

MÉTODO PARA LA FABRICACIÓN DE PRÓTESIS DINÁMICAS CON MATRIZ  
POLIMÉRICA ECONÓMICA Y REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO

ANDRÉS JULIÁN LÓPEZ SÁNCHEZ  
INGENIERÍA MECÁNICA

SAMUEL ANTONIO HENAO CADAVID  
INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN

2012

MÉTODO PARA LA FABRICACIÓN DE PRÓTESIS DINÁMICAS CON MATRIZ  
POLIMÉRICA ECONÓMICA Y REFUERZO DE FIBRA DE VIDRIO.

Andrés Julián López Sánchez

Samuel Antonio Henao Cadavid

Proyecto de Grado para aspirar al título de

Ingeniero Mecánico

Ingeniero de Producción

Asesor

Andrés Felipe Franco Bedoya

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2012

## AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestros agradecimientos a:

Nuestros padres Maria Teresa Sánchez, Carmen Alicia Cadavid, Fernando López Henao y Samuel Henao Zuluaga, que durante todos los años de nuestra carrera universitaria nos apoyaron, confiaron en nosotros y nunca perdieron la esperanza, a pesar de todos los cálculos y físicas.

A nuestro asesor Andrés Franco por su excelente disposición y sus valiosos aportes en el desarrollo de este proyecto. Gracias a él, el resultado obtenido en el proyecto superó nuestras propias expectativas.

A la profesora Carolina Mira Hernández por su interés en el proyecto, su apoyo incondicional y sobre todo por mostrarnos siempre con una sonrisa el mejor camino hacia la luz, para sacar este proyecto adelante.

A los profesores Jorge Luis Restrepo, Fabio Pineda, Santiago Paris y Francisco Botero y Leonel Castañeda por su interés en el proyecto.

Al Laboratorio de Mecatrónica, Laboratorio de Materiales, Laboratorio de Suelos y al taller de diseño; especialmente a Alejandro Ruiz, Edilson Guerra Restrepo, Carlos Arturo Restrepo, Juan Carlos Duque, Carolina Londoño, Vladimir Rodríguez, Juan Camilo Gómez y Alexander Gil por su excelente disposición en todos los momentos en los cuales solicitamos su apoyo.

Es importante resaltar los aportes que hicieron al proyecto compañeros como: Darío Pérez, David Orozco, Mauricio Tobón y Sergio Londoño, quienes pusieron sus conocimientos y experiencia en pro de la investigación.

Agradecimiento especial a todo el personal de la corporación Mahavir kmina pues creyeron en nosotros como personas y en el buen resultado de nuestra investigación.

Por último, cada uno de nosotros agradece sinceramente a su compañero de proyecto de grado por esta excelente labor y tiempo invertido para sacar adelante este proyecto.

“No sólo no hubiéramos sido nada sin ustedes  
sino con toda la gente  
que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo  
algunos siguen hasta hoy  
Gracias... Totales”

Gustavo Cerati

## CONTENIDO

	<b>Pag.</b>
1 ASPECTOS GENERALES .....	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	15
1.3 OBJETIVOS .....	17
1.3.1 Objetivo general .....	17
1.3.2 Objetivos específicos .....	17
2 ESTADO DEL ARTE .....	19
2.1 DEFINICIÓN DE PRÓTESIS.....	19
2.2 TIPO DE PROTESIS .....	20
2.3 PROTESIS DINAMICAS .....	21
2.3.1 Prótesis dinámicas fabricadas por la compañía Össur .....	21
2.3.2 Prótesis dinámicas fabricadas por la compañía Otto bock .....	23
2.4 CARACTERISTICAS DE LA MARCHA HUMANA REGULAR.....	24
2.5 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS .....	27
2.5.1 Fibra de carbono .....	29
2.5.2 Fibra de vidrio .....	30
2.5.3 Matriz polimérica (Resina) .....	31
2.6 TECNICAS DE MOLDEO.....	33
2.6.1 Moldeo por contacto manual.....	33
2.6.2 Método de inyección <i>Resin Transfer Mouldin</i> (RTM).....	34
2.6.3 Método de RTM light.....	34
2.6.4 Método del Vacuum Bagging.....	35
2.7 CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DE UN METODO DE FABRICACION.....	37

2.8	EL PROCESO DE DISEÑO POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS .....	38
3	DEFINICION DE LA GEOMETRIA DEL ELEMENTO .....	40
3.1	EL CICLO DE MARCHA HUMANA.....	40
3.2	PATRÓN DE MARCHA HUMANA EN LA FASE DE APOYO.....	41
3.2.1	<i>Heel strike</i> .....	42
3.2.2	<i>FOOT FLAT</i> .....	42
3.2.3	<i>HEEL OFF</i> .....	43
3.3	PATRÓN DE MARCHA HUMANA EN LA FASE DE BALANCEO .	44
3.4	DISEÑO DE LAS PROTESIS.....	45
4	SELECCIÓN DE MATERIAL DEL ELEMENTO PROTESICO .....	48
4.1	FABRICACIÓN DE PROBETAS .....	49
4.2	SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS .....	50
4.3	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL .....	52
4.4	CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS UNIDIRECCIONALES CON ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS A 0° Y 90° RESPECTO A LA CARGA APLICADA. ....	54
4.5	CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS UNIDIRECCIONALES CON ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS A 45° RESPECTO A LA CARGA APLICADA. ....	55
4.6	DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS DEL MATERIAL .....	56
4.6.1	Ecuaciones para caracterización de láminas unidireccionales por método de incineración (Knytex).....	57
4.6.2	Ecuaciones para caracterización de tejidos equilibrados por método de incineración (Woven Roving).....	58
4.6.3	Ecuaciones para caracterización de láminas tipo MAT por método de incineración (MAT) .....	58
4.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	60
5	REVISIÓN DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL DISEÑO DE LA PROTESIS.....	62

6	MÉTODOS PARA LA FABRICACION DE LA PROTESIS EN MATERIALES COMPUESTO.....	65
6.1	SELECCION DEL MÉTODO Y DISEÑO DE UN MOLDE .....	65
6.2	FABRICACIÓN DEL MOLDE PARA LAS PROTESIS PROTOTIPO.....	69
7	ELABORACION DE LOS PROTOTIPOS Y ENSAYOS .....	74
7.1	CARACTERISTICAS DE LOS PROTOTIPOS.....	74
7.2	FABRICACIÓN DE PROTESIS PROTOTIPO SEGÚN LAS CARACTERISTICAS DE MATERIAL DEFINIDO Y METODO DE LAMINADO SELECCIONADO.....	75
7.3	ENSAYO DE LAS PROTESIS PROTOTIPO. ....	75
7.4	PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS .....	76
7.5	ENSAYO DE COMPRESIÓN REALIZADO .....	78
7.5.1	Resultados obtenidos en el ensayo de compresión.....	79
7.6	ENSAYO DE PRUEBA CÍCLICA REALIZADO .....	81
7.6.1	Resultados obtenidos en el ensayo cíclico .....	82
8	CONCLUSIONES .....	84
9	BIBLIOGRAFÍA.....	86

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Modelo <i>Flex-Run</i> de la compañía Össur .....	22
Figura 2: Modelo <i>Cheetah</i> de la compañía Össur .....	22
Figura 3: Modelo <i>C-Sprint</i> por la compañía Otto bock .....	23
Figura 4: Modelo <i>Sprinter</i> por la compañía Otto bock .....	24
Figura 5: descripción gráfica de flexión y dorsiflexión .....	25
Figura 6: <i>Heel Strike</i> (Marcha regular) .....	25
Figura 7 <i>Foot Flat</i> (Marcha regular).....	26
Figura 8 <i>Heel Off</i> (Marcha regular).....	26
Figura 9: Relación de resistencia según el contenido de vidrio y la morfología del refuerzo.....	28
Figura 10: Características de algunos refuerzos. ....	29
Figura 11: Propiedades mecánicas de la fibra de carbono .....	30
Figura 12: Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio.....	31
Figura 13: Matrices poliméricas.....	32
Figura 14: Comparación de características mecánicas.....	36
Figura 15 Plano sagital de la marcha humana .....	41
Figura 16: Primer contacto con el suelo durante la marcha acelerada .....	42
Figura 17: <i>Foot Flat</i> (Marcha acelerada) .....	43
Figura 18: <i>Heel Off</i> (Marcha acelerada) .....	43
Figura 19: Aceleración (Marcha acelerada).....	44
Figura 20: Desaceleración (Marcha acelerada).....	45
Figura 21 Plano Prótesis prototipo .....	46
Figura 22 Dimensiones probeta.....	50

Figura 23: Nomenclatura materiales propuestos .....	50
Figura 24 Sistema de coordenadas del elemento .....	62
Figura 25 Mallado de la pieza.....	63
Figura 26 Deformación máxima del elemento en el estado de carga inicial ....	64
Figura 27 Molde 1 RTM .....	68
Figura 28 Molde 2 RTM .....	68
Figura 29 Ensamble Molde RTM .....	69
Figura 30 Corte por láser del conformado de la pieza.....	70
Figura 31 Modelo en madera del elemento .....	70
Figura 32: Geometría inicial del molde, con 7 piezas de aglomerado.....	71
Figura 33 Molde sin pulir .....	71
Figura 34: Molde final .....	72
Figura 35 Corte preformas fibra de vidrio .....	76
Figura 36 Laminado manual prótesis .....	77
Figura 37 Vacío con bolsa .....	78
Figura 38 Grafico de Carga vs Deformación .....	81
Figura 39: Comportamiento cíclico del prototipo con amplitud doble de 40mm	82
Figura: 40 Probetas de materiales compuestos .....	89
Figura 41: Procedimiento de Corte con agua .....	90
Figura 42: Montaje INSTRON 3366 y <i>Schenk Trebel</i> .....	90
Figura 43: Ensayo de ruptura MAT.....	91
Figura 44: Ensayo de ruptura Knytex 0° .....	91
Figura 45: Resultado de ensayo Knytex 0°.....	92
Figura 46: Resultado de ensayo Knytex 90°.....	92
Figura 47: Resultado de ensayo Knytex 45°.....	92
Figura 48: Resultado de ensayo Woven Rovin .....	92

Figura 49: Resultado de ensayo MAT .....	93
Figura 50: <i>Strain Gage</i> tipo "Y" biaxiales ref 1-XY11-6/350 ohm .....	93
Figura 51: Montaje de probetas con galgas extensométricas .....	95
Figura 52: Probeta de incineración .....	96
Figura 53: Probetas sometidas a 800°C .....	96
Figura 54: Resultado de la probetas sometidas a incineración. ....	97

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mecánicas de las matrices poliméricas más comunes	33
Tabla 2: Grupo 1 Refuerzo y resina Poliéster Insaturado 30805	50
Tabla 3: Grupo 2 Refuerzo resina Poliéster 30805 al 70% y 30872 al 30%	51
Tabla 4 Grupo 3: Refuerzo resina Vinyléster A430	52
Tabla 5: Probetas correspondientes a la norma.	53
Tabla 6 GRUPO 1: Refuerzo y resina Cristalan (poliéster insaturado 30805)	56
Tabla 7 GRUPO 2: Refuerzo y resina Cristalan (poliéster insaturado 30805 Al 70% Y 30872 Al 30%	56
Tabla 8 GRUPO 3: Refuerzo y Resina Palatal (vinyléster A430)	57
Tabla 9: Propiedades del material obtenidas de la incineracion de las probetas	59
Tabla 10 Características de los procesos de moldeo	66
Tabla 12 Datos ensayo de compresión	79

## LISTA DE ANEXOS

Apéndice A: Caracterización de material.....	89
Apéndice B: Fichas técnicas.....	98
Apéndice C: Grafica ensayos de tensión realizados a la probetas. ....	133
Apéndice D: Cotizaciones.....	153
Apéndice E: Patente US4822363. ....	163
Apéndice F: Norma ASTM D3039. ....	181
Apéndice G: Planos. ....	197

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo está orientado a la selección de un método para la fabricación de un conjunto de prototipos de prótesis dinámicas de miembros inferiores, haciendo uso de una matriz polimérica económica y refuerzo de fibra de vidrio que se ajusten a las necesidades de resistencia y geometría definidas.

El propósito con cada una de las fases desarrolladas en proyecto de grado es determinar los aspectos generales de los problemas planteados y por medio de una propuesta de geometría, material y método de fabricación obtener dos piezas construidas por medio de una metodología económica de fabricación de prototipos y así poder realizar ensayos mecánicos a dichos prototipos y analizar su comportamiento.

La primera fase comienza con una serie de análisis que permiten definir una geometría inicial a partir de la que se identifican unas características mecánicas para el elemento protésico sobre el que se basa el desarrollo de este proyecto.

Después de tener definido el diseño y por medio de una caracterización de materiales se identifican las matrices poliméricas y los refuerzos que pueden entregar mejores resultados.

Con los resultados de la fase anterior y con la ayuda de un software de elementos finitos, ANSYS, como herramienta de diseño, se establecen los puntos más críticos de resistencia del diseño y se simulan las posibles combinaciones de material que bajo un costo moderado que puedan hacerlo más eficiente.

Una vez fabricados los prototipos estos son sometidos a una serie de pruebas para evaluar su respuesta a condiciones de carga que simulan las condiciones de servicio de la pieza.

## 1 ASPECTOS GENERALES

Para el desarrollo de la investigación varios de los análisis que están plasmados en ese documento se enfocan a las características de un elemento protésico para un joven de aproximadamente 15 años con amputación unilateral. Lo que significa que el desarrollo no sea aplicable a un individuo con características diferentes. Además es importante señalar que para la fabricación de la prótesis prototipo se utilizan materiales económicos y asequibles en el mercado local. Esto con el fin de brindar una opción de un nuevo producto a personas con movilidad reducida de bajos recursos económicos que de alguna manera deseen iniciar un proceso deportivo por su cuenta.

Para fomentar esto, Las prótesis prototipo fabricadas, estarán al alcance de la corporación colombiana Mahavir-Kmina y serán donadas al joven Santiago Osorio de 15 años de edad, el cual es apoyado por dicha corporación.

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las prótesis dinámicas también llamadas prótesis de alto impacto, están diseñadas para atletas de alto rendimiento y su costo puede variar entre los 5'000.000 COP y 7'000.000 COP. Sin embargo, es posible obtener características similares a las prótesis comerciales por medio de métodos de fabricación simples y materiales de menos resistencia mecánica. Con estos ajustes es posible llevar a cabo un producto con un desempeño adecuado y un valor asequible para el usuario final, diseñado especialmente para usuarios que deseen simplemente realizar una actividad física moderada a pesar de su condición de movilidad reducida. (TOBON, 2010)

En la actualidad un gran número de personas están en condiciones de recibir prótesis transtibiales de alto impacto con el fin de realizar actividades atléticas, pero por motivos económicos no están en condiciones de cubrir los altos gastos que esto requiere. (TOBON, 2010)

Para esto es importante realizar cambios en los materiales frecuentemente utilizados en las prótesis comerciales de alto impacto y en los proceso de manufactura comúnmente utilizados en productos elaborados con materiales compuestos. Esto conduce a la obtención de un nuevo modelo de prótesis, del cual se espera obtener un prototipo económico en comparación con los productos ofrecidos en el mercado, como los modelo *Flex-Run* y *Cheetah*,

ofrecidos por la compañía ÖSSUR, que es reconocida por brindar las prótesis al velocista sudafricano Oscar Pistorius.

Luego de determinar las diferentes características de los posibles materiales, se considera entonces fabricar dos prototipos de prótesis; estos serán sometidos a pruebas de compresión con el fin de identificar la resistencia máxima del producto.

La deformación del elemento protésico, es una de las características más importantes en el desarrollo de prótesis dinámicas, puesto que se debe garantizar en el momento del impacto, la energía sea absorbida por el elemento protésico y éste no se transfiera al muñón del usuario.

