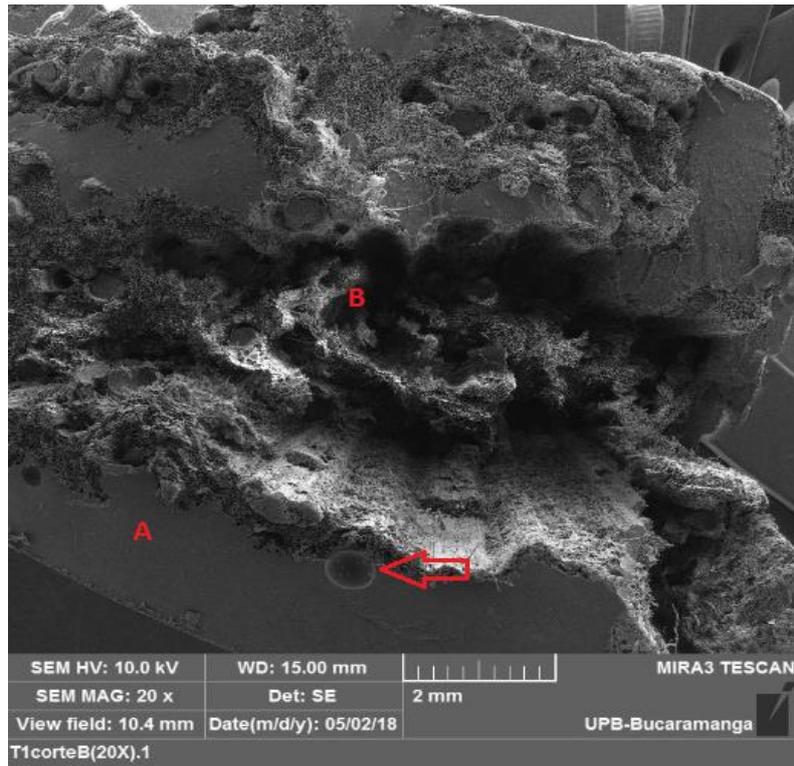


Figura 38. Micrografía de zona de fractura por ensayo de flexión con resolución de 20X y escala de 2mm. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de Guadua angustifolia (Autores)

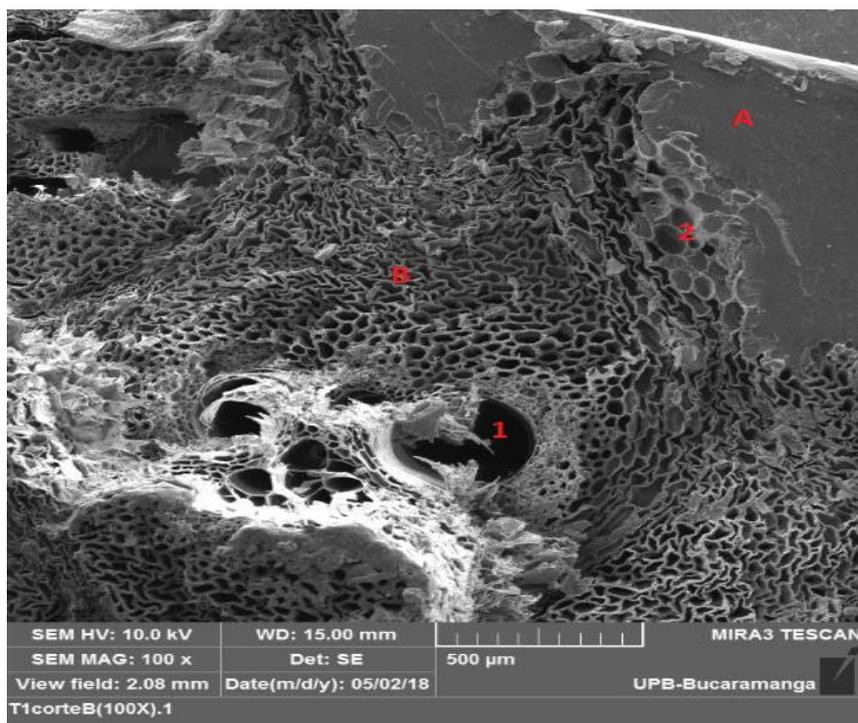


Figura 39. Micrografía de zona de fractura por ensayo de flexión con resolución de 100X y escala de 500um. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de Guadua angustifolia (Autores)

Las imágenes que muestran la fractura por ensayo de flexión nuevamente permiten ver la adhesión de los componentes del biocomposito y la distribución de las fibras, la Figura 38 señala una pequeña burbuja que se formó muy cerca a la interfaz y que puede influir en las fisuras del material debido a la tensión aplicada.

En cuanto a los detalles de la fractura, la Figura 39 permite ver la deformación de las fibras de guadua debido a la influencia de la tensión perpendicular a su disposición, la zona 1 muestra la especificación de la distribución de las fibras, donde las más grandes se ubican en el centro del conjunto y son rodeadas por las cada vez más pequeñas; por su parte, la zona 2 muestra algunos poros donde la impregnación de la resina superó la unión de las microfibrillas y se insertó en las fibras, lo que aporta a la rigidez del biomaterial y su fortalecimiento a la resistencia mecánica, esto a su vez aumenta el volumen de resina que se pueda inyectar en la fabricación del material, lo que aumentaría su masa y densidad.

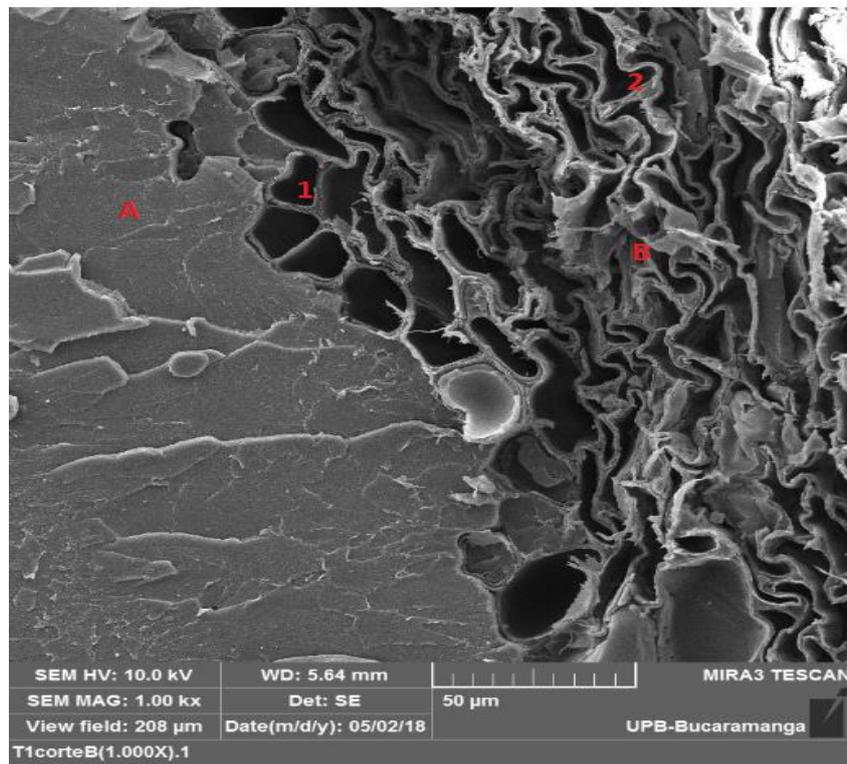


Figura 40. Micrografía de zona de fractura por ensayo de flexión con resolución de 1000X y escala de 50 μ m. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de Guadua angustifolia (Autores)

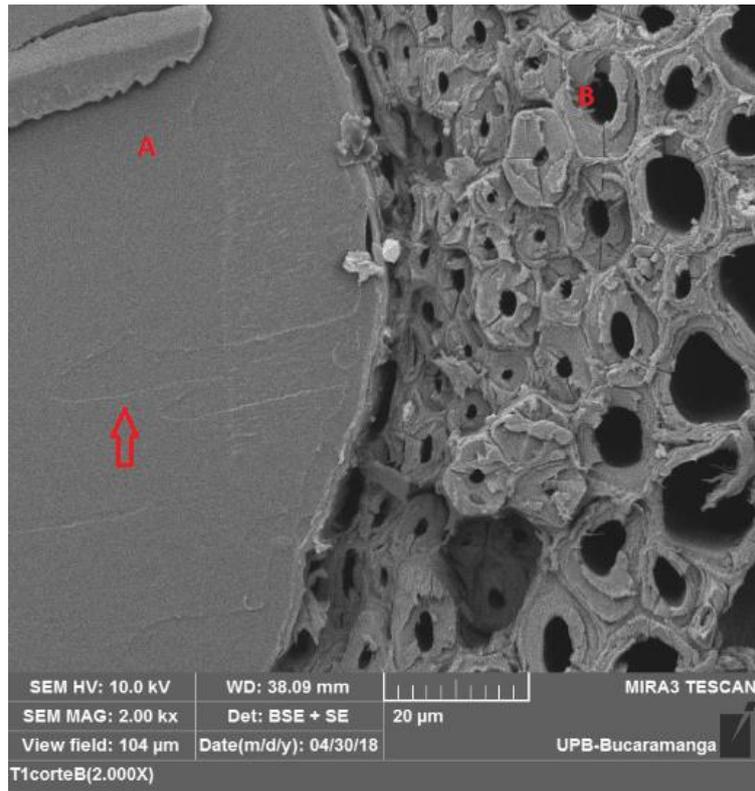


Figura 41. Micrografía de zona de fractura por ensayo de flexión con resolución de 2000X y escala de 20 µm. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de Guadua angustifolia (Autores)

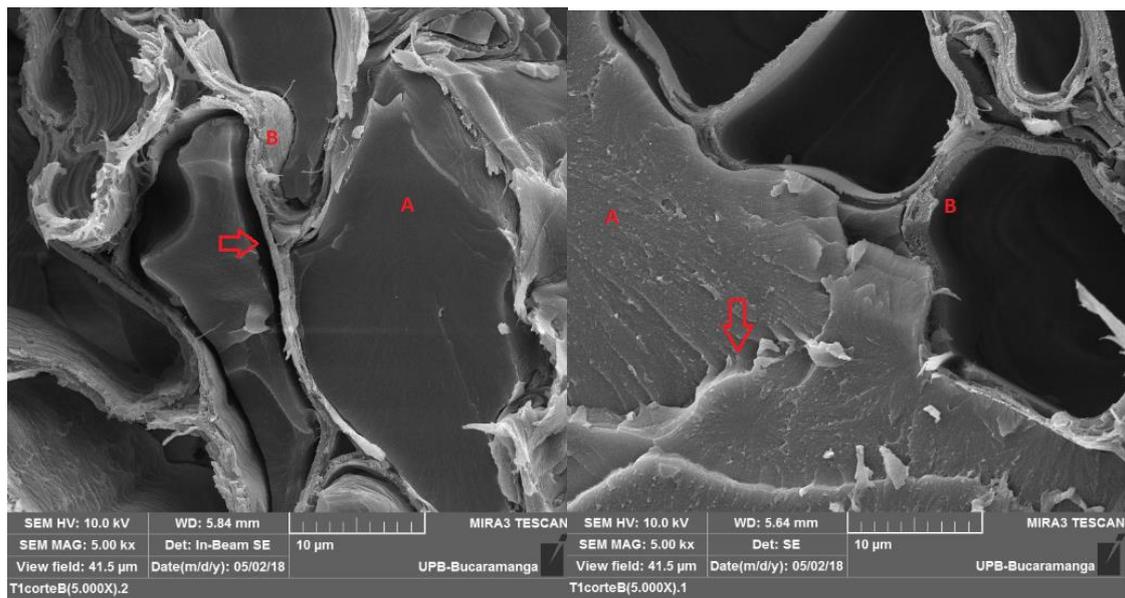


Figura 42. Micrografía de zona de fractura por ensayo de flexión con resolución de 5000X y escala de 10 µm. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de Guadua angustifolia (Autores)

La Figura 40 por su parte, muestra varias características que se han nombrado anteriormente como la disposición de las fibras debido a la flexión del material (zona 2) y del curado de la resina debido al método de fabricación del material por inyección; adicionalmente, la zona 1 resalta que las fibras más próximas a la resina conservan su forma a diferencia de las ubicadas en la zona 2 y esto se debe al soporte que le brinda la dureza de la matriz epóxica. La Figura 41, en general, permite ver la disposición de las fibras en el momento de la impregnación, donde las más próximas a la matriz son las de porosidad más pequeña y lo más importante, el detalle de la resina fabricado con un sistema de inyección apropiado que no formó burbujas y logró impregnar lo poros más cercanos a la interfaz como se muestra con mayor detalle en la Figura 42, pero la zona señalada indica que en las fibras del interior de la zona de refuerzo la interfaz tiene más espacios vacíos, en la imagen de la derecha se señala la forma de fractura de la resina en momento del cizallamiento.