Estos valores de deformación se determinan por medio de un estudio realizado a cada uno de los usuarios, depende estrictamente de la condición de discapacidad que tenga cada persona. (PELAEZ, 2011)

De esta manera se busca obtener un prototipo con características geométricas definidas en el estudio del estado del arte, análisis de marcha, y en la caracterización del material. Posterior se simula para observar su comportamiento por medio de un software de elementos finitos con fin de determinar el comportamiento bajo ciertos estados de carga previamente identificados, los cuales se denominan condiciones de frontera. (LOPEZ SANCHEZ, 2009)

Para la selección del método de manufactura, se tuvieron presente algunas de las técnicas más comunes a la hora de fabricar piezas de matriz polimérica reforzadas con fibra de vidrio. Estos métodos son: RTM convencional, Vacuum Bagging, RTM light, Laminado manual, Infusión por vacío.

Una vez seleccionado el método se propone el diseño de un molde para este. Sin embargo el método seleccionado no será necesariamente el utilizado para la fabricación de las prótesis prototipo, debido a que los costos que implica la construcción de un molde de buenas características es elevado y la fabricación de los prototipos no justifica una inversión como esta, la cual podrá justificarse bajo un esquema de producción en volúmenes medios o altos (entre 50 – 5000 piezas mensuales).

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

No se conocen en Colombia estadísticas oficiales y públicas que consolide el número total de amputados de miembro inferior. Mahavir Kmina, una organización Colombiana dedicada a la fabricación de prótesis, estima que este

número puede alcanzar más de 20,000 colombianos, de los cuales las principales causas de amputación de miembro inferior son: minas antipersonas, conflicto armado, accidentes de tránsito, accidentes de trabajo, diabetes y otros problemas de salud. (TOBON, 2010)

En Colombia las personas amputadas tienen grandes obstáculos para reintegrarse a la vida laboral, dadas sus limitaciones físicas y la falta de infraestructura física que se adecue a sus necesidades. (TOBON, 2010)

Una opción en la cual las personas amputadas, se puedan reintegrar a la sociedad de una manera activa, en la que se sientan productivas, consiste en poner a su alcance prótesis económicas, seguras y que cumpla estándares de calidad.

Para cada necesidad existe una prótesis especial. Las prótesis dinámicas de alto impacto son una muestra de esto porque ofrecen un excelente desempeño a las personas con movilidad reducida que tengan la intención de practicar actividades atléticas moderadas.

Actualmente el mercado cuenta con productos óptimos que facilitan a las personas amputadas realizar actividades físicas de alto impacto como por ejemplo el *Flex-Foot Spring* de la compañía ÖSSUR. Este es un producto fabricado con una matriz polimérica y un refuerzo en fibra de carbono, lo cual ofrece un excelente desempeño y una alta seguridad. Sin embargo, estas prótesis están fuera de la capacidad de adquisición de la mayoría de las personas amputadas, debido a su alto costo.

Existen en Colombia pocas empresas que comercializan prótesis transtibiales de alto impacto. Otto bock y Össur son las marcas distribuidas a los usuarios colombianos y su costo varía según las condiciones físicas y medidas antropométricas de los usuarios. Se puede esperar que estos productos en Colombia tengan un precio que oscile entre COP \$3'000.000 y COP \$ 5'000.000. (TOBON, 2010)

En la ciudad de Bogotá existen tres empresas dedicadas a la comercialización de prótesis de respuesta dinámica, las cuales son: Otto bock, Laboratorio de Ortesis y Prótesis Gilete y Ortoprotésicos. Los productos comercializados por estas empresas corresponden a prótesis fabricadas por Össur y por lo tanto su costo puede llegar a ser bastante alto, según las especificaciones del usuario. (PELAEZ, 2011)

Materiales como la fibra de carbono no son fáciles de adquirir en el mercado regional y su costo es relativamente superior en comparación de los refuerzos de fibra de vidrio que se proponen para este desarrollo. La fibra de vidrio y las matrices poliméricas no permiten obtener productos de tan alta resistencia en comparación con aquellos fabricados con fibra de carbono, sin embargo se puede obtener buenos resultados de resistencia mecánica y se adquieren fácilmente en el mercado regional a un precio moderado. (DUQUE, 2010)

Este desarrollo permite fomentar de manera indirecta el deporte paralímpico. Hoy en día cualquiera de las modalidades de las competencias paralímpicas tiene igual impacto social y divulgación que cualquier otro tipo de competencias deportiva. Este es el caso del sudafricano Oscar Pistorius, que ha mostrado un gran despliegue de talento a pesar de haber sido amputado de ambas extremidades inferiores, cuando tenía apenas 11 meses de edad y el cual realiza sus actividades atléticas con prótesis fabricadas por la compañía ÖSSUR. (PISTORIUS, 2007)

En Colombia también han venido tomando fuerza las competencias paralímpicas. El atletismo en silla de ruedas, el baloncesto en silla de ruedas, el ciclismo, y levantamiento de pesas son algunas de las modalidades en las que se pueden observar a colombianos con movilidad reducida compitiendo y dando muestra de un gran talento. (CIREC, 2011)

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo general

Seleccionar un método para la fabricación de prótesis dinámicas con matriz polimérica económica y refuerzo de fibra de vidrio, que se ajusten a las necesidades de resistencia y geometría requeridas.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Definir la geometría y las características mecánicas de la prótesis, basándose en el estado del arte.
- Establecer los puntos críticos de resistencia del diseño de la prótesis para la ubicación de refuerzos en caso de ser necesario, a partir de una geometría definida.
- Identificar las posibles combinaciones de material polimérico y refuerzos de fibra que proporcionen una resistencia mecánica requerida y un costo moderado del producto.

- Seleccionar un método de fabricación para la prótesis dinámica, con base en el resultado obtenidos previamente.
- Llevar a cabo la fabricación del molde con toda la información recopilada de los anteriores objetivos.
- Fabricar un conjunto de prótesis para evaluar su resistencia y verificar el funcionamiento del molde.
- Realizar pruebas de resistencia mecánicas sobre los prototipos de prótesis.

## 2 ESTADO DEL ARTE

Actualmente los avances en materia de discapacidad apuntan al diseño y fabricación de diferentes tipos de prótesis que permiten realizar actividades cada vez más exigentes, buscando asemejar de la mejor manera posible la respuesta antropométrica que tienen los elementos protésicos con respecto a los miembros reales. Un claro ejemplo de esto, son los desarrollos realizados por la empresa multinacional Össur que se ha destacado por su aporte en prótesis para la realización de actividades físicas exigentes.

Se realizan constantemente eventos dedicados a las personas con discapacidad como los son los juegos paralímpicos en calidad profesional (International Paralympic Committee (IPC), 1999) que son la representación a nivel mundial pero que a su vez tiene comités regionales alrededor del mundo en casi todo los países. Colombia está representada por el Comité paralímpico Colombiano entidades que se dedican a fomentar la autonomía de las personas con movilidad reducida.

Hoy en día se puede ver gran cantidad de atletas paralímpicos que representan un ejemplo a seguir por muchos. Es el caso del atleta sudafricano Oscar Pistorius conocido también como *Blade Runner* generó en el mundo entero una gran admiración al quedar en segundo lugar en *Golden Gala de Roma* contra atletas que en condiciones normales y por competir en los juegos olímpicos de Londres 2012 frente a atletas en condiciones físicas óptimas (PISTORIUS, 2007)

### 2.1 DEFINICIÓN DE PRÓTESIS

Según la oficina nacional de salud integral para la población discapacidad, una prótesis es una extensión artificial que se utiliza para reemplazar una parte del cuerpo humano que falta. Las prótesis son típicamente utilizadas en partes que han sido amputadas por heridas (traumáticas) o que faltan de nacimiento (agenesia).

En la actualidad existe una gran variedad de prótesis, las cuales se clasifican según el tipo de disfunción que tenga la persona. Prótesis dentales, oculares, de miembros superiores e inferiores (brazos y piernas), son algunos de los tipos más comunes y cumplen una excelente función al reemplazar de manera parcial una parte del cuerpo que falta, brindándole a la persona llevar una vida relativamente normal.

Las prótesis de miembros inferiores se clasifican en:

Amputación Bajo rodilla ó (Transtibial)

Amputación Sobre rodilla ó (Transfemoral)

Desarticulación de cadera.

(TOBON, 2010)

## 2.2 TIPO DE PROTESIS

La Compañía multinacional Össur define los tipos de prótesis de la siguiente manera:

- Bajo Impacto (Nivel 1): Diseñadas para permitir a la persona caminar de manera tranquila y realizar actividades en las cuales no se requiera de mucha fortaleza física como labores en el hogar, realizar compras, jardinería etc.
- Impacto moderado (Nivel 2): Permiten realizar actividades cotidianas que requieran un poco más de capacidad física como por ejemplo: Caminatas largas, golf y trabajos de campo.
- Alto impacto (Nivel 3): Para realizar trabajos en los que se requieran acciones rigurosas estas prótesis son las adecuadas. Trabajos en construcciones, pequeños saltos, impactos repetitivos moderados, y esfuerzos corporales altos son algunas de las actividades que se pueden realizar con este tipo de prótesis.
- Nivel deportivo (Nivel 4): Las actividades que obligan a realizar un impacto extremo y repetitivo sobre la prótesis son consideradas de nivel deportivo. Para la práctica de deportes como el atletismo este modelo es el adecuado. (Impact Levels (Ossur), 2010).

La compañía Össur lleva trabajando en este mercado hace aproximadamente 30 años y en la actualidad es una de las compañías líderes en el diseño y fabricación de dispositivos prostéticos de alta tecnología. Las *Flex-Sprint Foot* o *Cheetah* son uno de los modelos de prótesis que fabrica la compañía para personas con capacidad física limitada que deseen tener una vida más activa. (Modular III (Ossur), 2010)

## 2.3 PROTESIS DINAMICAS

Comúnmente se conoce como prótesis dinámicas, a aquellos elementos protésicos que tienen la capacidad de almacenar energía en el momento del impacto con el suelo y liberarla en la fase de balanceo. Con esto no sólo se logra amortiguar el impacto que se genera en el momento de la marcha, sino que permite llevar a cabo la marcha de manera natural.

En la actualidad el mercado ofrece cierta cantidad de prótesis dinámicas, con geometrías relativamente similares determinadas por el fabricante. Por razones de propiedad intelectual, la justificación de estas geometrías no se encuentra disponible para el público, algunas de las marcas más comunes que comercializan este tipo de prótesis son:

### 2.3.1 Prótesis dinámicas fabricadas por la compañía Össur

Esta empresa presenta al público varios modelos con características que son definidas por el tipo de impacto para el que sean requeridas. Dentro de su catálogo Össur define sus prótesis dinámicas como *Flex-Foot* y determina sus cualidades por dos puntos fundamentales que la empresa define como “revolucionarios” para las pretensiones de aquellas personas con movilidad reducida.

La primera de las cualidades a las que hace referencia la compañía Össur consiste en la función de almacenamiento y retorno de energía, la cual es inherente al diseño en fibra de carbono del *Flex-Foot* con número de patente US4822363 radicado en los Estados Unidos. (Véase el Apéndice E)

La segunda cualidad consiste en la absorción vertical que permite una marcha más natural, de esta manera se protege el muñón y el resto de articulaciones del lado amputado del golpe excesivo que se produce al apoyar el peso del cuerpo sobre la prótesis.

Össur cuenta específicamente con dos modelos en las cuales se basa este proyecto.

- El modelo *Flex-Run* es una prótesis hecha a medida, para correr grandes distancias o para deportes recreativos, es un modelo que ofrece un peso ligero, además flexibilidad vertical y un retorno de energía muy eficaz (Véase el Apéndice B)

Figura 1: Modelo *Flex-Run* de la compañía Össur



Fuente: Catalogo Össur,

- El modelo *Cheetah* es una de las prótesis dinámicas más conocidas gracias al atleta sudafricano Oscar Pistorius, este modelo está diseñado para actividades de alto impacto y al igual que el modelo *Flex-Foot*, es fabricada según las medidas antropométricas de los usuarios (Véase el Apéndice B).

Figura 2: Modelo *Cheetah* de la compañía Össur



Fuente: Catalogo Össur,

Ambos modelos de la compañía son utilizados en amputaciones transtibiales y la diferencia de cada uno depende estrictamente del nivel de amputación del usuario. El modelo *Flex-Run* se utiliza en casos en los que el muñón del usuario es considerado “largo” y el modelo *Cheetah* es utilizado en casos en los que el muñón del usuario se considera “corto” (PELAEZ, 2011)

### 2.3.2 Prótesis dinámicas fabricadas por la compañía Otto bock

Esta empresa presenta dos modelos de prótesis dinámicas transtibiales de alto impacto para uso deportivo, recreativo o para competiciones.

El modelo *C-Sprint* consiste en un pie fabricado a la medida, este proporciona absorción de energía y aerodinámica. El contacto tiene lugar por medio de tacos roscados en la suela que mejoran la adherencia (Véase el Apéndice B).

Figura 3: Modelo *C-Sprint* por la compañía Otto bock



Fuente: Catálogo Otto bock

El modelo *Sprinter*, además de servir para amputados transtibiales, también puede ser utilizada por amputados transfemorales, es una prótesis utilizada en competencias internacionales, además se destaca por tener una buena propulsión gracias a su refuerzo perfilado y reducción del desgaste. Véase el Apéndice B

Figura 4: Modelo *Sprinter* por la compañía Otto bock



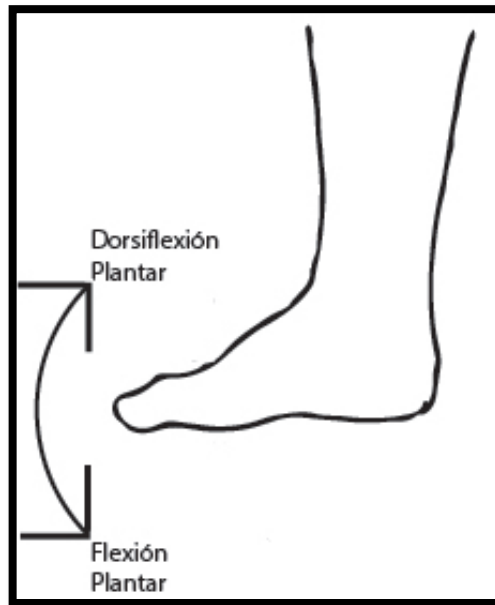
Fuente: Catálogo Otto bock

#### 2.4 CARACTERISTICAS DE LA MARCHA HUMANA REGULAR

La marcha humana presenta variaciones según la condición que se lleve a cabo. La acción de caminar es considerada una marcha humana regular, mientras que correr se reconoce como marcha humana acelerada. (PELAEZ, 2011)

La rotación de la planta del pie con respecto a la articulación del tobillo se conoce como flexión y dorsiflexión a continuación se muestra un gráfico que ilustra esos movimientos.

Figura 5: descripción gráfica de flexión y dorsiflexión

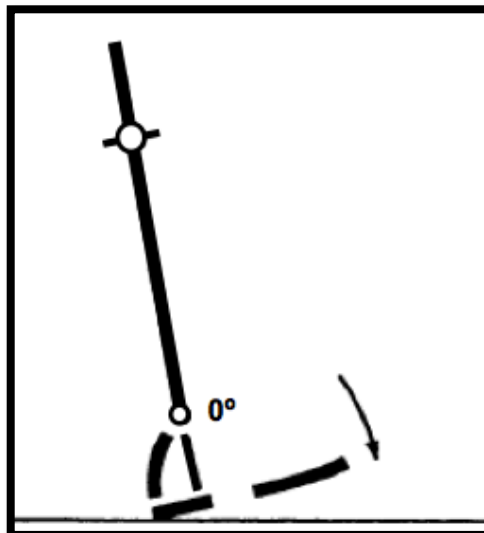


Fuente propia de los Autores

Las diferentes etapas de un paso completo durante la fase de apoyo consisten en:

- *Heel Strike*: Momento en que el talón hace contacto con el suelo.

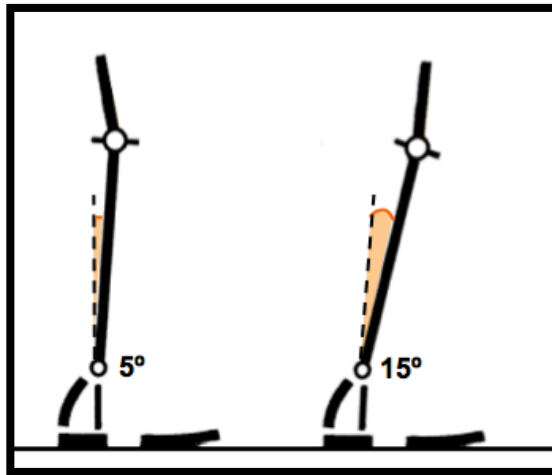
Figura 6: *Heel Strike* (Marcha regular)



Fuente (HERNANDES STENGELE , 2008)

- *Foot Flat*: Momento en que el área total de la planta del pie se ubica completamente en el suelo.

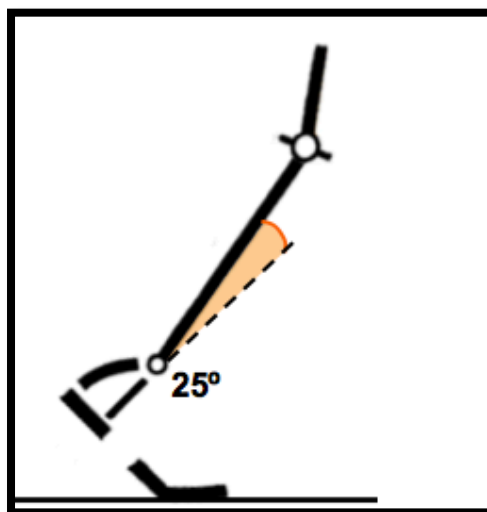
Figura 7 *Foot Flat* (Marcha regular)



Fuente (HERNANDES STENGELE , 2008)

- *Heel Off*: En este momento el talón se despegó del suelo y la parte frontal de la planta del pie sigue en contacto.

Figura 8 *Heel Off* (Marcha regular)



Fuente (HERNANDES STENGELE , 2008)

- *Toe Off*: Se libera toda la carga del pie. En este momento no se tiene contacto con el suelo. (TORRES VELÁSQUEZ, 2009)

Las diferentes etapas de un paso completo durante la fase de balanceo consisten en:

- **Aceleración:** Es el aumento de la velocidad del extremo del miembro inferior en el momento en que ocurre el Toe Off.
- **Balanceo Medio:** La pierna en movimiento sobrepasa la pierna de apoyo.
- **Desaceleración:** La pierna desacelera al momento previo del Heel Strike. (HERNÁNDEZ, 2008)

## 2.5 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se definen como una mezcla macroscópica entre dos o más materiales sintéticos o naturales, al combinarse proporcionan propiedades mecánicas superiores a las de sus componentes. (MIRAVETE, 2000)

los materiales compuestos de interés en este desarrollo, consisten de dos elementos principales, se definen como:

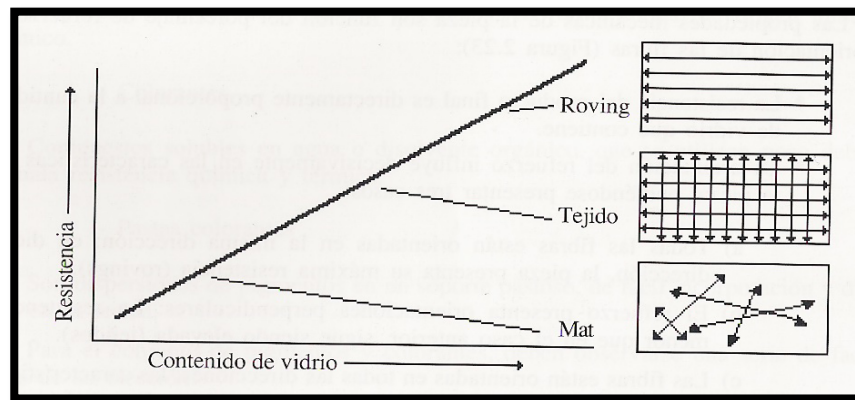
- **Matriz o resina:** Mantiene la estructura del compuesto, uniendo las fibras por medio de su característica adhesiva. La matriz, es el componente encargado de transferir la carga hacia las fibras y a su vez, las protege térmica y químicamente. (REINHARD, 1998)
- **Reforzante o fibra:** Se encarga de reforzar el compuesto aportando resistencia mecánica, rigidez y dureza y es el determinante para obtener las principales propiedades mecánicas (MIRAVETE, 2000)

Al fabricar un material compuesto reforzado con fibras, es necesario tener en cuenta factores tales como: longitud, orientación de las fibras, relación entre la cantidad de fibra y resina y las propiedades del refuerzo.

- **Longitud:** La longitud de la fibra que compone el material puede variar según las necesidades que se tengan. Los bordes de las fibras son los sectores que soportan menos carga, por esta razón es conveniente fabricar el elemento haciendo uso de fibras suficientemente largas y así aumentar la capacidad de absorción de carga. (TORRES VELÁSQUEZ, 2009)
- **Cantidad de fibras:** En cuanto a la resistencia, una fracción volumétrica mayor de fibras aumenta la rigidez de las piezas fabricadas con matriz polimérica y refuerzo de fibra de vidrio. La combinación 70% - 30% es la más común en el desarrollo de materiales compuestos, siendo el 30% la cantidad de fibras y 70% la cantidad de resina necesaria para completarlo.

- **Orientación:** En el compuesto las fibras se disponen comúnmente en dirección paralela a las cargas, estos arreglos de fibras largas y unidireccionales producen propiedades anisotrópicas, aumentando la resistencia y rigidez en la dirección de las fibras. Por esta razón la resistencia disminuye a medida que la orientación aumenta de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  (KIM & MIRAVETE, 1992)

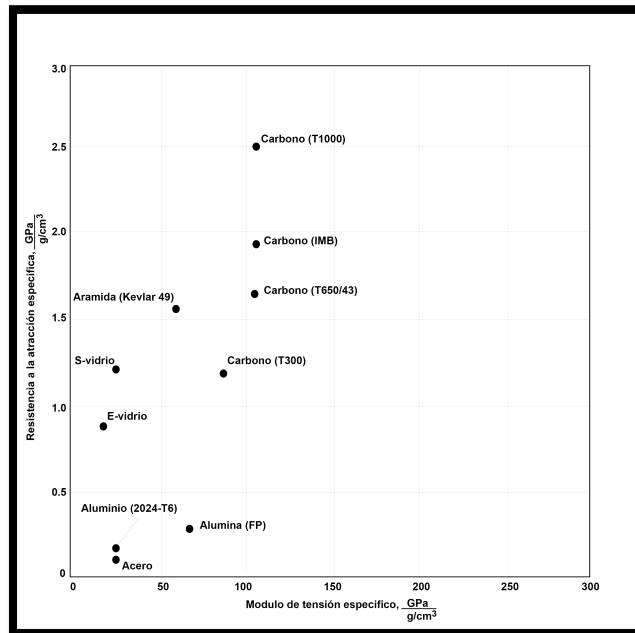
Figura 9: Relación de resistencia según el contenido de vidrio y la morfología del refuerzo



Fuente (MIRAVETE, 2000)

Este desarrollo se enfoca en materiales compuestos por matriz polimérica y refuerzo de fibra de vidrio. Aun así, se toma como referencia la fibra de carbono por ser el refuerzo utilizado comúnmente en los elementos protésicos ofrecidos por las empresas Össur y Otto bock. En términos generales el desempeño de diferentes fibras se aprecia en la Figura a continuación.

Figura 10: Características de algunos refuerzos.



Fuente (REINHARD, 1998)

### 2.5.1 Fibra de carbono

Es considerado un material ideal para aplicaciones de estructuras sometidas a fatiga, sus propiedades mecánicas se comportan adecuadamente al estar sometida a cargas cíclicas. Otra propiedad mecánica importante de la fibra de carbono es su baja densidad, esto implica que sus características mecánicas específicas sean elevadas. (MIRAVETE, 2000)

Este tipo de refuerzo tiene un costo más elevado que la fibra de vidrio (Véase el Apéndice D)

Se conocen tres tipos de fibra de carbono que se diferencian por variaciones de sus características mecánicas

Figura 11: Propiedades mecánicas de la fibra de carbono

Designación	Alta resistencia (HR)	Alto módulo (HM)	III
Diámetro de hilo ( $\mu\text{m}$ )	8	7	7-8
Densidad ( $\text{Kg/m}^3$ )	1740-1760	1810-1870	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a tracción (GPa)	2,6-5	2,1-2,7	3,1
Elongación a la rotura (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coefficiente expansión térmica ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	2,56	2,56	2,56

Fuente (MIRAVETE, 2000)

La fibra de carbono, está disponible en presentaciones como *Roving*, *Woven Roving*, tejidos híbridos y tejidos preimpregnados

El mercado local proporciona la fibra de carbono de alto módulo (HM) en las siguientes presentaciones:

- *Roving*: Tejido unidireccionales de 334gr/m<sup>2</sup>
- *Woven Roving*: Tejidos bidireccionales de 128 gr/m<sup>2</sup> y 190 gr/m<sup>2</sup>

(SUMIGLAS S.A.)

### 2.5.2 Fibra de vidrio

Debido a su gran disponibilidad en el mercado, sus buenas características mecánicas y su bajo costo; la fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en la actualidad.

La fibra de vidrio proporciona alta adherencia entre la matriz y el refuerzo, buena resistencia mecánica, poca sensibilidad a las variaciones de temperatura, alta flexibilidad y bajo costo.

Se conocen distintos tipos de fibra de vidrio que presentan variaciones en sus propiedades mecánicas.

Figura 12: Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio.

<b>Tipo</b>	<b>Vidrio A</b>	<b>Vidrio E</b>	<b>Vidrio S</b>	<b>Vidrio R</b>
Diámetro de hilo ( $\mu\text{m}$ )	5-13	10-20	10	10
Densidad ( $\text{Kg/m}^3$ )	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente expansión térmica ( $10^{-6}/^{\circ}\text{K}$ )	8,6	5	5,1	5

Fuente (MIRAVETE, 2000)

La fibra de vidrio está disponible en numerosas presentaciones y en el mercado local se conoce una amplia selección de fibra de vidrio tipo E.

- *MAT*: Tela no tejida de 225 gr/m<sup>2</sup>, 300gr/mt<sup>2</sup>, 450 gr/m<sup>2</sup> y 600gr/m<sup>2</sup>
- *Woven Roving*: Tejidos bidireccionales de 110 gr/m<sup>2</sup> y 180 gr/m<sup>2</sup>, 300 gr/m<sup>2</sup>, 600 gr/m<sup>2</sup> y 800 gr/m<sup>2</sup>
- *Roving*: Tejido unidireccional de 900 gr/m<sup>2</sup>

(SUMIGLAS S.A.)

### 2.5.3 Matriz polimérica (Resina)

Las principales matrices utilizadas para la formación de materiales compuestos se clasifican en dos categorías principales: termoestables y termoplásticas.

Las resinas termoestables son las más utilizadas en materiales compuestos, son consideradas resinas líquidas que deben curarse o endurecerse para alcanzar el estado sólido. Este proceso de polimerización se lleva a cabo a temperatura ambiente o a altas temperaturas controladas para acelerar el proceso. Una vez se logra el curado, la matriz alcanza las propiedades mecánicas óptimas. (MIRAVETE, 2000)

Figura 13: Matrices poliméricas.

INORGÁNICAS	CEMENTO, GEOPOLÍMEROS, YESO	
	MATRICES CERÁMICAS MATRICES METÁLICAS	
ORGÁNICAS	TERMOESTABLES	EPOXI, VINILESTER, POLIESTER, FENÓLICA, ESTERES CIANATO, BISMALEIMIDAS, POLIIMIDAS, POLIETERAMIDA
	TERMOPLÁSTICAS	POLICLORURO DE VINILO (PVC) COPOLÍMEROS DE ESTIRENO (ABS,SAN), POLIETILENO (PE), POLIPROPILENO (PP), POLICARBONATO (PC), POLIMETACRILATO DE METILO (PMMA), ACETATO, POLIESTIRENO (PS), POLIOXIMETILENO (POM), PBT, POLIETERIMIDA, PET, NYLON, POLIAMIDA, PEEK, PEKK, PAI, PAS

Fuente: (MIRAVETE, 2000)

- **Resina de poliéster insaturado.** Son las más utilizadas debido a su economía y a su compatibilidad para ser reforzados con fibras estructurales, además presenta buenas propiedades mecánicas bajo tensión y buena resistencia al impacto. (TORRES VELÁSQUEZ, 2009)
- **Resinas vinyléster.** Este grupo de resinas presenta buenas cualidades mecánicas y una excelente resistencia a la fatiga y a la corrosión. Su fluidez facilita su impregnabilidad y moldeo así como una buena adhesión sobre los refuerzos de fibras. (MIRAVETE, 2000)
- **Resinas epóxicas.** Son matrices generalmente superiores al poliéster en cuanto a la resistencia térmica y química. Aún así es una resina de limitado servicio debido a que el curado debe ser realizado con controles de temperatura o presión, y su costo es significativamente mayor a las matrices vinyléster y poliéster. (REINHARD, 1998)

Tabla 1 Propiedades mecánicas de las matrices poliméricas más comunes

<b>MATERIAL-PROPIEDAD</b>	<b>POLIÉSTER INSATURADO</b>	<b>EPÓXICA</b>	<b>VINYLÉSTER</b>
Resistencia a la tracción (MPa)	40 - 90	55 -130	86
Resistencia a la flexión (GPa)	2,0 - 4,4	2,8 - 4,2	3.4
Resistencia al impacto (J/m <sup>2</sup> )	10,6 - 21,2	5,3 - 53	35
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,1 - 1,46	1,2 - 1,3	1,14
Fuente: (TORRES VELÁSQUEZ, 2009)			

## 2.6 TÉCNICAS DE MOLDEO.

Debido a su versatilidad, los materiales compuestos pueden ser procesados empleando por medio de técnicas que van desde herramientas manuales a equipos altamente automatizados, no obstante para el alcance del presente trabajo, debido a criterios técnicos y económicos fueron considerados los siguientes:

### 2.6.1 Moldeo por contacto manual.

Solo requiere un molde que puede ser de diversos materiales como yeso, arena, madera, arcilla, entre otros y consiste en realizar un laminado entre la matriz polimérica y lo refuerzos de fibra de manera manual. (Smooth-On, Inc., 2008)

Ventajas:

- Baja inversión
- Simplicidad de proceso
- No hay limitaciones de tamaño
- Se puede cambiar fácilmente de diseño
- Herramientas elementales (rodillos y brochas)

Desventajas:

- Exceso de mano de obra
- Solo una cara con acabado

- La calidad depende de la habilidad del operario
- Bajos niveles de producción
- Emisión de vapores de estireno
- Muy Bajo control en los desperdicios

### 2.6.2 Método de inyección *Resin Transfer Mouldin* (RTM).

Consiste en un molde en el cual se ubica previamente la fibra y que por medio de entradas se inyecta la resina mediante una bomba y así la resina es absorbida por las fibras. Luego de curar, el molde es abierto y se procede a retirar la pieza. (TOLLER & RIZZO). La utilización de un buen molde asegura la uniformidad en el diseño además que le da uniformidad a la pieza y permite una distribución homogénea de la resina.