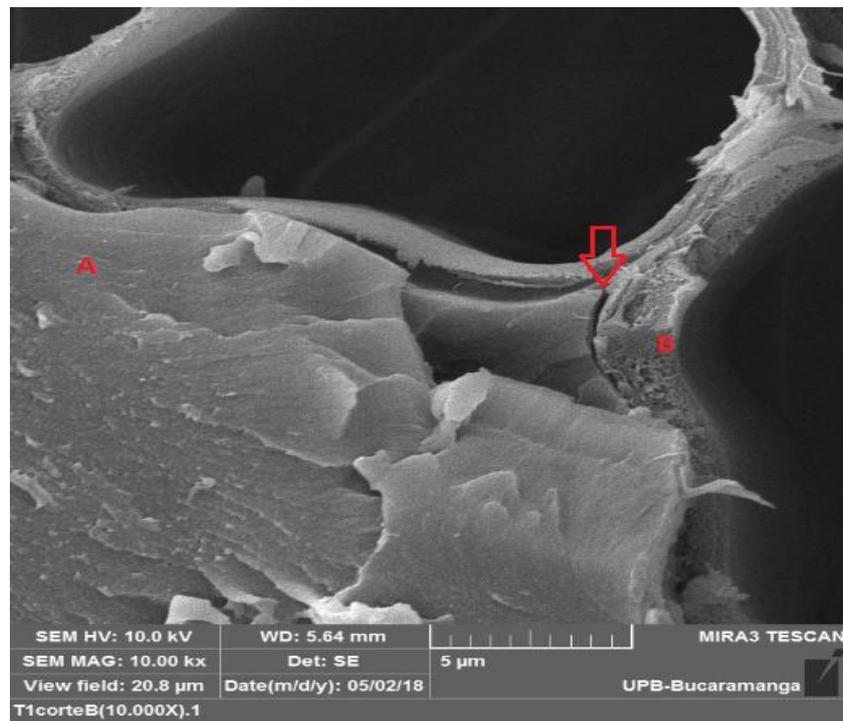


Figura 43. Micrografía de zona de fractura por ensayo de flexión con resolución de 10000X y escala de 5 μm. Donde: A) Resina Epóxica; B) Fibra de *Guadua angustifolia* (Autores)

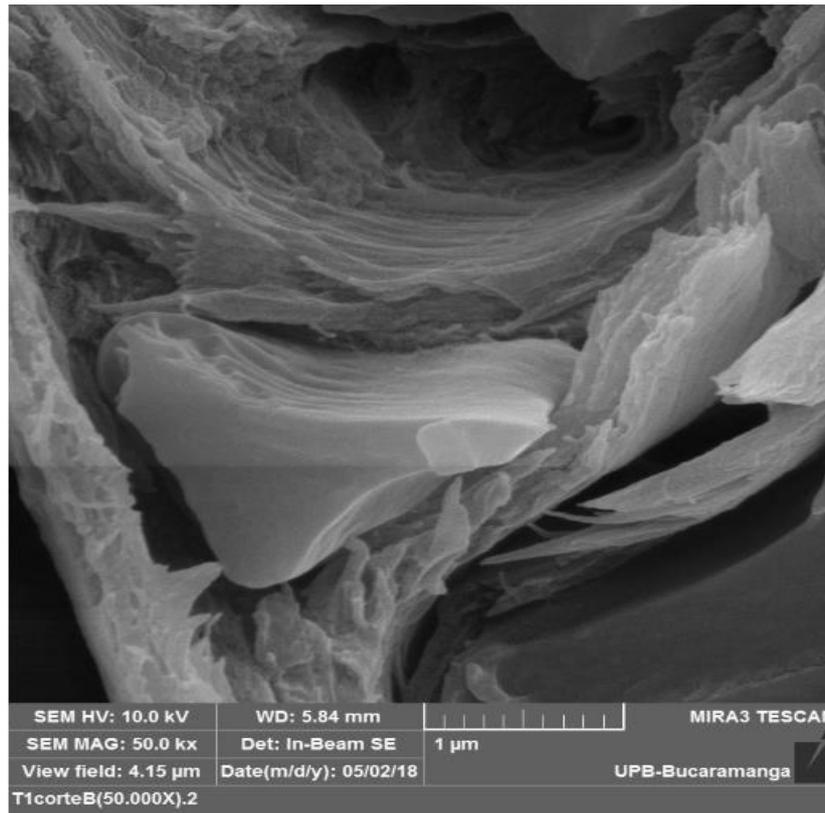


Figura 44. Micrografía de zona de fractura por ensayo de flexión con resolución de 50000X y escala de 1 µm (Autores)

Por último, las Figuras 43 y 44 permiten observar muy de cerca la forma laminar de la resina debido a la acomodación por gravedad y los pequeños espacios que puede llegar a ocupar la matriz entre las fibras.

De esta forma, la diferencia entre ambos cortes se puede evidenciar en la forma de las fisuras de la resina donde debido a la tracción se producen cortes radiales alrededor de las fibras de refuerzo (zona A Figura 36) y, las fisuras por flexión se encuentran en sentido perpendicular a la disposición de las fibras (zona A - Figura 40).

6.3 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Para llevar a cabo el análisis por elementos finitos se contempló que el biocomposito tenía una distribución homogénea de la fibra y que el software no permite la configuración de materiales compuestos, por lo cual no se define la orientación de las fibras. Los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos y la ecuación de densidad se relacionan en la Tabla 12 como valores para configurar las propiedades del material en el software de Ansys RV16.

Tabla 12. Propiedades mecánicas de los materiales a utilizar

Propiedad	Biocomposito	HDPP
Densidad (g/cm ³)	0,93	2,01
Módulo de elasticidad (GPa)	0,38	3,7
Radio de Poisson	0,16	0,39
Esfuerzo máximo a tracción (Mpa)	59,38	26,7
Esfuerzo máximo a compresión (Mpa)	59,38	26,6
Esfuerzo máximo a flexión (Mpa)	79,94	26,7
Esfuerzo de fluencia a tracción (Mpa)	59,38	24,4
Esfuerzo de fluencia a compresión (Mpa)	59,38	24,4
Deformación (%)	8,36	7,31
Masa (g)	190,04	150
Peso (N)	1,83	1,47
Volumen (cm ³)	74,61	74,61

El modelado de la férula se realizó teniendo en cuenta las medidas de una mujer de 22 años de edad sin patologías relacionadas al miembro superior derecho y se observa en la Figura 45.

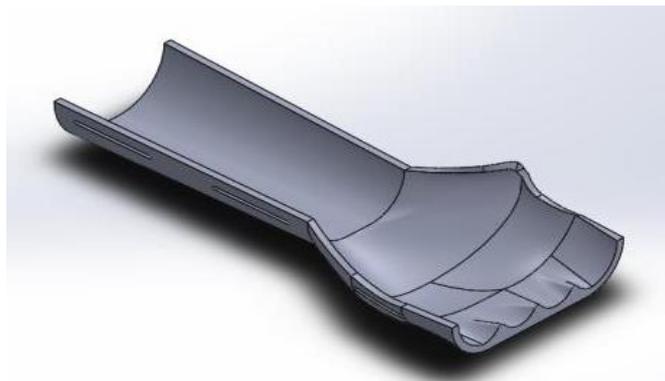


Figura 45. Modelado de férula en SolidWorks (Autores)

En la configuración del material para el análisis en Software se selecciona mallado de tipo mecánico debido a que es un modelo estático. El mallado inicial es un mallado brusco y grueso, por lo cual es necesario optimizarlo, en este paso se tiene en cuenta el número de elementos vs el porcentaje de error. Ansys permite optimizar la malla haciendo cambios en diferentes parámetros como centro de relevancia, calidad de elementos y transición, de esta forma se obtiene un mejor mallado de acuerdo a lo que el sistema permita y el análisis requiera; como se muestra en la Figura 46 se obtuvo un mallado óptimo con 80.199 nodos y 50.733 elementos.

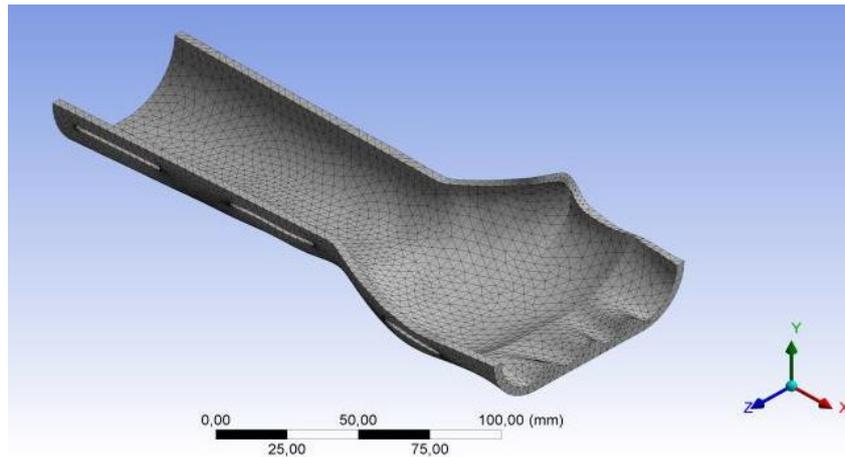


Figura 46. Mallado de la férula (Autores)

La definición de las fuerzas que se aplicaron al usar la férula provienen del movimiento de la mano y por la sujeción de las correas que se utilizan para sostener la férula fija a la mano y antebrazo. De esta forma, la colocación de la férula se hace en la extremidad afectada del paciente sujeta mediante correas para que se mantenga firme y evitar que se caiga, con esto se limita el movimiento de la muñeca para un tratamiento exitoso. Las simulaciones se hacen con las fuerzas máximas que puede ejecutar una persona en condiciones saludables para llevar la exposición del material al límite de lo posible, pero se sabe que un paciente que se encuentre en tratamiento por Síndrome del túnel carpiano no es capaz de ejecutar tal actividad debido a la patología.

6.4.1 Fuerzas de sujeción de correas

En primer lugar, se asignó una fuerza inicial en el eje -Y que es la gravedad, la cual afectó a todo el modelo, se hizo la selección de soportes fijos en las ranuras y por último se colocaron las fuerzas en los nodos donde el modelo puede estar sometido naturalmente.

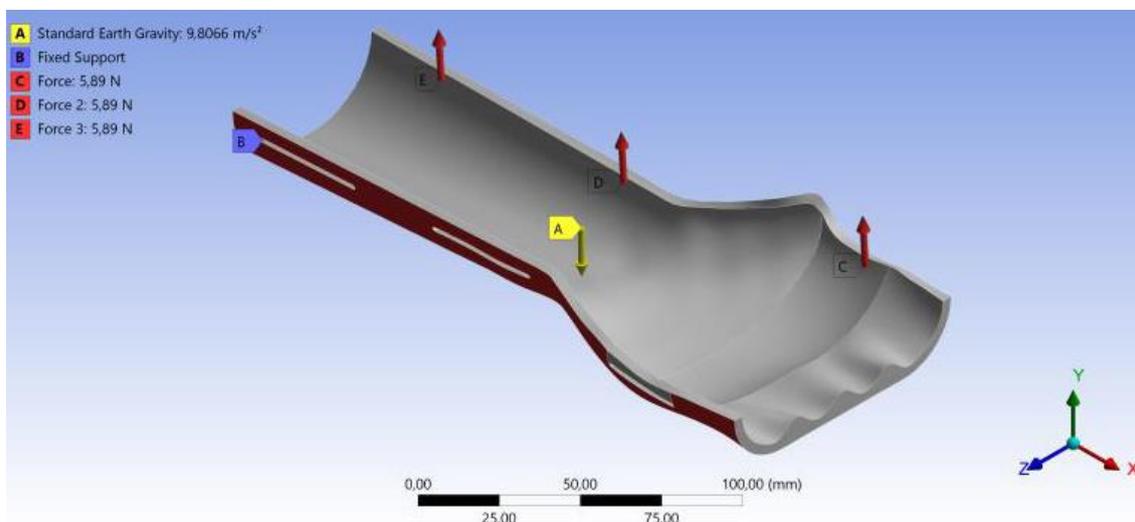


Figura 47. Fuerzas aplicadas de sujeción (Autores)

Si se observa la Figura 47, las cargas aplicadas en los puntos C, D y E fueron aplicadas de acuerdo a la sujeción de bandas que se utilizan por CIREC, el peso de la banda es 0,6010 kg, teniendo en cuenta que la gravedad tiene un valor de $9,8\text{m/s}^2$, la fuerza puntual es de 5.89N ejercida en los lados opuestos a las ranuras.