#### Ventajas:

- Piezas acabadas por los dos lados
- Equipo portátil de inversión media
- Moldeo de formas complicadas
- Ahorro en mano de obra con respecto al moldeo manual
- Mayor a productividad respecto al moldeo manual
- Bajo desperdicio
- Mínima emisión de vapores de estireno

#### Desventajas:

- Se requiere nivel de conocimiento elevado para la fabricación de moldes
- Proceso tecnificado, que requiere entrenamiento formal
- La inversión se justifica solo para volumen medio-alto de producción
- El cambio de diseño solo es conveniente hasta amortizar el molde

### 2.6.3 Método de RTM light.

Es una variación del método RTM. Este consiste en el moldeo por inyección de resina que a diferencia del anterior es asistida por vacío. De esta manera la presión que se necesita para que la resina impregne las fibras no sea tan elevada. Este vacío se aplica directamente a la salida del que la resina fluya fácilmente a través de las preformas de fibra de vidrio que previamente, al igual que en el RTM ha sido ubicada dentro del molde. Gracias a que no son necesarias altas presiones en la inyección de resina, las paredes de este pueden ser más delgadas y no requiere presiones de cierres ni pestañas que aseguren lo moldes, haciendo la maquinaria y el herramental más sencillo que en el proceso anterior. Esto hace del método RTM light un proceso mucho más económico. (TOLLER & RIZZO):

Ventajas:

- Piezas acabadas por un lado
- Equipo portátil de inversión baja
- Moldeo de formas complicadas
- Ahorro en mano de obra con respecto al moldeo manual
- Bajo desperdicio
- Mínima emisión de vapores de estireno
- Buenas propiedades mecánicas de la pieza

Desventajas:

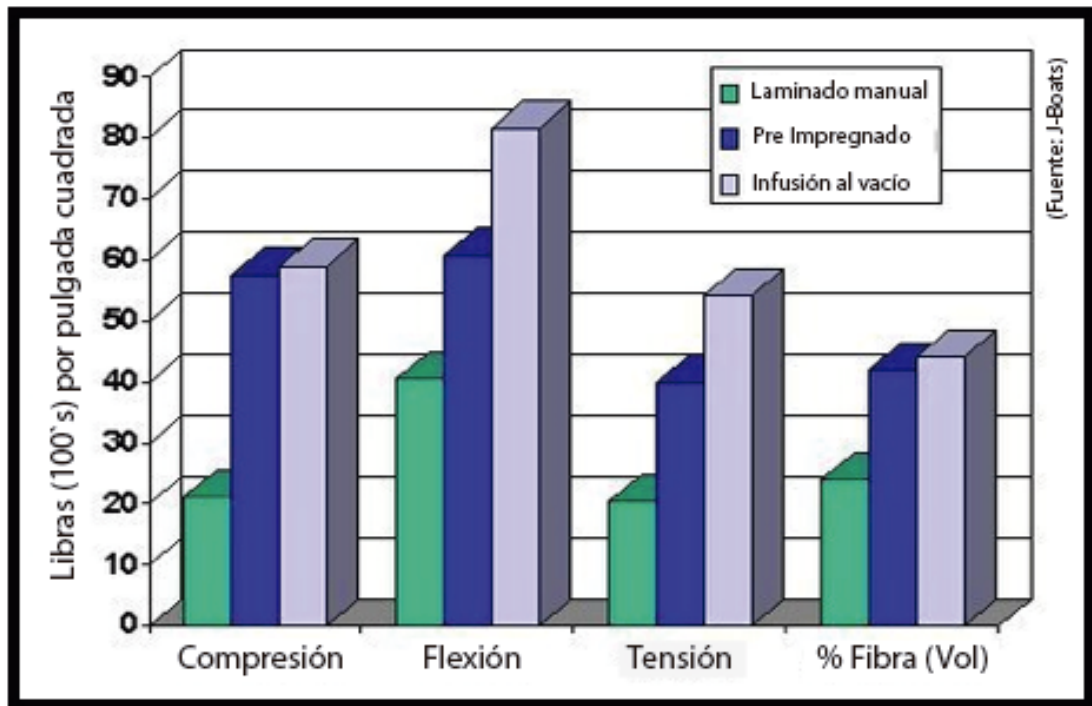
- Se requiere nivel de conocimiento medio para la fabricación de moldes
- Proceso tecnificado
- Bajo número de piezas producidas por unidad de tiempo

#### 2.6.4 Método del Vacuum Bagging.

Es un proceso el cual aprovecha la presión atmosférica y el vacío para mantener en posición los diferentes componentes del laminado mientras que estos curan. Para este método al igual que en los dos anteriores, es necesario poner una preforma de fibra de vidrio dentro, que más adelante va a ser cubierta con una película plástica flexible y resistente para lo que se puede utilizar una bolsa de PET o PVC, haciendo que esta selle el perímetro de la pieza. La película está provista de un punto para la inyección de la resina que generalmente es uno de los extremos. En otro extremo, se hace vacío provocando la salida del aire y la entrada de la resina hasta cubrir toda la superficie del molde. Una vez se llena el molde y la resina quede libre de burbujas de aire se puede suspender el vacío y se permite que la pieza cure. Posterior a esto se procede a desmoldar. De ser necesario se puede ayudar a distribuir de manera manual la resina a través de la fibra para asegurar una mejor distribución de la resina. (WEST SYSTEM, 2010) y (TORRES, 2011)

Las mayores ventajas de este método son las propiedades mecánicas que deja como resultado de una alta compactación de la fibra de vidrio, aumentando su porcentaje en el compuesto. Igualmente la homogeneidad que se logra al emplear vacío. A continuación se presenta un comparativo de procesos.

Figura 14: Comparación de características mecánicas



Fuente: (J-Boats, 2004)

#### Ventajas

- Piezas acabadas por un lado
- Equipo portátil de inversión baja
- Moldeo de formas complicadas
- Mejores acabados respecto al método de contacto
- Mayor calidad de la pieza respecto al método de contacto
- Bajo desperdicio
- Posibilidad de fabricar la pieza en el mismo sitio donde quedara instalada
- Mínima emisión de vapores de estireno
- Se puede cambiar de diseño fácilmente
- Buenas propiedades mecánicas de la pieza

#### Desventajas

- Bajo número de piezas producidas por unidad de tiempo
- Buen acabado solo en una de las superficies de la pieza
- Mano de obra moderada.

(Instituto Politécnico Nacional, 2007)

## 2.7 CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DE UN METODO DE FABRICACION

- **El modelo:** Es una réplica del elemento que se desea copiar lo más preciso posible en términos geométricos. Un buen modelo, podría dar una demostración práctica de diferentes pruebas de material, también permitir apreciar el funcionamiento de la pieza y cómo sería su tamaño real. Generalmente los modelos se fabrican en materiales ligeros, económicos y fáciles de moldear como madera, yeso entre otros.
- **El molde:** Es el objeto que le da la forma definitiva al material que en este se verte, se inyecta o se vacía. Es el instrumento que se utiliza para darle la geometría final a la pieza.
- **El diseño:** Es algo crítico para la calidad y economía de la pieza, al igual que la apariencia, dureza, rigidez, tamaño, forma y costo.
- **El prototipo:** Es una pieza que se construye con el fin de someterla a diferente tipo de pruebas y así conocer el funcionamiento de la misma, no es considerado la pieza definitiva; sin embargo este otorga parámetros de diseño, composición y fabricación que son importantes.

Hay una serie de aspectos importantes que deben ser considerados previamente a la selección de un método de fabricación como:

- Nivel de acabado superficial.
  - Necesidad de rigidización del elemento.
  - Tolerancias respecto del elemento con respecto al molde.
  - Necesidad de postcurados.
  - Mecanizados posteriores.
- **Los materiales:** Para la fabricación de estos moldes se utilizan materiales diversos como son la madera y derivados, los materiales compuestos como la fibra de vidrio, carbono y kevlar, acero, aluminio, entre otros. Algunos de los aspectos que definen la selección del material del molde son el número de unidades que se esperan producir, la geometría del elemento, y el costo de fabricación del mismo, incluyendo los materiales que se necesitan para su manufactura. En el caso de querer fabricar grandes cantidades de piezas, lo más indicado sería utilizar acero o de aluminio. El mayor problema de este tipo de moldes es su elevado costo; igualmente su elevado peso dificulta la manipulación. Por el contrario, si lo que se quiere es fabricar series bajas de producción o incluso construir sólo una unidad, la madera es la mejor opción. Este es un material notablemente más económico y no necesita mano de obra especializada para su manipulación pero su mayor desventaja es que son

susceptibles a ser atacados por agentes atmosféricos leves como es la lluvia.

- **El Diseño y la Construcción del molde:** Es parte fundamental en el proceso de selección, influye de manera directa en la viabilidad técnica y económica del proyecto. El diseño del molde es complejo ya que es muy importante tener en cuenta varios elementos técnicos para su desarrollo, además, es necesario un modelo CAD del mismo basado en la geometría del elemento. El diseño debe ser consistente y adecuado para resistir la presión de cierre del molde y la presión de entrada de la resina.

El molde debe asegurar un buen flujo del material que va a ser inyectado, debe tener canales de ventilación adecuados para que pueda fluir el aire antes que entre la resina al molde, debe poseer un cuidadoso diseño de la transferencia de calor para así controlar el enfriamiento y la solidificación lo que asegurara una expulsión fácil y uniforme de la pieza. El material con que se fabrique el molde debe ser lo más indicado, que aseguren un buen acabado a la pieza, además que le den al molde la capacidad de producir un número considerable de piezas.

En el diseño de cualquier pieza que vaya a ser fabricada por inyección de resina se deben tener consideraciones sobre el efecto que pueden tener los puntos de En general, los ciclos de molde pueden tomar un par de segundos o varios minutos y trabajar una, o docenas de piezas en cada expulsión del molde. Los tiempos de ciclo pueden estar limitados por la capacidad de transferencia de calor del molde y por otras condiciones de proceso como el tiempo del ciclo de secado o la capacidad de plastificación.

Cuando se desean construir piezas de forma seriada con materiales compuestos, es indispensable, en la mayoría de los casos, la presencia de un molde que asegure la repetición y fidelidad de las piezas que se extrae de él. Sin embargo, para obtener dicho molde, lo más probable es que haya existido antes un modelo a escala natural, que haya servido de patrón de referencia y de base para construir nuestro molde. (PONS, 2007)

## 2.8 EL PROCESO DE DISEÑO POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS

Los métodos de elementos finitos son actualmente procedimientos de gran utilidad para los cálculos estructurales y de la mecánica de sólidos, más aun, si se tiene en cuenta que estos métodos permiten resolver problemas que hasta hace algún tiempo eran bastante complejos, utilizando los métodos matemáticos tradicionales. Una de las mayores ventajas de estos métodos es que reducen en gran medida el tiempo y la inversión económica que antes era necesaria para la fabricación de los modelos y prototipos.

A pesar de todo esto, los elementos finitos no dejan de ser métodos aproximados, que entregan una idea de cuál es el comportamiento del sólido y que da unas buenas directrices para llegar a un diseño óptimo de la pieza; por todo esto no deja de ser necesaria la fabricación de prototipos, sólo que al tener algunos resultados del análisis, se puede fabricar una menor cantidad de estas.

Los métodos utilizados en el desarrollo de piezas propone dos interpretaciones de su interfaz que son: visualización y simulación.

- **La visualización:** Ofrece una mejor interpretación de la geometría y la interacción de los diferentes componentes; este espacio virtual, permite analizar el sólido y tomar decisiones para efectuar cambios y rediseñar la pieza si es necesario. (ADAMS & ABRAHAM, 1999)
- **La simulación:** Es la respuesta de una pieza o estructura construida bajo el método de elementos finitos frente a un estado simulado de las condiciones de operación específicas para cada pieza, pueden ser condiciones de cargas, temperatura, presión, entre otros. Permite conocer e identificar fallas potenciales del elemento y así corregirlas durante las primeras etapas de diseño. (ADAMS & ABRAHAM, 1999)

El análisis por elementos finitos se realiza bajo un esquema funcional que se caracteriza en 3 fases:

- **Preproceso:** Definir el dominio geométrico de la estructura utilizando una herramienta CAD que permite obtener un modelo en 2 3 dimensiones. Esta geometría se divide en una cantidad específica de nodos y elementos según la precisión y exactitud que se requiere en los resultados, se ingresan los valores necesarios que definen las propiedades mecánicas del material de la pieza y se indican las condiciones de frontera del problema.
- **Solución:** Se resuelve el sistema de ecuaciones de manera iterativa y se obtienen los resultados que dependen estrictamente del preproceso.
- **Postprocesamiento:** Se obtiene información relevante según el interés del analista, estos resultados pueden ser visualizados como una distribución a través de la estructura (BEDOYA, 2005)

### 3 DEFINICION DE LA GEOMETRIA DEL ELEMENTO

El diseño de la prótesis prototipo parte de la geometría de los modelos existentes en el mercado. La compañía ÖSSUR brinda unas medidas básicas de los modelos, las cuales son un punto de partida en el diseño inicial de la prótesis prototipo propuesta en este desarrollo (Véase el Apéndice B).

El desarrollo inicia con un estudio de marcha acelerada de una persona joven en condiciones físicas ideales y la identificación de los puntos importantes del diseño geométrico de las prótesis referenciadas en el estado del arte.

#### 3.1 EL CICLO DE MARCHA HUMANA.

El análisis biomecánico de la marcha humana se realiza por medio de pruebas en una banda caminadora, en ésta se ubica una persona con buenas condiciones física, con una estatura entre 1,40 y 1,90 metros y un peso corporal entre 40 y 80 kilogramos.

Se ubican algunos elementos que sirven como referencia de los puntos de rotación de los miembros inferiores de quien realiza la marcha. Con esto se logra señalar y hacer seguimientos de las trayectorias creadas por los puntos de rotación y los ángulos generados entre los mismos. Con esta información se identifican factores importantes en el diseño geométrico para la prótesis prototipos.

El estudio de la biomecánica de la marcha humana es un campo amplio el cual requiere ensayos, simulaciones y pruebas bastante precisas. En el caso de este desarrollo, los ensayos realizados son un acercamiento inicial al campo de la biomecánica de la marcha humana.

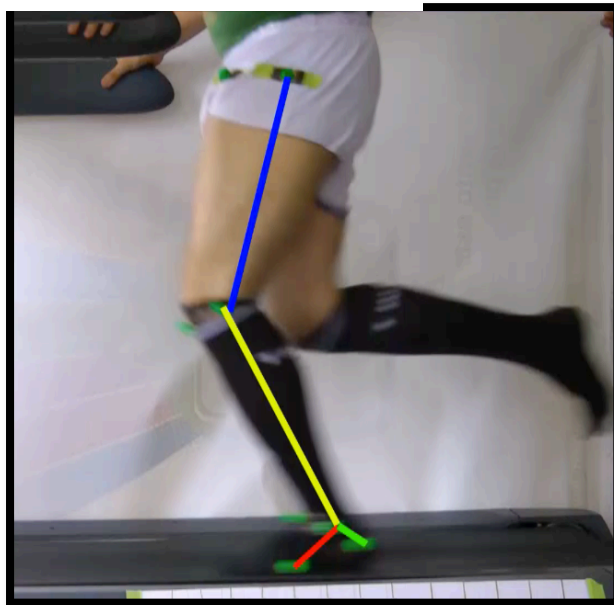
En este desarrollo, los ángulos de rotación de las articulaciones principales de los miembros inferiores durante una marcha acelerada, son comparados con resultados teóricos durante una marcha regular.

Para efectos de análisis se debe tener en cuenta que el movimiento de las extremidades inferiores durante la marcha es considerado repetitivo e igual, siempre y cuando se tenga en cuenta que la marcha se realiza un terreno uniforme.

### 3.2 PATRÓN DE MARCHA HUMANA EN LA FASE DE APOYO

El estudio de marcha se realiza en el plano sagital del cuerpo de la persona, de esta manera se logra observar el comportamiento de los puntos principales de rotación en los miembros inferiores. Los puntos de referencia son: cadera, rodilla y tobillo. Adicional a estos se señalan el talón y la parte anterior de los dedos del pie.

Figura 15 Plano sagital de la marcha humana



Fuente Propia de los autores.