Tabla 13. Condiciones de configuración del AEF

Parámetro	Especificación
Densidad	0,93 g/cm ³
Material	Biocomposito
Mallado	Mecánico
Relevancia	Fina
Transición	Lenta
Gravedad	9.8 m/s ²
Soporte	Fijo

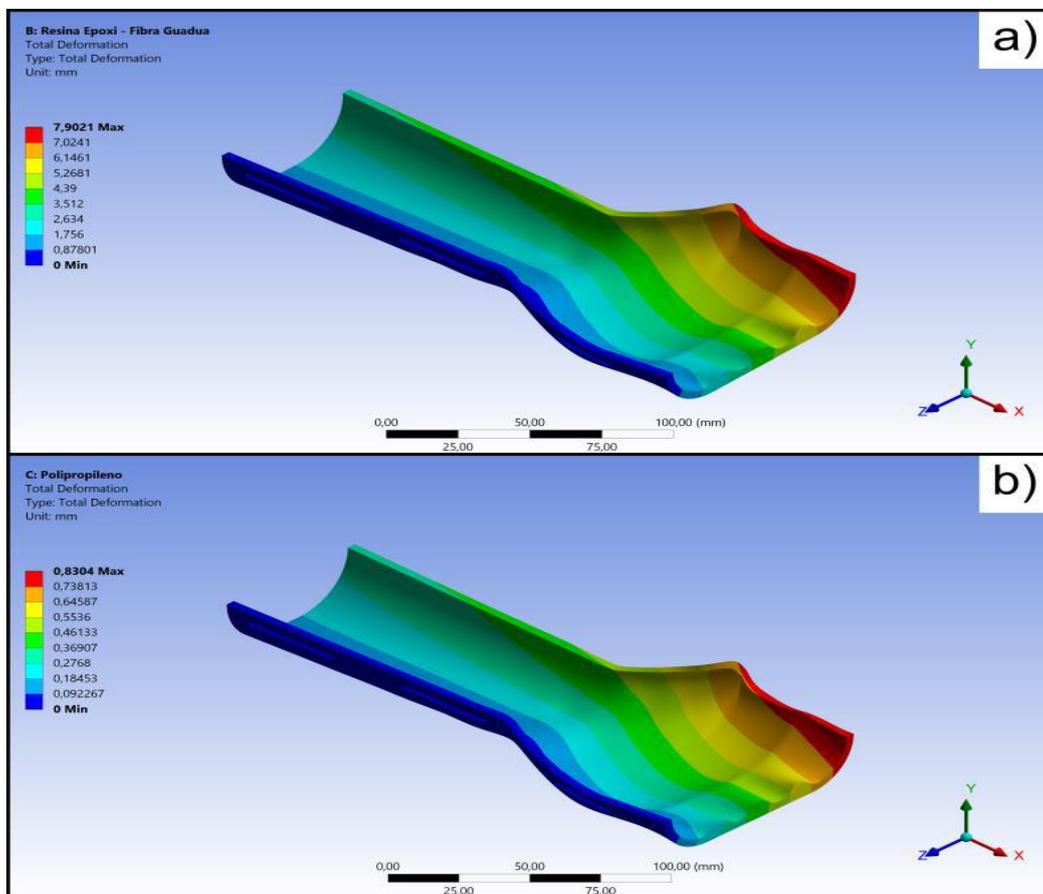


Figura 48. Deformación total de la férula por fuerza de sujeción. a) Biocomposito b) Polipropileno (Autores)

Se puede evidenciar en la Figura 48 que la simulación para el biocomposito y el HDPP se comportan de forma similar pero los valores de deformación total cambian como se muestra en la Tabla 14.

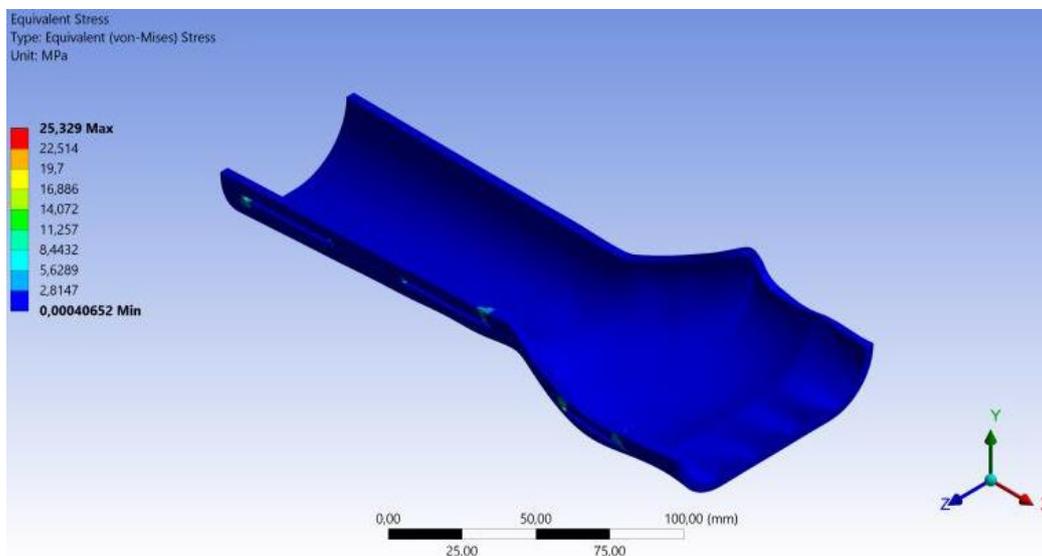


Figura 49. Esfuerzo equivalente Von Mises por fuerza de sujeción (Autores)

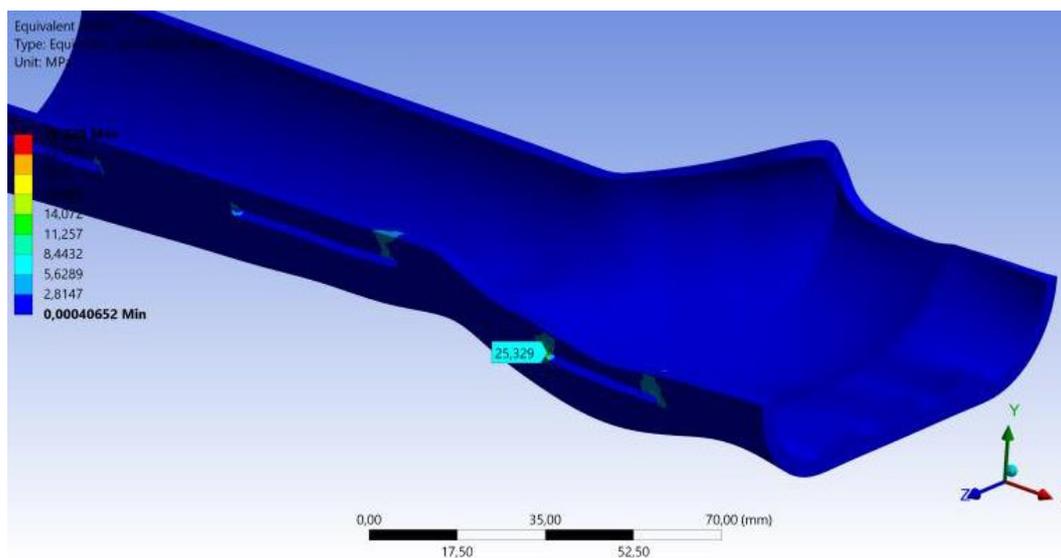


Figura 50. Zona de mayor esfuerzo equivalente por sujeción (Autores)

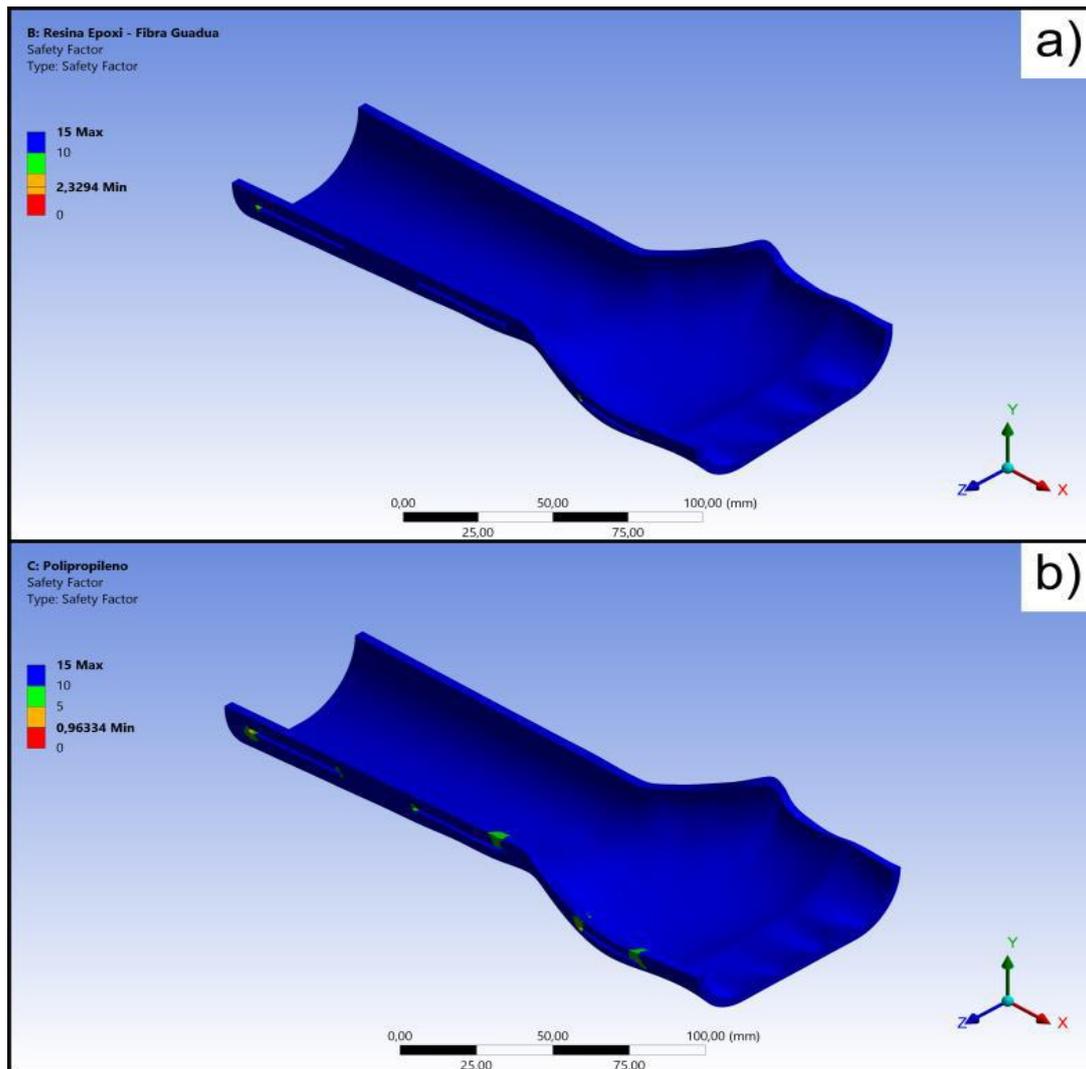


Figura 51. Factor de seguridad por fuerzas de sujeción de correas. a) Biocomposito b) Polipropileno (Autores)

Tabla 14. Evaluación de propiedades físicas a partir de análisis de sujeción de correas en ANSYS R16

Propiedad	Biocomposito	HDPP
Masa de la férula (g)	190,04	149,96
Peso de la férula (N)	1,86	1,47
Deformación total (mm)	7,9	0,83
Factor de seguridad	2,33	0,96

La diferencia de densidad entre ambos materiales es mínima y se ve reflejada en los resultados de masa y peso de la aplicación.