A continuación se presentan las características de la prueba de marcha acelerada realizada.

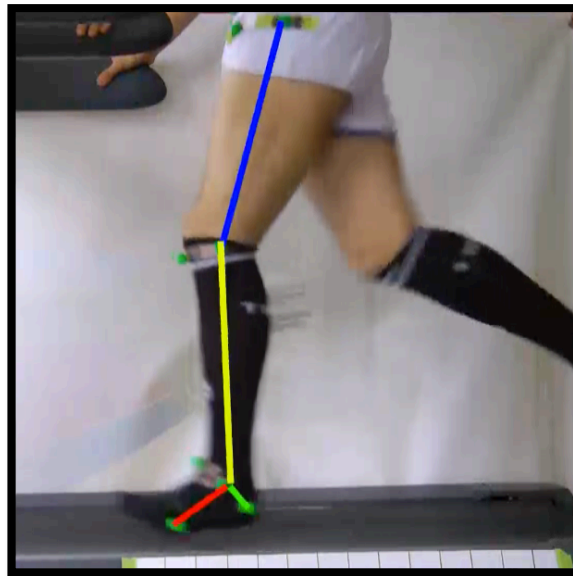
- Lugar: Gimnasio VIVO CAF universidad EAFIT.
- Fecha: Febrero 8 de 2012
- Máquina utilizada:
- Velocidad de la prueba: 5,36 m/s
- Distancia promedio de un paso 0,95 m
- Edad del individuo: 27 años
- Peso del individuo: 76 kilogramos
- Estatura del individuo: 1.79 metros

Los resultados obtenidos se ven afectados por la manera como la persona realiza la marcha, pues al tener sus manos apoyadas en la máquina por razones de seguridad, el patrón de marcha varía de su naturaleza.

### 3.2.1 *Heel strike.*

Durante una marcha acelerada la articulación del tobillo se encuentra a  $0^\circ$  con respecto a la dorsiflexión y la flexión plantar justo antes que ocurra el primer impacto con el suelo. Un aumento en la velocidad de la marcha provoca que el tren superior del cuerpo se incline hacia delante, el primer contacto entre el pie y el suelo ocurre en la parte frontal de la planta del pie, por lo cual durante una marcha acelerada no ocurre el momento *Heel Strike*.

Figura 16: Primer contacto con el suelo durante la marcha acelerada

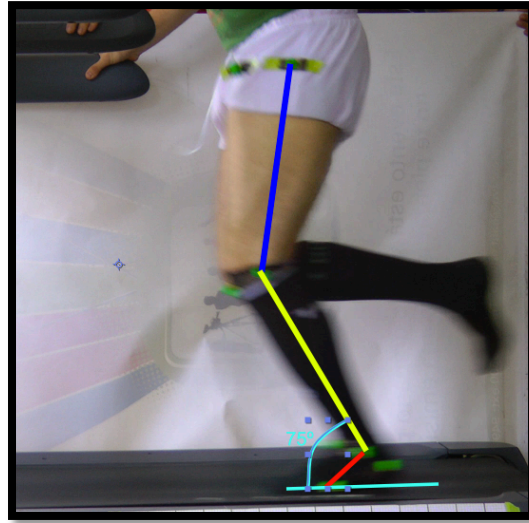


Fuente Propia de los autores

### 3.2.2 *FOOT FLAT.*

Durante la marcha el tobillo gira  $70^\circ$  entre la línea que representa la tibia (línea amarilla) y la planta del pie (línea azul claro). Además de esto, se observa que el talón no hace contacto completo con el suelo, debido a la naturaleza de la marcha acelerada.

Figura 17: *Foot Flat* (Marcha acelerada)

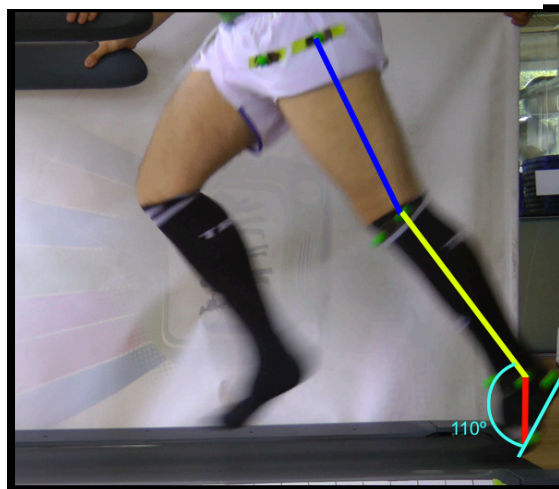


Fuente Propia de los autores

### 3.2.3 *HEEL OFF.*

El talón se despegaba del suelo y la articulación del tobillo gira sobre la flexión plantar permitiendo al sujeto impulsarse hacia adelante. Se logra apreciar que entre el *Foot Flat* y el *Heel Off* existe también una rotación de la articulación de la rodilla, pero se realiza en dorsiflexión plantar debido a la separación del talón al suelo (HERNANDES STENGELE , 2008).

Figura 18: *Heel Off* (Marcha acelerada)



Fuente: Propia de los autores

Existe una diferencia en la distancia promedio de los pasos entre la marcha regular y la marcha acelerada. En la marcha acelerada, debido a la inclinación

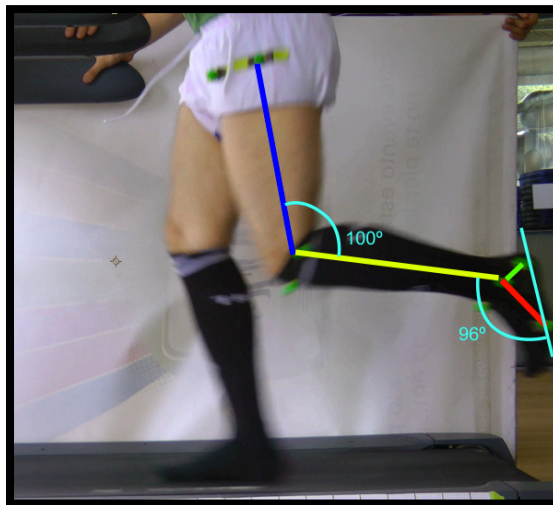
que adopta el cuerpo hacia delante para obtener mayor velocidad, se presentan pasos más largos y la articulación del tobillo puede girar más sobre la dorsiflexión a medida que ocurre el *Heel Off*.

### 3.3 PATRÓN DE MARCHA HUMANA EN LA FASE DE BALANCEO

A continuación se presenta el estudio de la marcha en la fase de balanceo en el plano sagital, teniendo en cuenta que la marcha realizada sobre la banda corresponde a una marcha acelerada con el fin de determinar las principales características de la carrera.

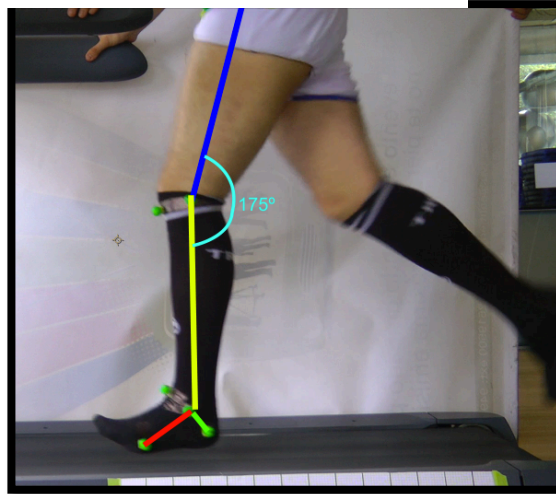
Durante la aceleración en la fase de balanceo, el movimiento se realiza principalmente en la articulación de la cadera. En cuanto a la rodilla se puede observar que esta se flexiona aproximadamente  $90^\circ$  los cuales se mantienen durante la etapa la aceleración y el balanceo medio.

Figura 19: Aceleración (Marcha acelerada)



Fuente: Propia de los autores

Figura 20: Desaceleración (Marcha acelerada)



Fuente Propia de los autores

Durante el balanceo, la articulación de la rodilla se mantiene constante hasta la fase de la desaceleración y así se realiza un paso completo.

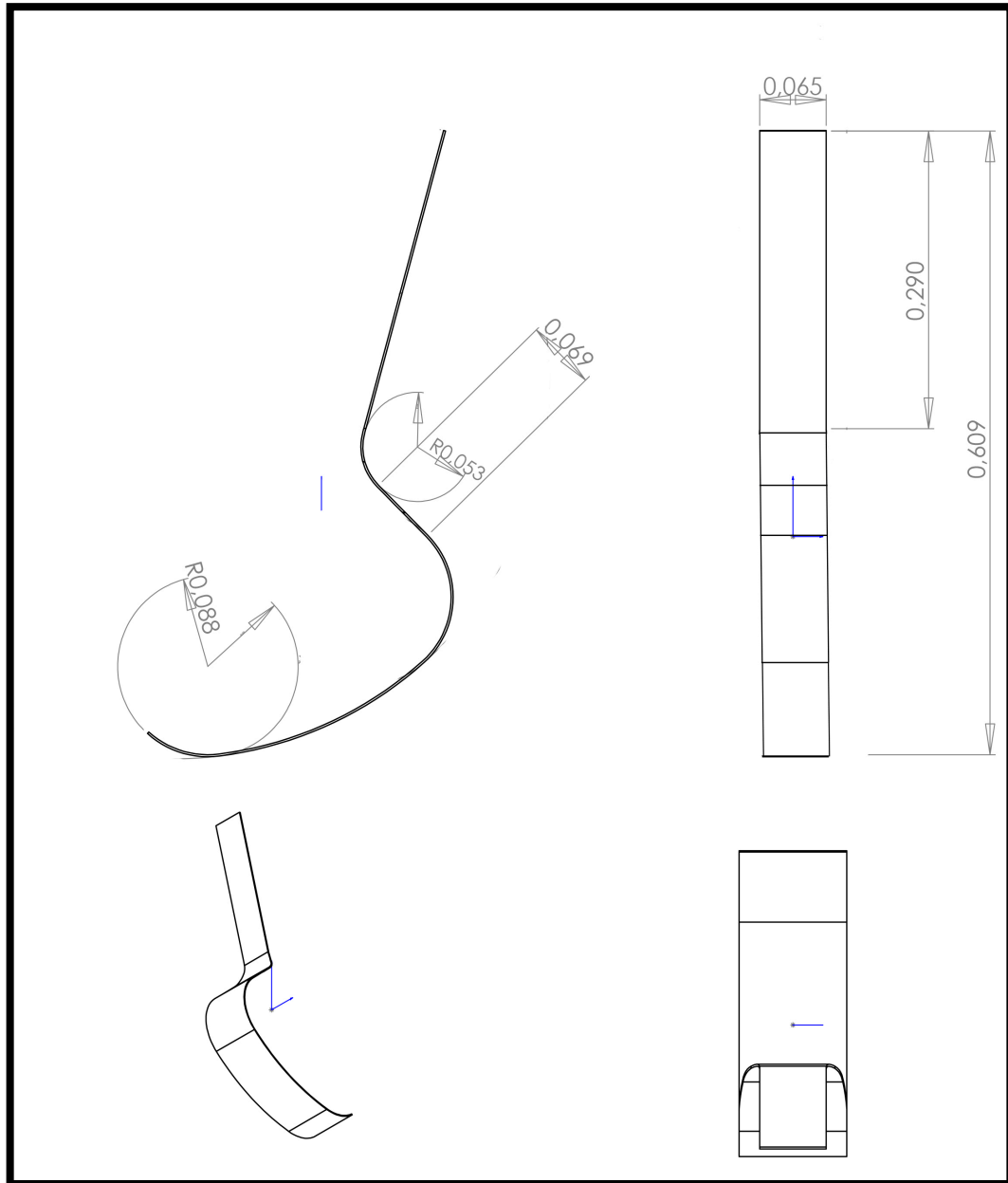
### 3.4 DISEÑO DE LAS PROTESIS

A partir del análisis realizado en la prueba de marcha, es posible determinar un diseño general de las prótesis prototipo, el cual puede ser ajustado a cualquier persona en un rango de estatura entre 1,40 mt y 1,80 mt.

Los valores de deformación del elemento protésico no son determinados en este desarrollo debido a que dependen necesariamente de las características físicas de cada usuario: para esto es necesario conocer la condición de discapacidad de cada persona, su condición de apoyo plantar y la desviación que presente el muñón, aún así, la geometría general del elemento no varía. Para condiciones de deformación y resistencia mecánica sólo se debe ajustar el espesor, el cual está directamente relacionado con el número de capas de refuerzo de fibra de vidrio.

Resaltando los aspectos positivos de la geometría de los modelos *Cheetah*, *Flex-Run*, *C-Sprint*, *Sprinter*, y con base en el análisis de marcha, se propone una geometría prototipo la cual se muestra en la figura 22

Figura 21 Plano Prótesis prototipo



Fuente Elaboración propia de los autores.

La finalidad de las prótesis convencionales es recrear este patrón de movimiento lo más real posible y de esta manera brindar a la persona una marcha cómoda y efectiva. Con las prótesis atléticas el momento en el cual ocurre el *Heel Strike* es eliminado del patrón de marcha, esto debido a que no se cuenta con ningún elemento que replazce las funciones del talón. Durante una carrera con prótesis dinámicas el patrón de marcha sería de la siguiente manera:

La energía es absorbida por la geometría del elemento durante el primer impacto que ocurre entre la prótesis y el suelo.

Cuando la persona inclina su cuerpo hacia adelante lo hace sosteniéndose en el punto de apoyo, el cual permite un balanceo suave hacia el frente y la energía del impacto sigue estando acumulada hasta este momento.

La parte frontal del elemento es el último punto de la prótesis en despegarse del suelo. Una vez la persona libera la carga para dar el siguiente paso, la energía es liberada brindándole un impulso hacia adelante. (LOPEZ SANCHEZ, 2009)

#### 4 SELECCIÓN DE MATERIAL DEL ELEMENTO PROTESICO

Para el caso de elementos dinámicos no se encontraron aplicaciones de fibra de vidrio en el estado del arte, aún así, el aspecto económico y la disponibilidad de la fibra de vidrio, hacen de este material, un compuesto adecuado con el cual se puede alcanzar características mecánicas aceptables a un costo menor.

Actualmente existen una cantidad considerable de compuestos prácticos y económicos que se deben tener en cuenta en la construcción de elementos dinámicos, los compuestos más utilizados en estas aplicaciones, tienen un costo elevado a los cuales muchos pacientes no pueden acceder (TORRES, 2011).

Dentro de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, usados en la fabricación de prótesis dinámicas, se encuentran principalmente: alta resistencia mecánica, bajo peso, durabilidad con resistencia a la corrosión, desgaste y fatiga. Adicionalmente, deben tener propiedades de ductilidad y ser fácilmente mecanizables para poder adoptar la geometría adecuada (TORRES,2009)

Los materiales propuestos para la elaboración de prototipos parten del análisis de la información técnica de las materias primas de fácil adquisición local y que presentan costos razonables. Los parámetros que se analizaron son:

- Módulo de elasticidad: Se busca obtener un módulo de elasticidad alto ya que este representa una medida de rigidez del material e indica que tan resistente es el compuesto a la deformación elástica
- Elongación a la ruptura: Se espera que el compuesto presente una tenacidad apropiada y que sus valores de ruptura sean lo suficientemente altos para garantizar que la pieza se comporte adecuadamente en el caso en el que será utilizada.
- Rango de viscosidad: Este parámetro se define en este desarrollo como la facilidad de procesamiento del compuesto. En este caso, valores altos de viscosidad indican que la manufactura de la pieza se puede ver afectada al momento de impregnar los refuerzos de fibra de vidrio. Es por esto que se espera, que la matriz polimérica presente valores adecuados de viscosidad y así facilitar la fabricación de la pieza.
- Valor comercial: El costo comercial de la materia prima debe permanecer lo más bajo posible según el propósito del proyecto.
- Materiales fáciles de adquirir.
- Que permitan adquirir la forma adecuada según el molde y método de fabricación
- De fácil mecanización

- Acabados estéticos

Una vez preseleccionados estos compuestos, se implementa la norma ASTM D 3039 para poder caracterizarlos y así seleccionar a partir de estudios en elementos finitos, la configuración que mejor se comporte frente a las condiciones de carga establecidas.

#### 4.1 FABRICACIÓN DE PROBETAS

Se seleccionó la fibra de vidrio para el desarrollo del elemento protésico a pesar de presentar niveles más bajo de resistencia mecánica (Tabla 2). Debido a que el costo de la materia prima debe mantenerse lo más bajo posible y debe ser de fácil adquisición en el mercado local.

En cuanto a la matriz se seleccionaron 3 tipos de resina que ofrecen módulos y elongaciones de ruptura adecuados y alta resistencia al impacto. Además, son materiales comercialmente disponibles (Véase el Apéndice D).

- Resina Poliéster insaturado 805 de la empresa ANDERCOL
- Resina Poliéster insaturado 872 de la empresa ANDERCOL
- Resina Vinyléster A430 de la empresa BASF.

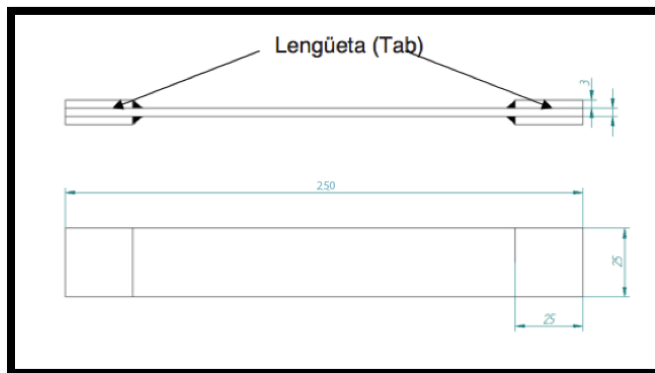
La fabricación de los laminados de los respectivos compuestos se realizó manualmente y los cortes de las probetas se llevaron a cabo mediante el método de corte con agua para evitar el efecto de borde libre. Este consistente en la concentración de tensiones entre capas, lo cual provoca separación entre capas del material debido a procesos de corte con herramientas que generen altas temperaturas las cuales el material compuesto es incapaz de disipar, bordes ásperos o desiguales.

Cada una de las probetas se construye bajo la norma ASTM D3039 para probetas (*balanced and symmetric random-discontinuous*), la cual propone unas dimensiones de 25 mm de ancho por 250 mm de longitud.

Los “*Tab*”, también conocidos como “placas de refuerzo”, fueron cortadas del mismo material de cada uno de los grupos seleccionados para los ensayos, con las dimensiones que sugiere la norma ASTM D 3039, 50mm de longitud por 25mm de ancho. (Véase el Apéndice F) (ASTM INTERNATIONAL, 2004)

La siguiente gráfica indica las dimensiones de las probetas fabricadas:

Figura 22 Dimensiones probeta



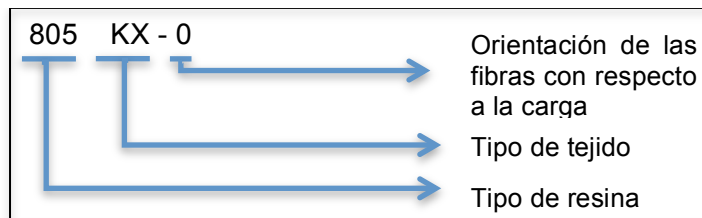
Fuente (TORRES VELÁSQUEZ, 2009)

#### 4.2 SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS

La nomenclatura que se utilizará en el trabajo obedece a la siguiente descripción (MIRAVETE, 2000)

- Knytex (KX): tejido unidireccional de fibra de vidrio que une los diferentes hilos por medio de un apresto termoplástico. Es usado para procesamiento por contacto manual o moldeo cerrado.
- Woven Roving (WR): es un tejido plano tipo tafetán de hilos de vidrio en dos direcciones.
- MAT: tela de fibra de vidrio no tejida en el cual los hilos cortados se mantienen unidos por medio de un apresto.

Figura 23: Nomenclatura materiales propuestos



Fuente propia de los autores

A continuación se presentan 3 grupos de laminados diferentes, según el tipo de refuerzo seleccionado.

Tabla 2: Grupo 1 Refuerzo y resina Poliéster Insaturado 30805

CANTIDAD DE PROBETAS	TIPO DE REFUERZO	DESCRIPCIÓN	CARACTERISTICAS	NOMENCLATURA
4	knytex	Unidireccional a 0° respecto a la carga	940 gr/m2	805KX-0
4	knytex	Unidireccional a 90° respecto a la carga	940 gr/m2	805KX-90
4	knytex	Unidireccional a 45° respecto a la carga	940 gr/m2	805KX-45
3	WR	Bidireccional	850 gr/m2	805WR
3	MAT	Multidireccional	450 gr/m2	805MA
Fuente Propia de los autores				

Tabla 3: Grupo 2 Refuerzo resina Poliéster 30805 al 70% y 30872 al 30%

CANTIDAD DE PROBETAS	TIPO DE REFUERZO	DESCRIPCIÓN	CARACTERISTICAS	NOMENCLATURA
4	knytex	Unidireccional a 0° respecto a la carga	940 gr/m2	805-872KX-0
4	knytex	Unidireccional a 90° respecto a la carga	940 gr/m2	805-872KX-90
4	knytex	Unidireccional a 45° respecto a la carga	940 gr/m2	805-872KX-45
3	WR	Bidireccional	850 gr/m2	805-872WR
3	MAT	Multidireccional	450 gr/m2	805-872MA
Fuente Propia de los autores				

Tabla 4 Grupo 3: Refuerzo resina Vinyléster A430

CANTIDAD DE PROBETAS	TIPO DE REFUERZO	DESCRIPCIÓN	CARACTERISTICAS	NOMENCLATURA
4	knytex	Unidireccional a 0° respecto a la carga	940 gr/m2	430KX-0
4	knytex	Unidireccional a 90° respecto a la carga	940 gr/m2	430KX-90
4	knytex	Unidireccional a 45° respecto a la carga	940 gr/m2	430KX-45
3	WR	Bidireccional	850 gr/m2	430WR
3	MAT	Multidireccional	450 gr/m2	430MA
Fuente Propia de los autores				

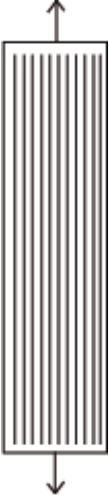


#### 4.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La naturaleza anisotrópica y las características estructurales de los materiales compuestos, dificultan la caracterización de dichos materiales. Por esta razón, las propiedades de los materiales compuestos son determinadas por medio de ensayos mecánicos, logrando identificar la resistencia y las propiedades elásticas de un material.

Para la caracterización de los materiales compuestos es necesario basar los ensayos en normas, así se puede conocer con precisión el comportamiento de los materiales compuestos frente a cargas aplicadas. Los principales estándares están desarrollados por la ASTM. Para el caso específico de este proyecto, el desarrollo se basa en las pruebas en las norma aplicables ASTM D3039 *Standard Test Method For Tensile Properties Of Polymer Matrix Composite Materials* y ASTM D3518

*Standard Test Method For Plane Shear Response Of Polymer Matrix Composite Materials By Tensile Test Of A 45° Laminate*, el propósito de cada se ve reflejado en el esquema que se presenta a continuación:

Tabla 5: Probetas correspondientes a la norma.

NORMA	ASTM D3039	ASTM D3039	ASTM D3518
ESQUEMA			
PROPIEDADES	$E_1$ : Módulo de elasticidad longitudinal  $\nu_{12}$ : Poisson plano 1-2  $X_1$ : Resistencia máxima en dirección longitudinal	$E_2$ : Módulo de elasticidad longitudinal  $\nu_{21}$ : Poisson plano 1-2  $X_2$ : Resistencia máxima en dirección longitudinal	$G_{12}$ : Módulo de rigidez  $\sigma_s$ : Tensión de cortadura

Fuente Propia de los autores

Los ensayos mecánicos se resuelven mediante curvas de tensión vs deformación de las cuales se logra determinar tres conceptos relevantes como lo son: la tensión de ruptura, la deformación y el módulo de elasticidad.

El módulo elástico es la representación de la pendiente de la curva (esfuerzo vs deformación) y hace referencia a la rigidez del material. La tensión de ruptura hace referencia a la resistencia del material, indicando la tensión para la cual el material se rompe, similar al concepto de

deformación, el cual indica la deformación a la cual se rompe el elemento. (KIM & MIRAVETE, 1992)

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS UNIDIRECCIONALES CON ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS A 0° Y 90° RESPECTO A LA CARGA APLICADA.

Con el ensayo de tensión se puede conocer la resistencia máxima de los compuestos. Una vez realizadas la prueba de tensión mecánica en la máquina universal, se obtienen los resultados de carga aplicada a la probeta y la elongación de la probeta.

Conociendo el área transversal de las probetas, se conoce el esfuerzo mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{\text{carga máxima}}{\text{Area Transversal}}$$

La deformación se halla de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

El módulo de Young (E) y el módulo de rigidez (G) pueden ser determinados utilizando las siguientes fórmulas:

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

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

#### 4.5 CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS UNIDIRECCIONALES CON ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS A 45° RESPECTO A LA CARGA APLICADA.

Para esta orientación de refuerzo se realiza el ensayo de tracción con el fin de conocer la resistencia máxima del compuesto. Una vez realizadas la prueba de tensión mecánica en la máquina universal, se obtienen los resultados de carga aplicada a la probeta y la elongación de la probeta.

Conociendo el área transversal de las probetas, se obtiene el esfuerzo mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{\text{carga máxima}}{(\text{Area Transversal} * 2)}$$

La deformación se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \varepsilon_x - \varepsilon_y$$

Dónde:

$\varepsilon_x =$  *deformación normal longitudinal*

$\varepsilon_y =$  *deformación normal transversal*

El módulo de Young (E) es determinado utilizando las siguientes fórmulas:

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

Estos resultados experimentales, obtenidos por medio de pruebas de tensión hasta la falla, son útiles para determinar el esfuerzo máximo y la deformación máxima del material.

#### 4.6 DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS DEL MATERIAL

Parte de las pruebas de tensión que se llevan a cabo se realizan en la máquina universal INSTRON 3360 del Laboratorio de Materiales de la Universidad EAFIT a una velocidad de 0.2 mm/min y se obtienen datos a una razón de 5 puntos/segundo hasta la falla. Las otras pruebas se realizan en la máquina universal *Schenk Trebel* a una velocidad de 0,2 mm/min. (Véase Apéndice A)

Tabla 6 GRUPO 1: Refuerzo y resina Cristalán (poliéster insaturado 30805)

NOMENCLATURA DE PROBETAS	ESFUERZO (GPa)	DEFORMACIÓN (mm/mm)
805KX-0	0,215	0,064
805KX-90	0,288	0,077
805KX-45	0,025	N/A
805WR	0,336	0,072
805MAT	0,098	0,025
Fuente Propia de los autores		

Tabla 7 GRUPO 2: Refuerzo y resina Cristalán (poliéster insaturado 30805 Al 70% Y 30872 Al 30%)

NOMENCLATURA DE PROBETA	ESFUERZO (GPa)	DEFORMACIÓN (mm/mm)
805-872KX-0	0,298	0,093
805-872KX-90	0,249	0,098
805-872KX-45	0,028	N/A
805-872WR	0,254	0,078
805-872MAT	0,103	0,030
Fuente Propia de los autores		

Tabla 8 GRUPO 3: Refuerzo y Resina Palatal (vinyléster A430)

NOMENCLATURA DE PROBETA	ESFUERZO (GPa)	DEFORMACIÓN (mm/mm)
430KX-0	0,227	0,064
430KX-90	0,220	0,066
430KX-45	0,030	N/A
430WR	0,286	0,058
430MAT	0,093	0,034
Fuente Propia de los autores		

Se observa que las propiedades mecánicas de las probetas fabricadas con las resinas 805 y A430 son similares. Al adicionar el 30% de resina flexible 872 se observa un incremento del porcentaje de elongación, resistencia a la tensión y no se percibe una reducción significativa el módulo. Por este motivo se decide realizar pruebas en prototipos reales empleando la resina PALATAL A430 y la CRISTALAN 805+872 y determinar algunas características adicionales como la procesabilidad.

El proceso de caracterización del material se realiza por medio de la prueba de incineración de las probetas, la cual se realizó de acuerdo con la norma ASTM D3171 - 11 *Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*. Este procedimiento consiste en introducir probetas de 25mm X 25mm en un horno convencional de referencia MM125 Fabricado por la industria Terrígeno. La temperatura a la que se realiza el ensayo es de 400 °C durante un tiempo de 4 horas con el fin de eliminar toda la resina impregnada en las fibras y así obtener los porcentajes volumétricos de fibra y resina que corresponden al compuesto

Según la teoría micromecánica, los *composites* se pueden caracterizar empleando las siguientes ecuaciones:

#### 4.6.1 Ecuaciones para caracterización de láminas unidireccionales por método de incineración (Knytex)

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

$$E_2 = \frac{\frac{E_m}{(1 - V_m^2) * (1 + 0,85V_f^2)}}{(1 - V_f)^{1,25} + \frac{\frac{E_m}{E_f} * V_f}{1 - V_m^2}}$$

$$G_{12} = \frac{G_m(1 + 0,6V_f^{0,5})}{(1 - V_f)^{1,25} + \frac{V_f}{(1 - V_m^2)}}$$

$$v_{12} = V_f * v_f + (1 - V_f)v_m$$

4.6.2 Ecuaciones para caracterización de tejidos equilibrados por método de incineración (Woven Roving)

$$E_1 = E_2 = V_f(E_f^{1/2} + E_m^{3/2}) + E_m$$

$$G_{12} = \frac{E_m}{(4V_{f+1})/3}$$

$$v_{12} = G_{12}/E_2$$

4.6.3 Ecuaciones para caracterización de láminas tipo MAT por método de incineración (MAT)

$$E_1 = E_2 = V_f(E_f^{16/45} + E_m^2) + E_m^{8/9}$$

$$G_{12} = V_f(E_f^{2/15} + E_m^{3/4}) + E_m^{1/3}$$

$$v_{12} = 1/3$$

La tabla a continuación muestra los valores correspondientes a  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $V_{12}$ ,  $G_{12}$  los porcentajes de material constituyente se determinan mediante incineración.

Tabla 9: Propiedades del material obtenidas de la incineración de las probetas

REFERENCIAS	MASA INICIAL (kg)	MASA FINAL (kg)	$\chi_f$	$\chi_r$	$V_f$	E1 (GPa)	E2 (GPa)	G12 (GPa)	$\nu_{12}$
430-MAT	0,00136	0,00042	0,30	0,69	0,159	9,330	9,330	3,155	0,333
805-MAT	0,00173	0,0005	0,28	0,71	0,147	9,374	9,374	3,120	0,333
805 872-MAT	0,00168	0,00051	0,30	0,69	0,156	9,737	9,737	3,232	0,333
430-0°	0,00205	0,00126	0,61	0,38	0,403	31,159	3,858	1,976	0,296
805-0°	0,00212	0,00126	0,59	0,40	0,383	29,935	4,150	2,735	0,296
805 872-0°	0,00215	0,00124	0,57	0,42	0,366	28,778	4,167	2,717	0,296
430-90°	0,00205	0,00124	0,60	0,69	0,269	21,980	3,967	1,868	0,297
805-90°	0,00204	0,00124	0,60	0,69	0,270	22,236	4,248	2,606	0,297
805 872-90°	0,00214	0,00125	0,58	0,69	0,262	21,706	4,253	2,595	0,297
430-WR	0,00186	0,001	0,53	0,69	0,246	13,793	13,793	5,441	0,395
805-WR	0,00172	0,00109	0,63	0,69	0,278	15,476	15,476	5,483	0,354
805 872-WR	0,00185	0,0011	0,59	0,69	0,265	14,949	14,949	5,617	0,376
Fuente Propia de los autores									

Dónde:

MASA INICIAL = Masa de las probetas antes de incinerar (25mm X 25mm)

MASA FINAL = Masa de la probeta después de incinerar

$$\chi_f = \frac{MASA\ FINAL}{MASA\ TOTAL}$$

$$\chi_r = \frac{MASA\ RESINA}{MASA\ TOTAL}$$

$V_f$  = Fracción volumétrica de fibra

$E_1$  y  $E_2$  = Modulo de elasticidad longitudinal y transversal

G12 = Modulo de rigidez

v12 = Modulo de Poisson

#### 4.7 ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que los compuestos desarrollados con matriz Cristalan de poliéster insaturado en el cual se combina la resina rígida de referencia 30805 al 70% y la resina flexible de referencia 30872 al 30%. Presenta unos resultados muy similares en cuanto a los módulos de elasticidad de los compuestos desarrollados con resina de poliéster PALATAL de referencia A430.