El módulo de elasticidad y el radio de Poisson del Polipropileno indican que tiene mayor rigidez que el Biocompuesto, lo que provoca una menor deformación en

la férula debido a la tensión de las tres bandas elásticas aplicadas como cargas puntuales dentro de la simulación.

La zona de la férula sujeta a mayor esfuerzo equivalente se encuentra ubicada en las ranuras por donde pasa la banda elástica, comprobando que cambios en la geometría como redondeos o discontinuidad de material actúan como acumuladores de esfuerzos por donde es más probable que la pieza falle.

En el ensayo a tracción se determinan propiedades de esfuerzo en función de la deformación para el biocompuesto que describen un mejor comportamiento dúctil de este material en comparación con el polipropileno.

La férula tiene factores de seguridad máximo de 15 en la mayoría de su geometría independientemente de la asignación de material, pero el factor de seguridad mínimo que arroja la simulación revela que el polipropileno no tiene un buen comportamiento mecánico en las zonas de mayor esfuerzo equivalente y demuestra que el biocompuesto si cumple con los requerimientos estructurales.

Las Figuras 49 y 50 muestran el punto máximo y mínimo de esfuerzo que la pieza es capaz de soportar con sus respectivos materiales. El punto máximo queda situado en una de las ranuras de la banda sujetadora y es correcto afirmar que, al momento de sujetar con una fuerza mayor a la soportada, se va a producir una rotura del material afectando la composición física de la férula; por otro lado, se puede evidenciar que en el resto de la pieza los esfuerzos son mínimos. Cabe resaltar que, aunque el HDPP tenga un índice de deformación más bajo que el del biocomposito, el biocomposito posee una mayor resistencia al esfuerzo. Por último, el factor de seguridad en ambos materiales varía y se obtiene un índice de mejor calidad en el biocomposito, este muestra los niveles de incertidumbre que se pueden presentar a la hora de relacionar la resistencia que posee el material con las cargas a las cuales es sometido, esto quiere decir que el biocomposito va a ser capaz de soportar 2,1576 veces más esfuerzo del que se le está aplicando, así mismo el HDPP va a soportar 1,068 veces más esfuerzo del que se le aplica.

6.4.2 Fuerzas de flexión

Cuando el usuario de la férula ejerce la flexión en la muñeca, existen diferentes puntos de tensión sobre el material, para este caso los puntos están definidos de acuerdo al numeral *4.5 BIOMECAÁNICA DE LA MUÑECA*, donde se describen los vectores de fuerza y la zona donde se generan, estas se relacionan en la Tabla 15 y se muestran en la Figura 52.

Tabla 15. Vectores de flexión

Zona	Magnitud (N)	Ángulo (°)
Inicio de falanges	110,34	0
Escafoides	66,2	55
Semilunar	44,14	45 y 10

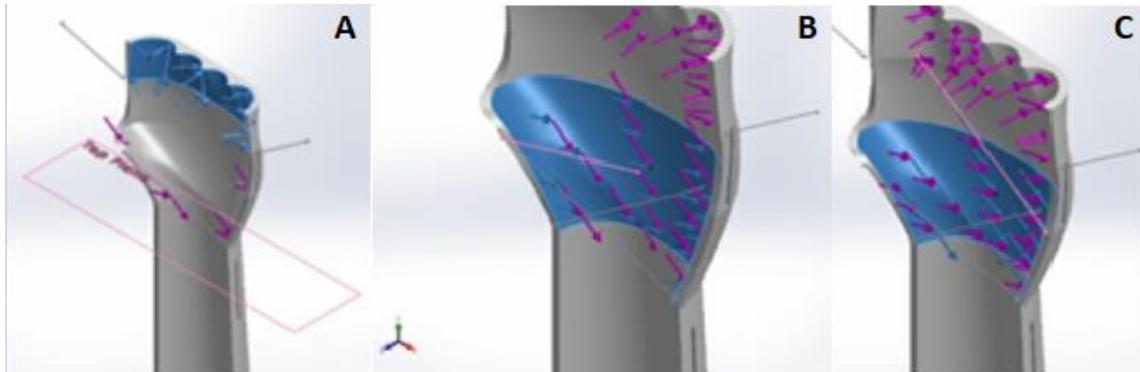


Figura 52. Vectores de flexión. Donde: A) Fuerza máxima en inicio de falanges; B) Fuerza por flexión de escafoides; C) Fuerza por flexión de semilunar

Tabla 16. Fuerzas resultantes por flexión

Componente	Fuerza (N)
X	-10,16
Y	10,67
Z	89,62
Resultante	90,83

Cómo es posible observar, en un sólo movimiento se tienen varios puntos de tensión que se aplican en la simulación y generan diferentes reacciones en el material de acuerdo a su forma, los puntos de apoyo se definieron en la región del antebrazo debido a la posición de las correas, los tipos de análisis que se llevaron a cabo se muestran en la Tabla 17 y se muestran en las Figuras 53, 54, 55 y 56.

Tabla 17. Análisis por fuerzas de flexión

Análisis	Mínimo	Máximo
Estrés de Von Mises (N/m ²)	37777,53	3,4 x10 ⁷
Desplazamiento (mm)	0	101,36
Esfuerzo equivalente	1,6 x10 ⁻⁵	0,06

Model name: Ferula Simplificada
Study name: F 1, 2 y 3 (-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 0.229469

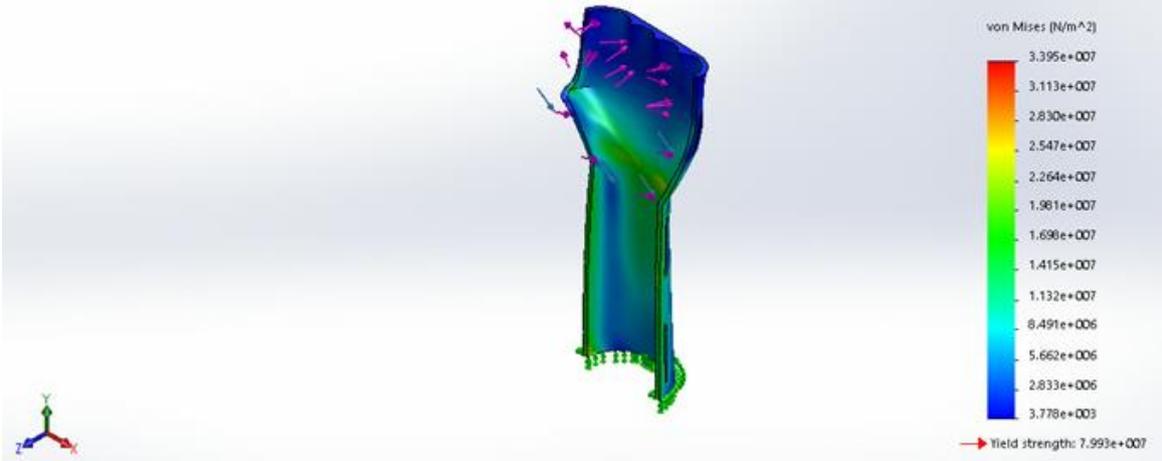


Figura 53. Mapa de colores de estrés de Von Mises por flexión

Model name: Ferula Simplificada
Study name: F 1, 2 y 3 (-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 0.229469

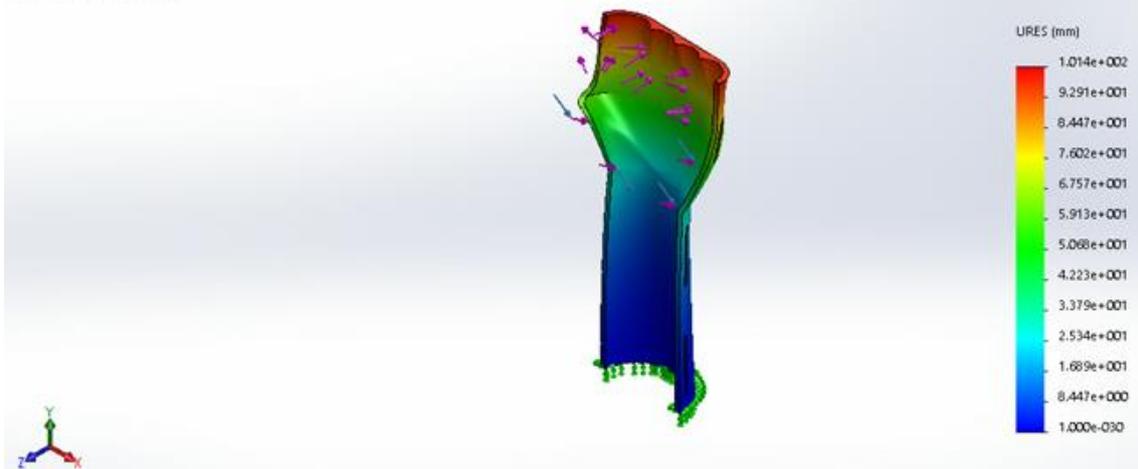


Figura 54. Mapa de colores de desplazamiento resultante por flexión

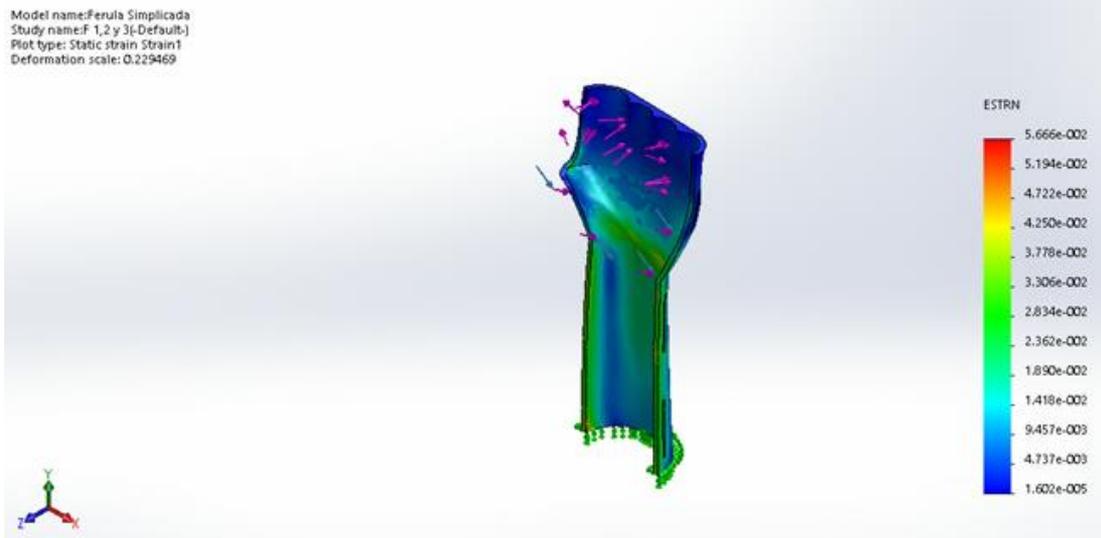


Figura 55. Mapa de colores de esfuerzo equivalente estático por flexión

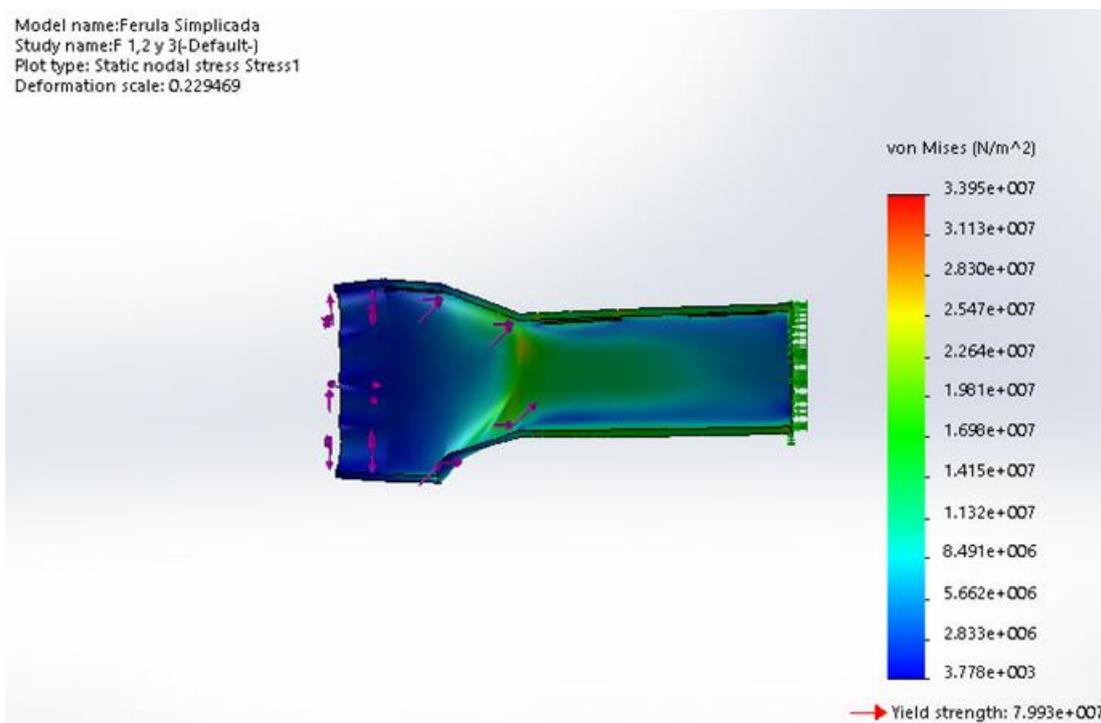


Figura 56. Mapa de colores de estrés nodal estático por flexión

Es posible relacionar los datos obtenidos en los diferentes análisis realizados, iniciando con el estrés de Von mises, el mapa de colores de las Figuras 53 y 55 permiten evidenciar que existen zonas críticas en la región de la muñeca debido a las fuerzas aplicadas en la parte más cercana a los dedos y debido al cambio de forma del material desde el antebrazo hacia la mano donde esta región es más estrecha, pero, aunque existen zonas críticas el material no se encuentra

en riesgo de fractura. Sin embargo, la Figura 54 muestra la amplia capacidad de deformación del material, pues supera los 100 mm de desplazamiento en las zonas de color rojo, con puntos de flexión en las zonas críticas que se muestran en la Figura 55, que es donde el material debe soportar el mayor esfuerzo de las cargas aplicadas por ser el punto de flexión de la mano, también es la del material y es por esto que requiere el mayor soporte de carga y siendo así no llega a acercarse al punto de fractura, se ve también que esta zona se extiende a lo largo del antebrazo y va desapareciendo, lo que demuestra la razón de soportar la férula en la región del antebrazo por medio de correas y la función de la férula que es limitar el movimiento de la muñeca.

Es posible evidenciar también que existen zonas críticas de esfuerzo en los bordes de la región del antebrazo y puede deberse al diseño de los huecos por donde deben pasar las correas de sujeción de la férula, que se encuentran muy cerca al borde y crean el riesgo de fractura por uso constante. Aunque cabe destacar que este análisis no tuvo en cuenta el uso de las correas de sujeción y siendo así el resultado podría ser más conveniente, debido a que estas proporcionan soporte en todos los bordes laterales de la férula.

6.4.3 Fuerzas de inclinación radial

Así como la flexión, este movimiento de la muñeca también ejerce diferentes puntos de tensión sobre el material que se muestran especificados en la Tabla 18 y en la Figura 57, estos también son tomados del numeral *4.5 BIOMECAÁNICA DE LA MUÑECA* y se debe a la inclinación de la mano hacia el radio o conocido como abducción.

Tabla 18. Vectores de inclinación radial

Zona	Magnitud (N)	Ángulo (°)
Pulgar	87,37	15
Cabeza de cúbito	69,9	15

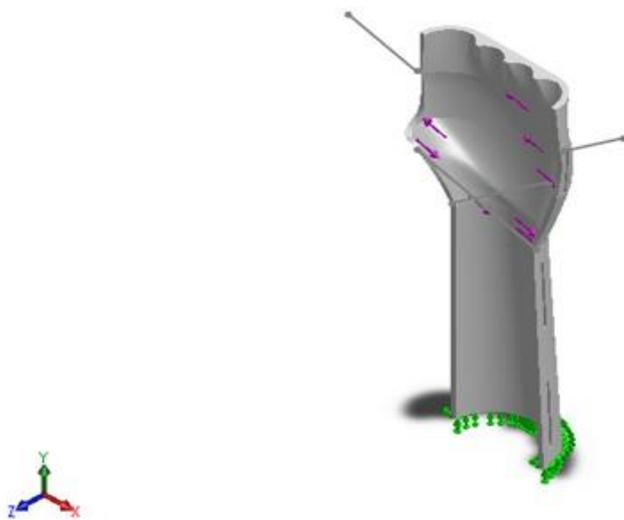


Figura 57. Vectores de inclinación radial (Autores)

Tabla 19. Fuerzas resultantes por inclinación radial

Componente	Fuerza (N)
X	16,88
Y	-4,52
Z	$6,25 \times 10^{-5}$
Resultante	17,47

De acuerdo a las Tablas 16 y 19 se notó que las fuerzas de flexión son mucho mayores, esto se debe posiblemente a que el ángulo es mayor en el movimiento de flexión a comparación del ángulo que permite realizar el movimiento en la inclinación radial, por lo cual se espera que al realizar una inclinación radial el material se aleje de las zonas críticas y aún más de los puntos de fractura, por esto se llevan a cabo los análisis relacionados en la Tabla 20 y las Figuras 58, 59, 60 y 61.

Tabla 20. Análisis por fuerzas de inclinación radial

Análisis	Mínimo	Máximo
Estrés de Von Mises (N/m ²)	2433,85	$5,05 \times 10^6$
Desplazamiento (mm)	0	6,18
Esfuerzo equivalente	$2,15 \times 10^{-6}$	0,08

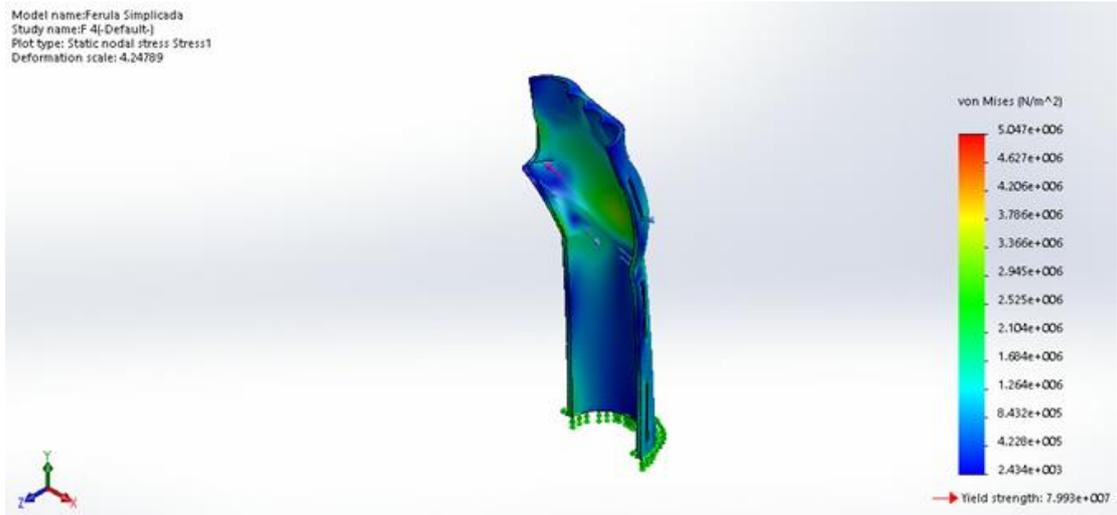


Figura 58. Mapa de colores de estrés de Von Mises por inclinación radial

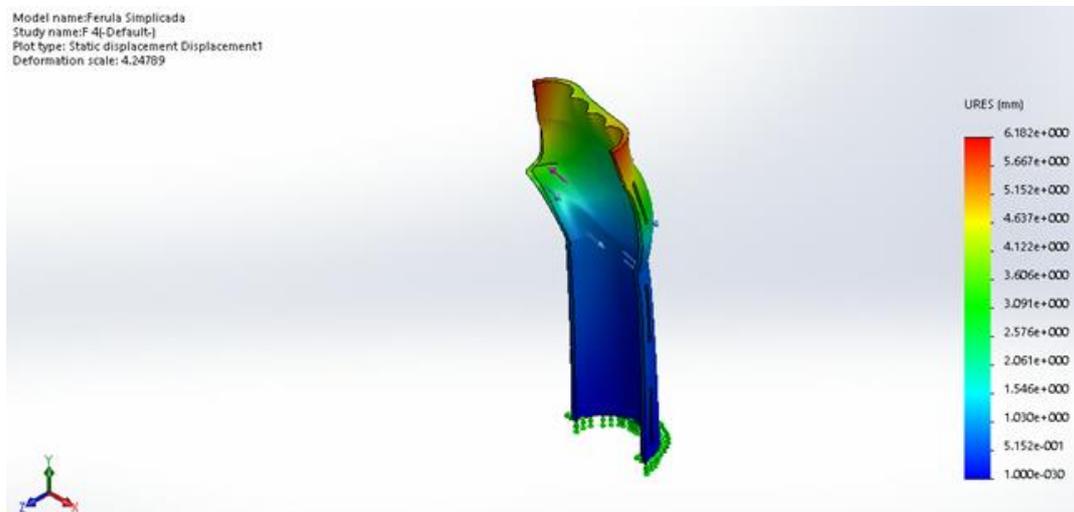


Figura 59. Mapa de colores de desplazamiento por inclinación radial

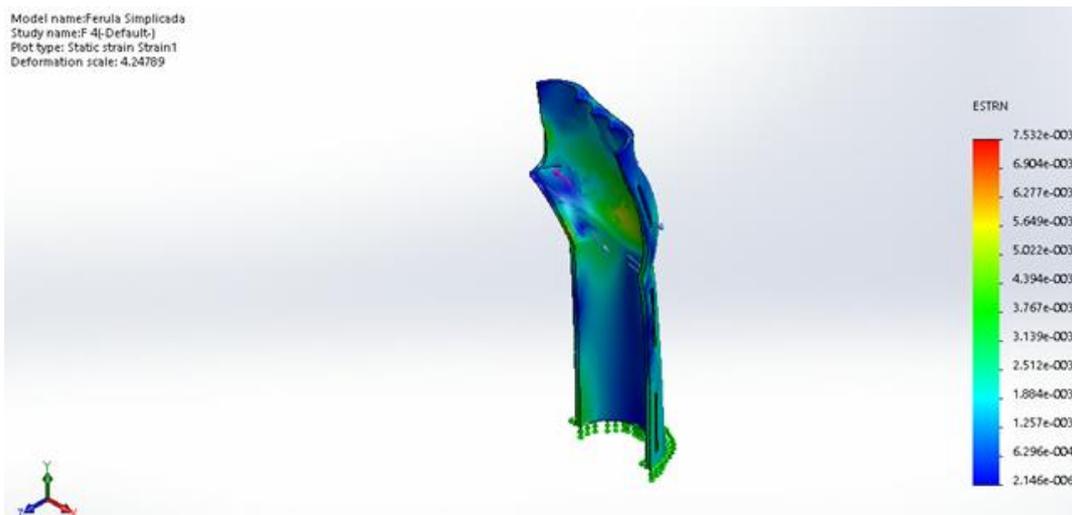


Figura 60. Mapa de colores de esfuerzo equivalente por inclinación radial

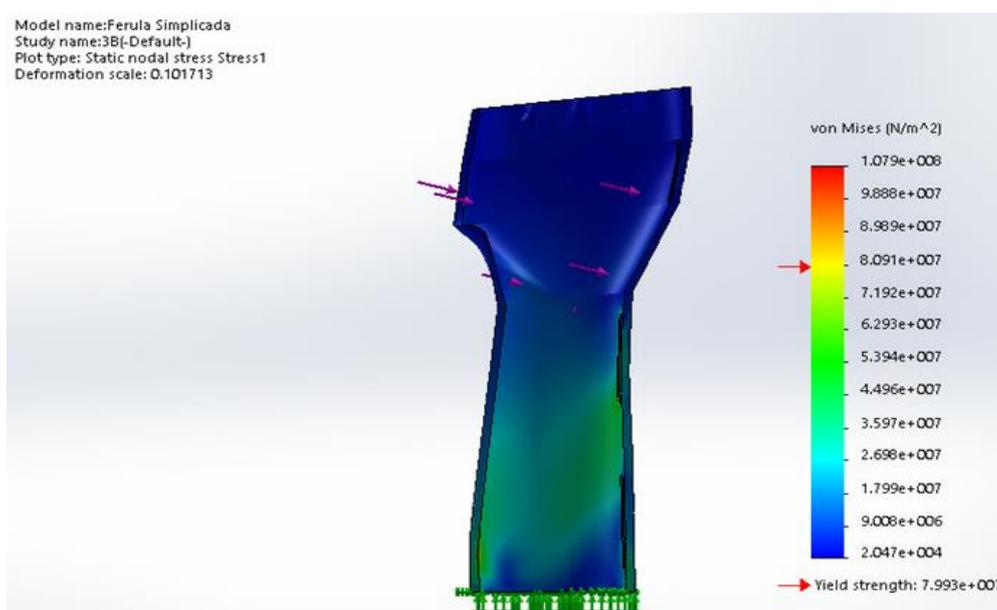


Figura 61. Mapa de colores de estrés nodal estático por inclinación radial

Cuando el paciente ejecuta la inclinación radial usando la férula, esta debe soportar las fuerzas que se generan sobre ella, En la Figura 59 se evidencia que el mayor estrés se concentra en la región de la palma debido a las fuerzas opuestas generadas por el pulgar y el cúbito, que ejerce una inclinación opuesta para mantener el soporte de la mano. Así mismo se notó que la férula en los extremos de los dedos sufre bastante ya que la mano se encuentra en una posición funcional y cuando se realiza una inclinación radial los dedos índice y meñique son los que más desplazamiento van a realizar en la férula ocasionando