Observando la ficha técnica de ambos materiales, es fácil identificar que la resina poliéster tiene un porcentaje de elongación menor a la resina de vinyléster. A su vez, el poliéster rígido al ser modificado con una resina de poliéster flexible, reduce su HDT (*Heat deflection temperature*) hasta un límite de 60°C, esto pone al material muy cerca de las condiciones de servicio, reduciendo sus propiedades mecánicas. Si se tiene en cuenta que este elemento está sometido a contacto con el suelo el cual alcanza altas temperaturas durante días soleados, el valor de HDT de las resinas vinyléster, se mantiene a 105°C lo que ubica al material en un rango seguro bajo de las condiciones de servicio.

Otros aspectos relevantes a tener en cuenta para el desempeño de la resina en condiciones de procesamiento son:

**La fluidez** como la propiedad que indica la capacidad de vencer el rozamiento entre las láminas líquidas de la resina y que para efectos en la fabricación de prótesis se espera que el material cumpla con unas características que le permitan un fácil procesamiento para la pieza

**El Curado** es básicamente el tiempo que le toma a cada compuesto alcanzar el máximo de sus propiedades mecánicas, los tiempos altos de curado generan grandes tiempos de espera que le resta productividad al proceso de fabricación de la pieza.

El laminado realizado con la combinación de resina de poliéster es mucho más lento debido a que la resina flexible 30872 provoca que el proceso exotérmico del material disminuya considerablemente, razón por la cual es necesario acelerar el proceso de curado. Este proceso de aceleración se realiza aumentando porcentualmente el cobalto en la mezcla, lo cual ayuda a agilizar el proceso de curado pero genera cargas internas en el material reduciendo así

su resistencia mecánica. Por otra parte, el laminado construido con resina vinyléster tiene un proceso exotérmico controlado siempre y cuando la proporción de cobalto no supere las recomendaciones del fabricante. Con esto se logra un curado más rápido con respecto a la resina de poliéster.

La viscosidad es un factor relevante a la hora de proceder con un laminado, pues una matriz muy viscosa, produce mala humectación de las capas de refuerzo de fibra de vidrio haciendo de la pieza un elemento inapropiado en cuanto a la resistencia mecánica. Este es el caso del laminado fabricado con la resina de poliéster. Efecto contrario ocurre en el laminado con resina vinyléster, la cual presenta bajo niveles de viscosidad lo cual ayuda a la completa humectación de las capas y evita la presencia de refuerzos de fibra de vidrio delaminados.

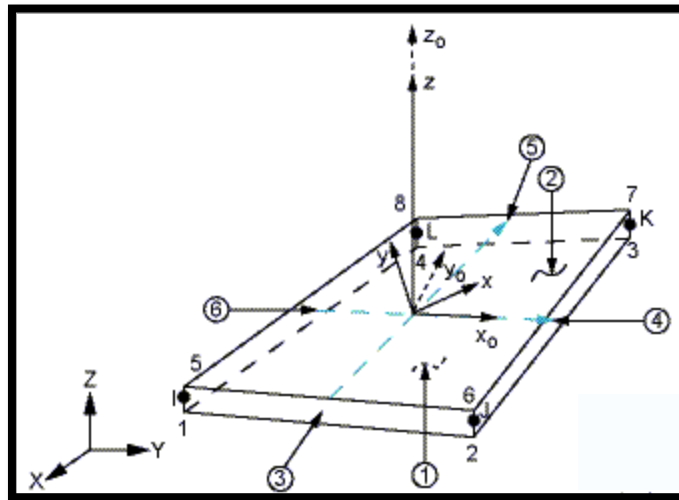
En cuanto al costo, la resina vinyléster representa un valor mayor con respecto a la suma de los precios de las dos resinas de poliéster a utilizar en un laminado. Teniendo en cuenta que el laminado de poliéster se construye con proporciones del 70% para la resina 30805 y 30% para la resina 30872 contra el laminado en vinyléster, el cual se construye con resina A430 totalmente.

## 5 REVISION DE ELEMENTOS FINITOS PARA EL DISEÑO DE LA PROTESIS

Con el propósito de analizar el comportamiento mecánico y estructural se realiza un análisis de elementos finitos, empleando el software comercial ANSYS en su versión educacional. La geometría es importada en el archivo de intercambio “\*.iges”.

Debido a que la prótesis se representa con una superficie, es decir, sus dimensiones principales son significativamente mayores a su espesor, el elemento que mejor describe el comportamiento se selecciona de la librería de ANSYS, siendo el SHELL 181 el elemento más idóneo. En la FIGURA 24 se muestran sus características y sistema de coordenadas.

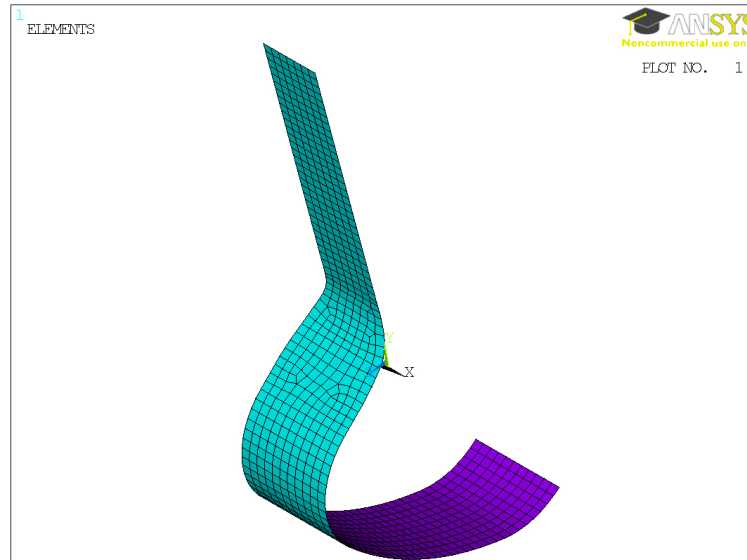
Figura 24 Sistema de coordenadas del elemento



(Fuente Tutorial ANSYS Shell 181 Finite Strain Shell)

A continuación se muestra la malla de elementos finitos que se emplea para la simulación.

Figura 25 Mallado de la pieza



(Fuente propia de los autores)

El elemento inicial se construye por capas, cada una de estas tiene información de las propiedades mecánicas obtenidas por medio de la caracterización de probetas.

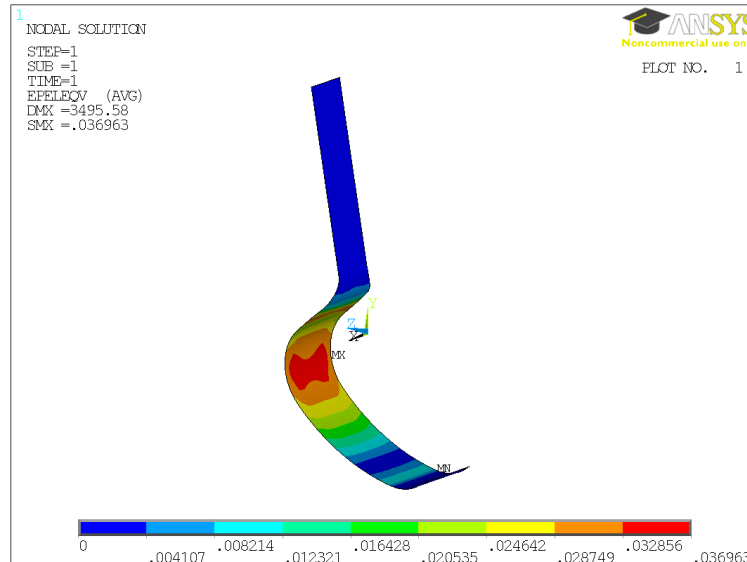
La simulación a realizar parte de un número de capas determinado que corresponde a: 4 capas de tejido MAT y 3 capas de tejido WR, la secuencia del laminado se realiza tipo sándwich, un laminado que propone intercalar los refuerzos de fibra, iniciando y finalizando siempre con tejido MAT.

Se establece un estado de carga que inicia con un valor equivalente a un peso de 40 Kg, luego se aplica una carga equivalente a un peso de 90 Kg y finaliza en 180 Kg.

De las diferentes alternativas evaluadas se selecciona la combinación que ofrece mayor rigidez (menor desplazamiento) y menores deformaciones. Es importante resaltar que cuando se realiza análisis por rigidez de elementos fabricados con materiales compuestos se debe garantizar niveles adecuados de deformación, los cuales debe ser inferiores al 1%

Con relación a las deformaciones, para el estado de carga inicial, aún se está un rango seguro de acuerdo como se muestra a continuación, esperándose valores máximos entre 0.06 y 0.09 y obteniéndose por simulación 0.037.

Figura 26 Deformación máxima del elemento en el estado de carga inicial



(Fuente propia de los autores)

En cuanto a la relación de deformaciones para el estado de carga que corresponde a 90 Kg y el estado de carga final equivalente a 180 Kg, los valores obtenidos por simulación superan los límites máximos esperados, obteniéndose por simulación 0,101 y 0,167.

Tanto las deformaciones máximas y los esfuerzos máximos del elemento se encuentran ubicados en la región señalada en color rojo. Los valores de esfuerzo que corresponden a los tres estados de carga propuestos son: 358,08 MPa, 985,81 MPa y 1618,06 MPa.

Estas simulaciones permiten determinar el espesor del elemento y la secuencia de laminación que presenta mejores resultados. Estos ajustes deben realizarse conociendo la condición física de cada uno de los usuarios, pues la carga real aplicada al elemento depende de la condición de discapacidad y estado físico de las personas.

Si el peso corporal de la persona y la fuerza de impacto que ejerce sobre la prótesis durante la marcha es considerado alto y si los valores de esfuerzo y deformación obtenidos en esta simulación no son adecuados para algún caso particular, es posible aplicar refuerzos de fibra de vidrio unidireccional en la región crítica del elemento.

## 6 MÉTODOS PARA LA FABRICACION DE LA PROTESIS EN MATERIALES COMPUESTO

### 6.1 SELECCION DEL MÉTODO Y DISEÑO DE UN MOLDE

El método seleccionado junto con el análisis de todos los capítulos anteriores, debe dar como resultado un elemento con características mecánicas suficientemente buenas como para soportar las cargas ejercidas por una persona con un peso entre 40 y 80 kilogramos y un rango de estatura entre un metro con cuarenta y un metro noventa centímetros, y que será probado una vez finalice este proyecto, con joven colombiano de 15 años con un peso aproximado de 50 Kg.

Para la fabricación de los elementos protésicos que de los que se trata este proyecto, es necesario utilizar un método que primero que todo y como lo hacen los métodos descritos en el inciso anterior, den la posibilidad de utilizar una matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio, pero que asegure principalmente, que cada fibra de refuerzo que contenga la pieza quede completamente impregnada de resina, más aun teniendo presente, que la proporción de resina requerida en cada una de las piezas depende de la cantidad de fibra utilizada para su refuerzo, por lo que el método debe asegurar un muy buen control de la cantidad de resina que se está aplicando.

Es importante tener presente que para el uso de la prótesis esta debe tener la posibilidad de tener insertos metálicos, en la zona donde el socket pueda estar ubicado, de esta manera es posible asegurar mejor la pieza sobre el usuario. Por lo que el que el método, también debe facilitar la ubicación de este tipo de insertos. Los acabados de las piezas juegan un papel importante dentro de la fabricación de cualquier elemento, independiente de cuál va a ser su uso, pero más aun , para el caso de un elemento protésico dinámico el cual está siempre visible; otro factor fundamental es encontrar una manera que el costo de fabricación de cada elemento protésico sea bastante bajo. Teniendo presente estos factores y muchos más, se podría escoger el método de RTM (Resin transfer Molding) como el ideal, pero teniendo en cuenta que en el medio colombiano es una técnica bastante costosa, se presenta la posibilidad de combinar dos técnicas como lo son el laminado manual y el Vacuum Bagging. A pesar de esto el RTM sigue siendo uno de los más indicados, a pesar de tener unos costos elevados para la fabricación de un molde adecuado, a mediano plazo, pero sin embargo estos gastos se compensan con la gran

cantidad de mano de obra y de desperdician que tienen los otros métodos, esto sin contar lo difícil que es controlar la cantidad de resina que necesita cada pieza para cumplir con las características mecánicas requeridas.

Tabla 10 Características de los procesos de moldeo

Proceso	Producción (piezas/año)	Acabado de las piezas	Equipos	Inversión inicial
RTM convencional	50 – 50.000	Óptimo ambas caras	Moldes Metálicos Sistema de inyección	Alta
Vacuum Bagging	1 – 1.000	Óptimo por una cara. Regular por el contramolde	Sistema o bomba de vacío	Baja
Infusión por vacío	1 – 2.000	Óptimo por una cara. Bueno por el contramolde.	Molde y contramolde rígido. Sistema o bomba de vacío	Baja
RTM light	15 – 3.000	Óptimo por una cara. Bueno por el contramolde.	Molde y contramolde rígido. Sistema de inyección Sistema o bomba de vacío	Media
Fuente (Rutz, CT; Cook Composites and Polymers (CCP);, 2011)				

Como es claro en este punto, para la utilización de cualquiera de los métodos de fabricación mencionados en este capítulo, es estrictamente necesario la el diseño y la fabricación de un molde del que se espera una larga duración, un número considerable de piezas fabricadas, aún si se tiene en cuenta que el método propuesto es el RTM. Por lo que para este se sugiere un molde con las siguientes características:

Materia prima para el molde: el material utilizado es el AISI P20, con una densidad 7850 kg/m<sup>3</sup>. Este material se eligió debido a su contenido de cromo (permite un acabado espejo) que le disminuye el coeficiente de fricción entre la resina y el AISI P20, obteniendo mejores acabados para la prótesis, facilita su explosión del molde, y ya que es un material de muy buena calidad puede asegurar un mayor cantidad de prótesis fabricadas.

Proceso de manufactura del molde: el proceso inicial es escuadrado que se realiza en una fresadora de un bloque de AISI P20, que posteriormente recibirá un proceso de corte por hilo para alcanzar la geometría de la prótesis, ya que si las dos cavidades se mecanizaran a través de un centro de mecanizado vertical el material se fletaría. Una vez realizado este corte, se realiza un proceso de desbaste y acabado sobre una de las cavidades, dándole la forma y geometría de la prótesis en una fresadora CNC. Por último, se realiza el proceso de pulido manual llevando los dos moldes a tener un acabado espejo.