que la estructura sea sometida a ciertas fuerzas en sus extremos provocando la deformación plástica de la férula en las equinas donde van el dedo meñique y el índice como se evidencia en la figura 59. Como se dijo anteriormente, la zona crítica en la inclinación radial se encuentra más lejana al punto de fractura que las fuerzas de flexión debido a que la magnitud de las fuerzas es menor y los puntos de tensión son más escasos.

En la figura 58 se observa el comportamiento palmar sobre la férula la cual se ve afectada cuando se realiza la inclinación radial, se observa que hay un estrés en la zona palmar, sin embargo no es crítico ya que el soporte del antebrazo ayuda a limitar el movimiento de la muñeca, este comportamiento se evidencia en la figura 61, donde la base del antebrazo presenta un estrés nodal leve cuando la zona palmar está sometida a la fuerza que se ejerce en la inclinación radial, la base del antebrazo alcanza a soportar una carga entre $3,597^{007}$ y $4,496^{007}$ N/m² esta carga es superior a la que presenta la zona palmar que esta entre $2,525^{006}$ y $2,945^{006}$ N/m², esto se debe a que cuando se realiza la inclinación radial el musculo del antebrazo se excita provocando una tensión en el mismo para que el ángulo en el movimiento radial sea mayor, debido a la forma de la férula el antebrazo tiene un soporte el cual le ayuda a soportar la carga del movimiento pero limita el movimiento evitando que se alcance un ángulo superior que pueda agravar la patología del paciente.

6.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

El objetivo de este análisis es comparar el impacto ambiental de la transformación del biocomposito para convertirse en una férula de antebrazo para tratamiento del Síndrome del Túnel Carpiano y del HDPP como material comúnmente utilizado en CIREC con el mismo fin.

Para iniciar con el análisis se determina que sólo se tendrá en cuenta una etapa del ciclo de vida del material y es la de transformación y procesado, donde el biocomposito se debe someter a un moldeamiento de la fibra (80% de la masa) e inyección de resina (20% de la masa) con el método RTM (Tabla 21), y el moldeamiento del HDPP es a través de termoformado (Tabla 22).

Tabla 21. Configuración de transformación para biocomposito

		Cantidad	Ud.
Salida (Productos y co-productos)	Biocomposito	1	kg
Entradas (materiales/combustibles)	Cleft timber, measured ad dry mass (CH)	0.8	kg
	Liquid epoxy resins E	0.2	kg
Entradas (electricidad/calor)	Injection moulding (CA-QC)	0.2	kg

De acuerdo a la configuración que se aplicó para el biocomposito, se generó el árbol de proceso de la Figura 62, que muestra que en el proceso de transformación, el componente de la fibra vegetal es la que mayor energía requiere para lograr la fabricación de la férula, esto se ve reflejado en primer lugar, a que se requiere la mayoría de este material en comparación a la resina y debido a diferentes factores como el uso de suelo y la forma de corte y extracción de la fibra donde comúnmente se utilizan métodos artesanales para el sembrado, cultivo y corte de las fibras de guadua.

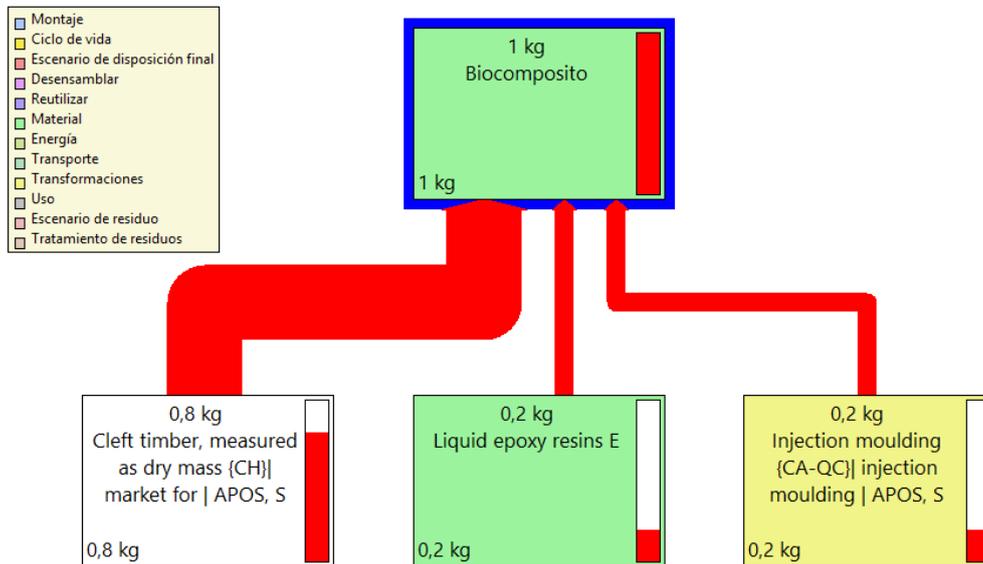


Figura 62. Árbol de proceso de moldeo de biocomposito

Tabla 22. Configuración de transformación para HDPP

		Cantidad	Ud.
Salida (Productos y co-productos)	HDPP	1	kg
Entradas (materiales/combustibles)	Polypropylene scrap, from PP thermoforming	1	kg
Entradas (electricidad/calor)	Thermoforming of plastic sheets (GLO)	1	kg

Por otro lado, la configuración del termoformado de HDPP da como resultado el árbol de proceso de la Figura 63, donde es posible ver con más detalle la procedencia del material; para este caso, la parte que más energía requiere para lograr el modelado de la férula es el proceso de termoformado y esto se debe a la maquinaria que requiere dicho proceso.

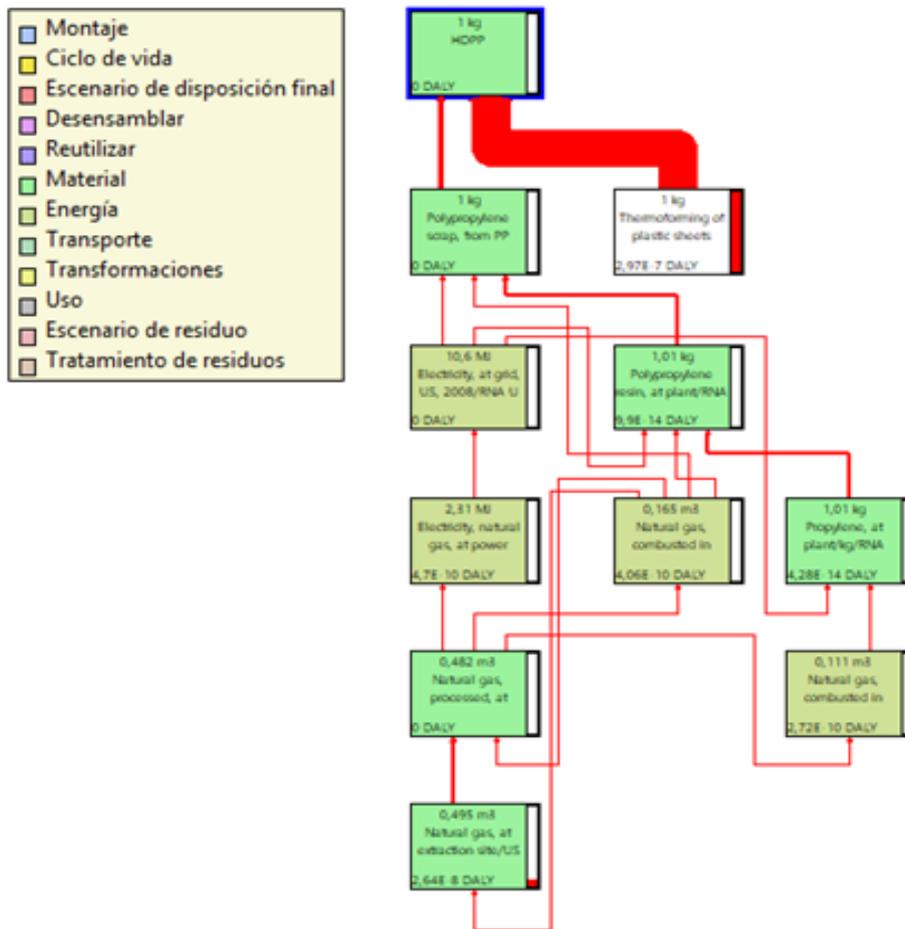


Figura 63. Árbol de proceso de termoformado de HDPP

El método EcoIndicador 99 se utiliza debido a que utiliza midpoints y no requiere de información compleja de consumo de energía o inventario, este método realiza una evaluación de impacto para cada una de las categorías que se evidencia en la Tabla 23. Las unidades que maneja la categoría de Salud Humana es DALY, lo que significa “Años de Vida Ajustados a la Incapacidad” por sus siglas en inglés; para Ecosistemas es PAF*m2yr, unidad basada en la ponderación de los niveles de impacto y; para Recursos en consumo de energía (MJ surplus).

Tabla 23. Categorías de evaluación de impacto

Categoría de daño	Unidad	Biocomposito	HDPP
Salud Humana	DALY	1,08 x10 ⁻⁶	1,08 x10 ⁻⁶
Calidad del ecosistema	PAF*m2yr	0,205	0,119
Recursos	MJ Surplus	2,45	8,66

El cálculo de impacto que proporciona el Software SimaPro se relaciona en las Tablas 24, 25 y 26 y las Figuras 64, 65 y 66, donde se evidencia la evaluación de impacto que se realiza de acuerdo al método EcoIndicador 99, en cada una de las categorías.

Tabla 24. Evaluación de impacto para la categoría Salud Humana

Categoría de impacto	Unidad	Biocomposito	HDPP
Cancerígenos	DALY	$2,16 \times 10^{-8}$	$3,42 \times 10^{-7}$
Respiratorio orgánico	DALY	$1,85 \times 10^{-9}$	$4,06 \times 10^{-9}$
Respiratorio inorgánico	DALY	$1,08 \times 10^{-6}$	$3,32 \times 10^{-6}$
Cambio climático	DALY	$3,56 \times 10^{-7}$	$8,66 \times 10^{-7}$
Radiación	DALY	$1,52 \times 10^{-10}$	$1,68 \times 10^{-9}$
Capa de Ozono	DALY	$3,22 \times 10^{-11}$	$3,57 \times 10^{-11}$

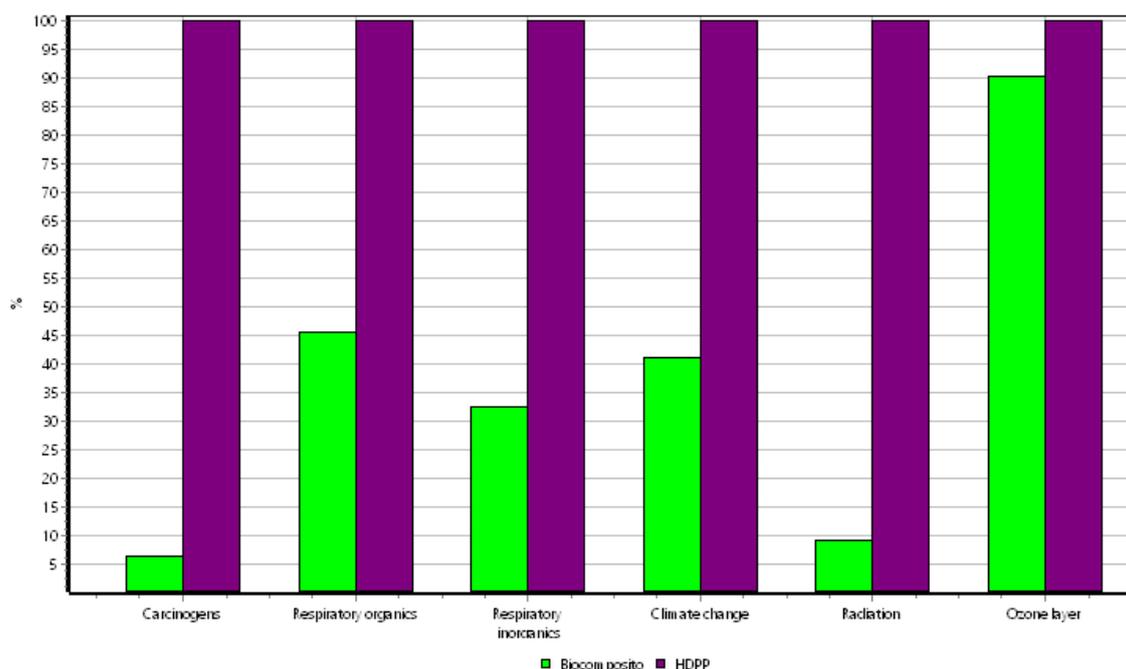


Figura 64. Gráfica de comparación de la evaluación de impacto para Salud Humana

Al observar la Tabla 24 y la Figura 64, es notable que todos los valores de impacto del HDPP representados con el color morado son mayores que los del biocomposito en verde y esto se debe principalmente a la procedencia del HDPP, pues los componentes petroquímicos que lo forman tienen consecuencias en la salud y pueden producir cáncer o problemas respiratorios. Las moléculas que se involucran en el cambio climático son CO_2 , CO , CH_4 , NO_x y SO_x , la manipulación

de crudo de petróleo y la extracción del mismo libera moléculas de este tipo que pueden ser contaminantes y aportan de forma negativa al cambio climático, y las moléculas que se involucran en el aumento de radiación son CO₂ y CH₄ por esto es que la diferencia del impacto de este tipo entre ambos materiales es tan alta. Por último, las moléculas que afectan la capa de ozono son HCF y PCB que se liberan tanto para la producción de resina como la de polipropileno.

Tabla 25. Evaluación de impacto para la categoría Ecosistemas

Categoría de impacto	Unidad	Biocomposito	HDPP
Ecotoxicidad	PAF*m2yr	0,0473	0,349
Acidificación/ Eutrofización	PAF*m2yr	0,0197	0,0781
Uso de suelo	PAF*m2yr	0,181	0,00574

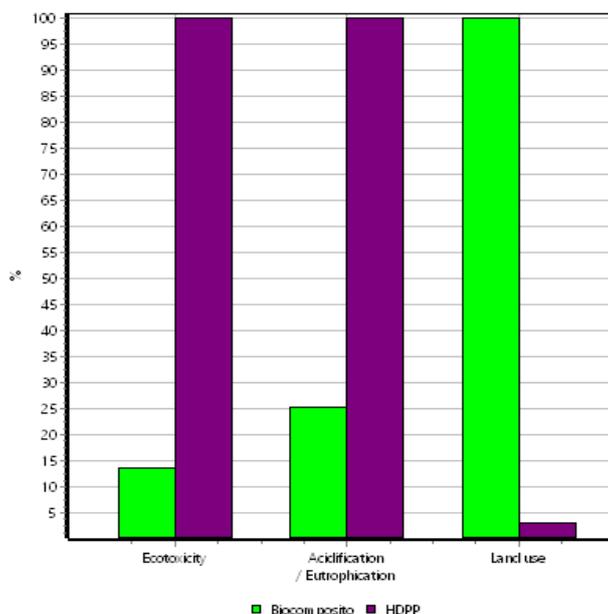


Figura 65. Gráfica de comparación de la evaluación de impacto para Ecosistemas.

En la categoría de ecosistemas, los valores no son superados completamente por uno de los materiales, pero esto se debe en primer lugar a que la ecotoxicidad se mide en impacto por yarda cuadrada, es decir, la cantidad de sustancias químicas que se liberan en un área y que puedan modificar la calidad del suelo y el aire, en la extracción de la materia prima para la fabricación del HDPP se liberan gran cantidad de sustancias con alto peso molecular que cumplen con las características para aumentar el impacto ecotóxico. La acidificación se mide por la existencia de sustancias que alteran la acidez del suelo o agua, puede deberse al uso de ácidos o bases fuertes como sales que cambian las propiedades del suelo y se liberan en la extracción de crudo de petróleo y en el

uso de pesticidas para preservar el cultivo de *Guadua angustifolia*. Finalmente, el uso de suelo tiene un impacto mucho mayor en biocomposito debido a la cantidad de área de suelo que se requiere para el cultivo de la fibra, aunque pueda ser un recurso renovable el uso de suelo, es extenso para lograr mantener la producción de las fibras.

Tabla 26. Evaluación de impacto para la categoría Recursos

Categoría de impacto	Unidad	Biocomposito	HDPP
Minerales	MJ surplus	0,00202	0,00977
Fuentes fósiles	MJ surplus	2,44	8,65

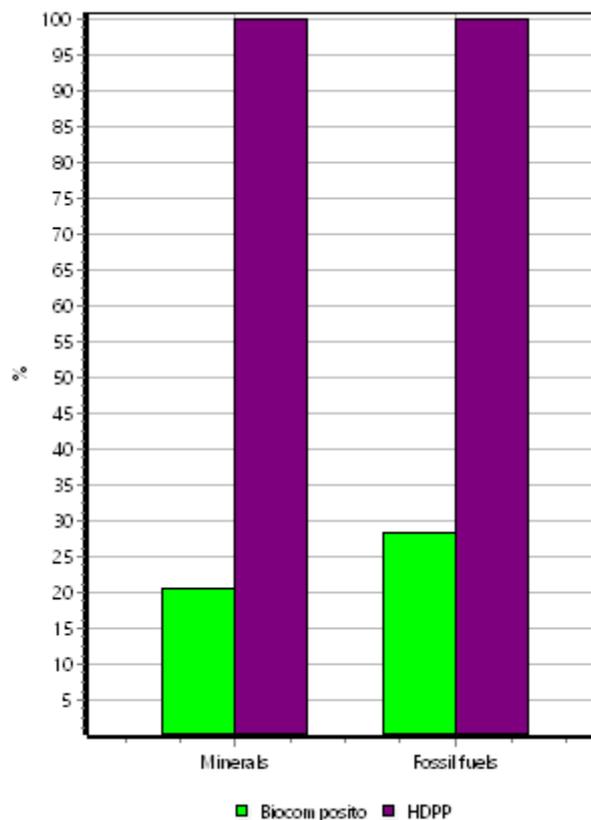


Figura 66. Gráfica de comparación de la evaluación de impacto para Recursos

La categoría de recursos muestra una gran diferencia entre ambos materiales y se debe a la extracción de minerales y combustibles fósiles para la fabricación de polímeros y en este caso el polipropileno.

La principal razón por la que se implementó el Software SimaPro fue por su capacidad de asignación de puntos proporcionales al impacto, pues cómo es posible observar en las tablas y gráficos anteriores, el impacto entre categorías no es posible compararlo debido a la diferencia entre sus unidades de medida.

Pero la Tabla 27 presenta la evaluación de impacto por puntos de ponderación que asigna SimaPro de acuerdo a los procedimientos para llevar a cabo el procesamiento de los materiales.

Tabla 27. Ponderación de categorías de impacto

Categoría de daño	Unidad	Biocomposito	HDPP
Salud Humana	mPt	49,6	154
Calidad del ecosistema	mPt	18	10,4
Recursos	mPt	87,5	310
Total	mPt	155	474

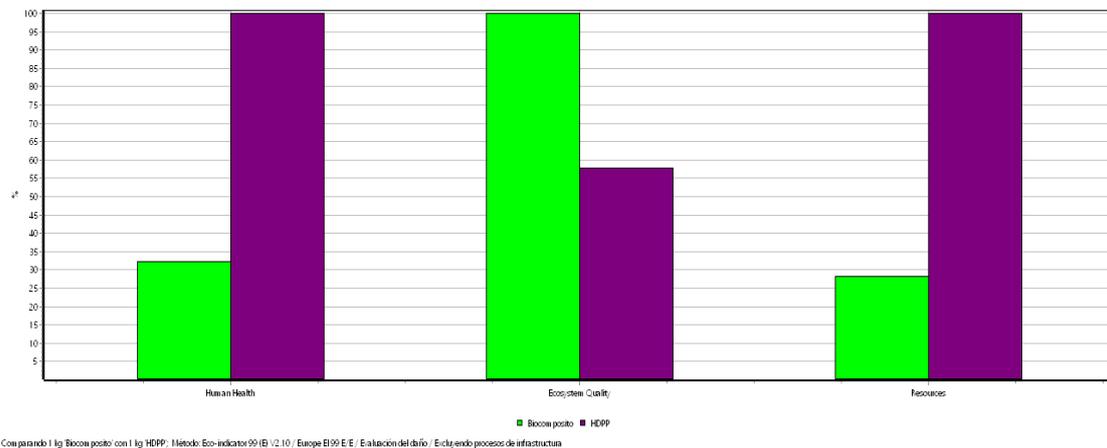


Figura 67. Gráfica de ponderación de categorías de impacto

Como se ha dicho anteriormente, la Tabla 27 y la Figura 67 es la que nos permite hacer una comparación real en mili puntos (mPt) asignados por SimaPro con el fin de conservar la misma unidad de medida en cada una de las categorías hasta llegar a un resultado final. Además, en todos los gráficos de ACV fue posible identificar la magnitud de impacto ambiental que se reduce con el uso de biocompositos reforzados con fibras vegetales a cambio de productos derivados del petróleo, con más de un 300% de reducción en el impacto en general.

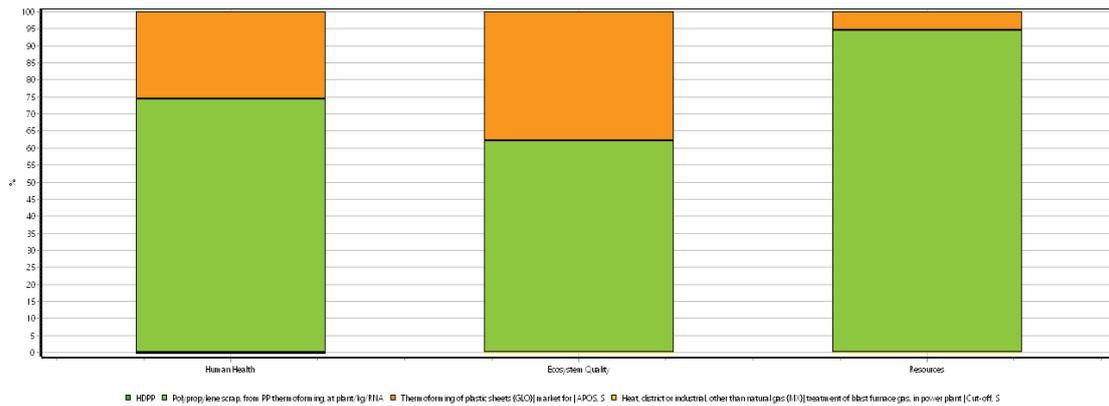


Figura 68. Evaluación de impacto de Termoformado de HDPP

La Figura 68 se genera a partir del árbol en la Figura 63 y los procesos que se requieren llevar a cabo para lograr el termoformado, como son el consumo de red eléctrica, de gas natural, la combustión de Diesel, licuefacción de petróleo y el uso de Resina del PP, que impactan negativamente en la extracción de los recursos.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos fueron los esperados gracias a la correcta fabricación del biocomposito, teniendo en cuenta que se logró obtener un material con matriz uniforme colocando las fibras de *Guadua angustifolia* de manera unidireccional. Tener en cuenta el tipo y forma del tejido en la fabricación del material hizo que se pudieran lograr buenos resultados, haciendo no sólo la fabricación viable sino también su aplicación en un caso real como lo es una férula para el tratamiento del Síndrome del Túnel Carpiano.

Las pruebas de caracterización mecánica permitieron conocer el comportamiento del biocomposito cuando es sometido a esfuerzos de tracción y flexión, estos resultados fueron determinantes para poder continuar con el proceso, pues con esto se comprobó la acción de las fibras de *Guadua angustifolia* en una matriz polimérica y como un material de este tipo puede llegar a ser más resistente y más aún, pensando en la aplicación real, donde el esfuerzo constante es la flexión del material por movimientos voluntarios e involuntarios de la muñeca que puede llegar a ejercer el paciente en sus actividades cotidianas.

La observación por MEB permitió definir la impregnación de la resina sobre las fibras de la guadua, lo que soporta las características mecánicas que el material presenta y la calidad de fabricación, donde se evidencia un material con pocas burbujas y pocos espacios vacíos en la interfaz fibra-matriz.

De acuerdo a los análisis realizados en Software de diseño de modelos 3D, la implementación continúa con una orientación viable debido a un valor conocido como "Factor de seguridad", el cual demostró la viabilidad del material para su implementación en aplicación real siendo un resultado positivo, siendo capaz de soportar también las fuerzas por movimientos de la muñeca del paciente lo que comprueba que el material resiste las condiciones de calidad y resistencia máximas requeridas.

La comparación del impacto en el medio ambiente del biocomposito y el HDPP, denota la gran diferencia que hace la implementación de materiales provenientes de fibras vegetales para reemplazar los que son contaminantes y requieren de procesos de extracción de petróleo, logrando características similares de soporte y cumpliendo el objetivo que se requiera, como en este caso sostener y limitar los movimientos de una mano en condiciones patológicas.

De acuerdo a todo lo anterior, es posible entonces decir que el biocomposito reforzado con fibra de *Guadua angustifolia* es viable para la fabricación de férulas para el tratamiento del síndrome del túnel carpiano, reduciendo el impacto ambiental que representa la fabricación de una férula como actualmente se realiza con HDPP, manteniendo las características que se requieren de soporte y calidad.

7. RECOMENDACIONES

A pesar de haber hecho un extenso análisis donde el resultado de viabilidad del producto es positivo, es importante reflejar los aspectos que se podrían tener en cuenta para continuar con el estudio de los biomateriales reforzados con fibras vegetales y además poderlos aplicar en situaciones de riesgo a nivel médico. Por ejemplo, si en principio se logra un tejido con las fibras más unidas que el obtenido, el consumo de resina podría ser incluso menor y por lo tanto el impacto ambiental por consumo de recursos se reduce.

Por otro lado, cabe destacar que la creación de un proceso técnico para la extracción de fibra y la fabricación del tejido, pueden generar un crecimiento en la industria de los biocompositos. Cabe destacar que para la fabricación de una férula para el tratamiento del Síndrome de Túnel Carpiano se requiere un molde donde el tejido se acomode a su forma inicialmente y luego se proceda con la inyección de la resina, haciendo que el compuesto tome la forma del molde; pues un primer paso para comprobar los resultados de este estudio es llevar a cabo su fabricación y modelamiento en aplicación real.

Hacer un ACV completo del biomaterial puede ser un gran aporte no solo a este estudio, sino también a la contribución al Cambio Climático, pues hoy en día se buscan desde diferentes áreas de la industria reducir el consumo de combustibles fósiles y en su lugar utilizar materiales que puedan ser sostenibles en su Ciclo de vida, desde su extracción en la naturaleza, hasta su disposición y degradación.

Por último, hacer un análisis no sólo técnico sino también de usabilidad, donde se tengan en cuenta los aspectos de uso constante de la férula, asegurando que el material sea biocompatible y no genere alteraciones en la piel como hongos, reproducción de bacterias o alergias.

8. CRONOGRAMA

No	Descripción de la actividad	Mes de inicio	Duración
1	Entrega de anteproyecto	1	1
2	Sustentación de anteproyecto	1	1
3	Revisión teórica de biomecánica de la muñeca	1	1
4	Compra de la fibra de guadua	2	1
5	Envío de la fibra de guadua	2	1
6	Llegada del biocomposito	2	3
7	Corte en probetas del biocomposito	5	1
8	Pruebas mecánicas de caracterización	5	1
9	Análisis de elementos finitos	6	1
10	Análisis ciclo de vida	6	1
11	Análisis MEB	7	1
12	Documentación	1	12

9. PRESUPUESTO

Ítem	Descripción	Valor Unitario	Cantidad	Total
1	Tejido de fibra de Guadua	\$ 30.000	4	\$ 120.000
2	Envío de tejido a País Vasco - España	\$ 45.000	1	\$ 45.000
3	Envío material de regreso a Bogotá - Colombia	\$ 45.000	1	\$ 45.000
4	Viaje a Pamplona y visita U. de Pamplona	\$ 300.000	1	\$ 300.000
5	Recubrimiento	\$ 33.400	1	\$ 33.400
6	Hora Microscopía Electrónica de barrido	\$ 117.100	2	\$ 234.200
	TOTAL			\$ 777.600

BIBLIOGRAFÍA

A, Viladot. (2001) *“Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor”*
Ed. Springer & Business Media.

American Academic of Orthopaedic Surgeons (2010) *“Síndrome del túnel carpiano (Carpal Tunnel Syndrome)”*. OrthoInfo [en línea] Disponible en:
<https://orthoinfo.aaos.org/es/diseases--conditions/sindrome-del-tunel-carpianocarpal-tunnel-syndrome>

Almaco (2011) RTM light-resina Disponible en: <http://www.almaco.org.br/3D>, D. (01 de 03 de 2018). *Descartes 3D*. Obtenido de Descartes 3D:
http://recursostic.educacion.es/descartes/web/materiales_didacticos/Calculo_matricial_d3/defmat.htm

ABC, D. (01 de 03 de 2018). *Definición ABC*. Obtenido de Definición ABC:
<https://www.definicionabc.com/general/densidad.php>

ABC, D. (01 de 03 de 2018). *Definición ABC*. Obtenido de Definición ABC:
<https://www.definicionabc.com/general/flexion.php>

APTOCA. (01 de 03 de 2018). *APTOCA*. Obtenido de APTOCA:
<https://aptoca.org/terapia-ocupacional/funciones/ortesis/>

ASTM D3039 / D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org

Benazco Ángel, L. D. (julio de 2015). Universidad de La Laguna. (E. S. Tecnología, Ed.) Recuperado el 03 de marzo de 2019, de Preparación y caracterización de fibras naturales:
<https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/1034/PREPARACION%20Y%20CARACTERIZACION%20DE%20FIBRAS%20NATURALES.pdf?sequence=1>

Cerrolaza, M. (2007). *El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Consejo de desarrollo científico y humanístico. Recuperado el 06 de septiembre de 2017

Definición, C. (01 de 03 de 2018). *Concepto definición*. Obtenido de Concepto definición: <http://conceptodefinicion.de/urea/>

Definiciones. (01 de 03 de 2018). *Definiciones*. Obtenido de <http://definicionyque.es/polimero/>

Definiciones. (01 de 03 de 2018). *Definiciones*. Obtenido de <http://www.definiciones-de.com/Definicion/de/yute.php>

Diccionario, R. (01 de 03 de 2018). *Reverso diccionario*. Obtenido de Reversos diccionario: <http://diccionario.reverso.net/espanoldefiniciones/fibra+vegetal>

Digital, G. (01 de 03 de 2018). *Guía Digital*. Obtenido de Guía Digital: <http://www.guiadigital.gob.cl/articulo/que-es-la-usabilidad>

EcuRed. (01 de 03 de 2018). *EcuRed*. Obtenido de EcuRed: <https://www.ecured.cu/Toxicidad>

Ergonomía, A. E. (01 de 03 de 2018). *Asociación Española de ergonomía*. Obtenido de Asociación Española de ergonomía: <http://www.ergonomos.es/ergonomia.php>

Etimología, D. y. (01 de 03 de 2018). *Definición y etimología*. Obtenido de Definición y etimología: <https://definiciona.com/fique/>

Facts, G. (01 de 03 de 2018). *Green Facts*. Obtenido de Green Facts: <https://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/sostenibilidad.htm>

Garrote Villar, E. (s.f.). *EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA*. Recuperado el 14 de agosto de 2017, de UPC: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-8.pdf?sequence=8>

Garrote Villar, E. (s.f.). *UPC*. Recuperado el 14 de agosto de 2017, de El ensayo de tracción directa: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-9.pdf?sequence=9>

ISO 14125 (Método B): Compuestos de plástico reforzado con fibra: determinación de las propiedades de flexión

Maya Jacob, J., & Sabu, T. (10 de junio de 2007). Biofibres and biocomposites. *Science Direct*(71), 343-364. Recuperado el 3 de marzo de 2019

Medlineplus. (01 de 03 de 2018). *Medlineplus*. Obtenido de Medlineplus: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002286.htm>

Mirlisenna. Ensayo método de elementos finitos. Recuperado el 17 de agosto de 2017 de: <https://www.esss.co/blog/es/metodo-de-elementos-finitosque-es/>

Nava Gastelum, A., Siqueiros Hernández, M., Gonzalez, B., Vega, Y., & Mendoza Muñoz, I. (19 de julio de 2018). Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras de carbono y las de su matriz polimérica de resina epóxica. *Matèria*, 23(2).

Ortopedia1. (01 de 03 de 2018). *Ortopedia1*. Obtenido de Ortopedia1: <https://ortopedia1.com/>

Parró. (01 de 03 de 2018). *Parro.com*. Obtenido de Parro.com: <http://www.parro.com.ar/definicion-de-resina+epoxi>

Programa de Excelencia Ambiental Distrital. (s.f.). *Enfoque de ciclo de vida*. Recuperado el 07 de septiembre de 2017, de Secretaría Distrital de Ambiente: http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=b10b7bf6-81fc-4fa9-9aeb-013f0e7cd743&groupId=24732

Rivas Cruz, F., & Contreras Lopez, E. (2011). Sistema de Adquisición de Datos Automatizado para Pruebas Mecánicas Uniaxial y Triaxial. *VII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica, SENIE* (págs. 218 - 227). Tapachula: Instituto de Investigaciones Eléctricas. Recuperado el 07 de mayo de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/281376117_Sistema_de_Adquisicion_de_Datos_Automatizado_para_Pruebas_Mecanicas_Uniaxial_y_Triaxial

RTM/RTM light (2008) RTM Disponible en: [http](http://)

Salud, A. (01 de 03 de 2018). *Arriba salud*. Obtenido de Arriba salud: <https://arribasalud.com/abduccion-aduccion/#.WpjCGehua00>

Salud, E. (01 de 03 de 2018). *Enciclopedia salud*. Obtenido de Enciclopedia salud: <http://www.encyclopediasalud.com/definiciones/lino>

Salud, P. (01 de 03 de 2018). *Periódico salud*. Obtenido de Periódico salud: <https://periodicosalud.com/sindrome-que-es-definiciontipos-ejemplos/>

Salud, P. d. (01 de 03 de 2018). *Periódico de salud*. Obtenido de Periódico de salud: <https://periodicosalud.com/abduccionanatomia-movimiento-definicion/>

SolidWorks. (2010). Dassault Systems. Recuperado el 02 de marzo de 2019, de Ayuda de SolidWorks: http://help.solidworks.com/2010/spanish/solidworks/cworks/legacyhelp/simulation/checking_stresses/prot_vonm.html

Tápanes, D. S. (01 de 03 de 2018). *Infomed*. Obtenido de Infomed: <http://www.sld.cu/sitios/rehabilitacion/temas.php?idv=615>

Terms, M. (01 de 03 de 2018). *Manufacturing Terms*. Obtenido de Manufacturing Terms: <https://www.manufacturingterms.com/biocomposite.html>

Vithas. (01 de 03 de 2018). *Vithas*. Obtenido de Vithas: <https://www.neurorhb.com/blog-dano-cerebral/que-es-la-terapiaocupacional/>