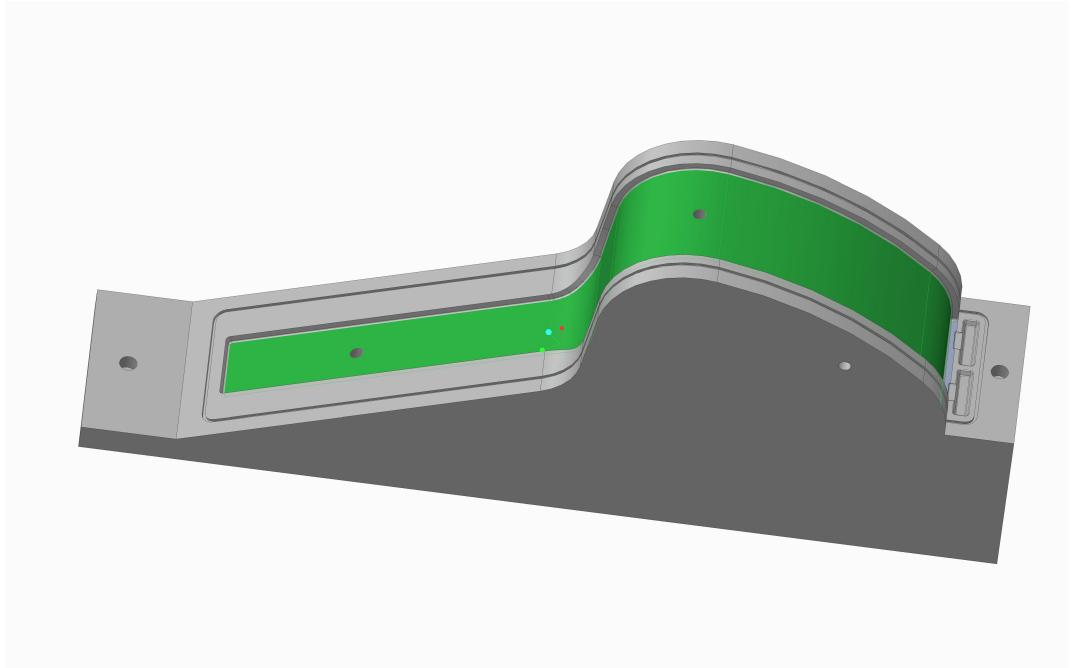
Enfriamiento del molde: Para controlar la temperatura en el proceso se utilizaron perforaciones de diámetros 11.11 mm cercanas a las superficies de conformado de la prótesis donde por estas pasan agua o aceite.

Expulsión de la prótesis: Se utilizaron pines eyectores comerciales de DME MOLDING SUPPLIES para simplificar los costos asociados a su fabricación. Las características de estos pines son las siguientes: material AISI H13, Templado y Revenido a 43 HRC. Rectificados en toda su longitud con un ajuste H7.

Entrada de la Inyección: Se utiliza una boquilla comercial para la inyección de plástico de DME MOLDING SUPPLIES.

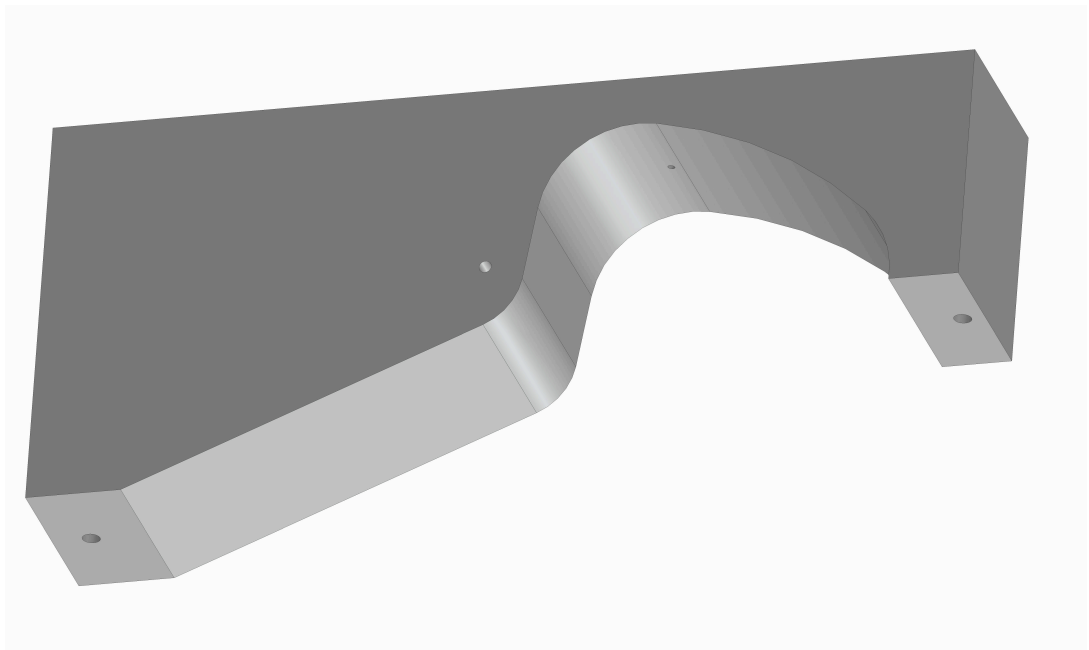
Otros detalles: se realiza una ranura para insertar en ella un O-ring de diámetro 3 mm con la función de impedir la salida de la resina en el momento del moldeo. Se sugiere trabajar el material del O-ring en silicona. Adicionalmente, se hicieron unas salidas del exceso de resina al final de la prótesis con el ánimo de que el exceso de esta se pueda ubicar en estos espacios.

Figura 27 Molde 1 RTM



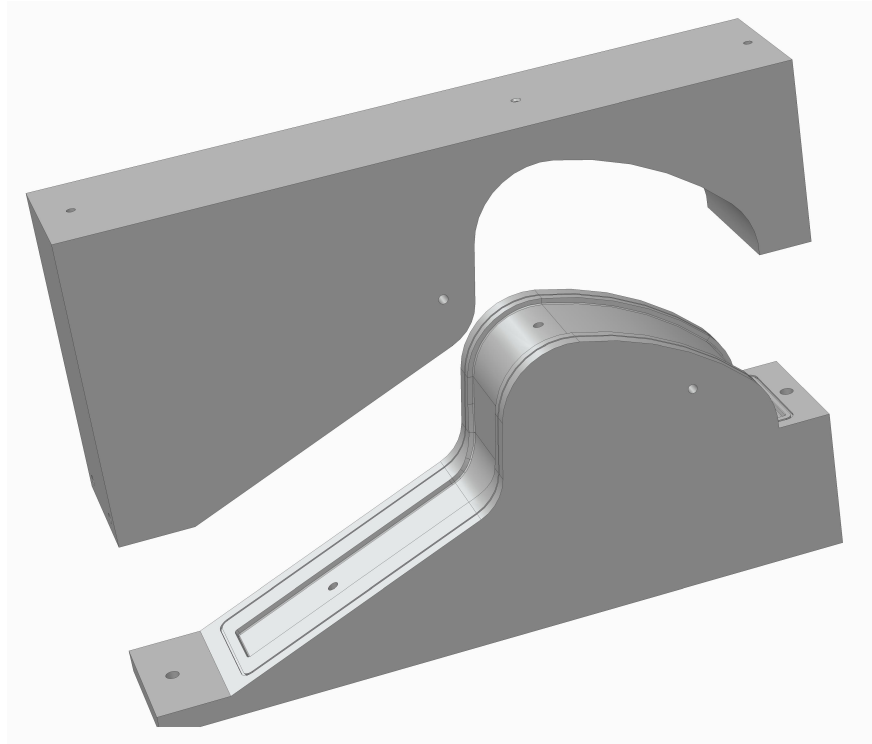
Fuente Propia de los autores

Figura 28 Molde 2 RTM



Fuente Propia de los autores

Figura 29 Ensamble Molde RTM



Fuente Propia de los autores

Para observar en detalle las características anteriores del diseño del molde véase el Apéndice G

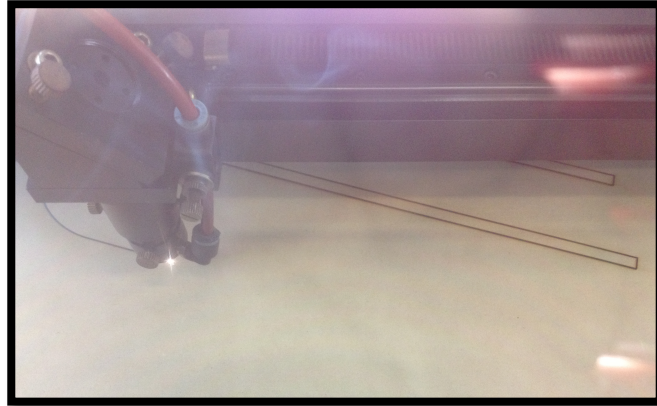
## 6.2 FABRICACIÓN DEL MOLDE PARA LAS PROTESIS PROTOTIPO

Para el alcance y el cumplimiento de los objetivos del proyecto sólo es necesario fabricar los prototipos del elemento protésico y por ello no se ve necesario fabricar un molde que conlleve una gran inversión. Es por esta razón y con el fin de obtener unos prototipos de muy buena calidad y con muy buenas características mecánicas, que se decide combinar dos de los métodos más comunes en la fabricación de piezas que utilizan matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio, como lo son el laminado manual y el Vacuum Bagging. La combinación de estos dos métodos asegura que cada una de las fibras queda perfectamente impregnada de resina y que gracias a la utilización del vacío, la cantidad de burbujas de la pieza que pueden constituir pequeños concentradores de esfuerzos son mínimas.

Previo a la elaboración del molde utilizado en la fabricación de prototipos, y con fin de verificar las características geométricas del diseño con respecto al molde, se fabrica un modelo a escala real de la prótesis; para lo que se utiliza una

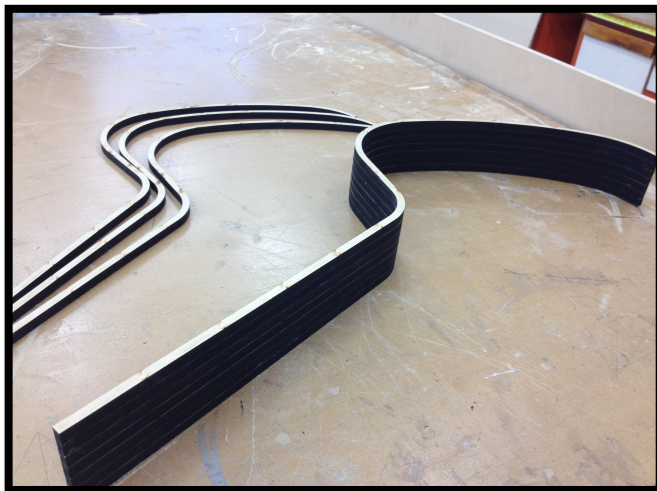
placa de aglomerado de madera de 0.9 mm de espesor, que fue cortada de acuerdo a la vista lateral del plano; utilizando una cortadora láser BoyeHSLC14 (Figura 31) y utilizando pegante de madera convencional, se aglomero cada pieza hasta darle el ancho requerido.

Figura 30 Corte por láser del conformado de la pieza



Fuente Propia de los autores

Figura 31 Modelo en madera del elemento



Fuente Propia de los autores

Una vez elaborado el modelo, y utilizando la misma técnica usada para la fabricación de este se procede a construir el molde, para los que igualmente, se cortaron tablas de aglomerado de manera de 0.9 mm de espesor, en las que se realiza un corte láser con una cortadora laser Boye HSLC14 que reproducía la geometría de la cara interna de la prótesis.

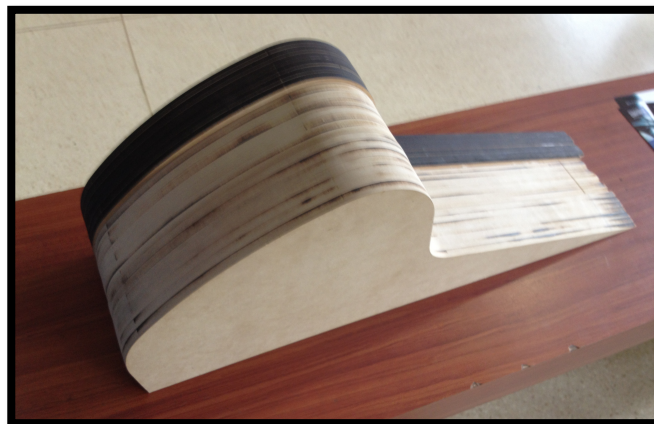
Figura 32: Geometría inicial del molde, con 7 piezas de aglomerado



Fuente Propia de los autores

Luego de obtenidas estas piezas y utilizando pegante para madera se aglomeraron para obtener el ancho del diseño, con un excedente de 7 cm en cada extremo de la prótesis.

Figura 33 Molde sin pulir



Fuente Propia de los autores

El molde para laminado debe tener una rugosidad mínima que oscila entre 0.010 y 0.005 micras, lo que significa que debe tener un acabado espejo. Y se logra al lijar la superficie, procurando que esta tenga el mejor y más uniforme acabado posible en el sitio donde va a ser moldado el elemento protésico asegurando de esta forma que esta superficie quede lo mas lisa posible. Para ayudar aún más a lograr este acabado es de gran utilidad y de muy buenos resultados, la aplicación de varias capas de cera desmoldante que más adelante, como su nombre lo indica, hará más fácil la extracción de la pieza a fabricar del molde

Para terminar basta con verificar que el modelo en escala uno a uno de la pieza encaje perfectamente sobre la superficie del molde.

Figura 34: Molde final



Fuente Propia de los autores

La mayor ventaja de la utilización de los dos métodos anteriormente mencionados para la fabricación de los prototipos es la baja inversión, ya que solo sería necesaria una superficie sobre la que se pueda copiar la pieza, convirtiéndolo en un método simple y con un molde bastante económico, además las únicas herramientas necesarias son brochas y un rodillo. Pero por otra parte, este método tiene la fabricación más engorrosa, ya que es necesaria una excesiva mano de obra además de una muy buena habilidad por parte del

operario. Otra gran desventaja es que por este método solo se logra un buen acabado en una de las capas del material, y además es difícil controlar el desperdicio de resina.

## 7 ELABORACION DE LOS PROTOTIPOS Y ENSAYOS

La fabricación de las prótesis prototipo se lleva a cabo por medio de los métodos y materiales seleccionados en los capítulos anteriores. A partir de esto se logra evaluar el funcionamiento tanto de los materiales seleccionados para la fabricación, como del diseño y el método de fabricación, poniéndolos a prueba por medio de ensayos de compresión, donde se simula la fuerza que se ejerce sobre la prótesis en el momento del impacto e incluso sometándolo a cargas mayores.

Con los resultados que se logran obtener, se compara la información teórica obtenida por medio de simulaciones de elementos finitos y los ensayos prácticos.

### 7.1 CARACTERISTICAS DE LOS PROTOTIPOS.

Se garantiza que el prototipo que se fabrica cumpla con la geometría definida previamente y que el material que se utiliza en la fabricación es igual al aquel definido en la simulación de elementos finitos.

Con la prueba de resistencia mecánica se busca determinar que el esfuerzo máximo del prototipo no sobrepase una fuerza de 180 Kg, este es equivalente a un 200% del límite de peso corporal propuesto en este desarrollo. Se espera que esta carga máxima aplicada se encuentre en el rango elástico del material del prototipo de prótesis.

Como se especificó anteriormente, una vez concluido este proyecto; uno de los prototipos fabricados, será probado inicialmente en un joven con amputación transtibial unilateral con un peso de 50 Kg. Este joven, apoyado por la corporación Colombiana Mahavir Kmina, será uno de los futuro beneficiario de estas prótesis dinámicas, una vez, la corporación determine las características específicas de su caso de discapacidad y se conozcan las propiedades que debe tener la prótesis en cuanto a la resistencia mecánica y la deformación requerida.

Los valores de deformación necesarios para una fuerza de impacto específica, son omitidos del desarrollo debido a que estos se basan en estudios que realizan las entidades a cada uno de los usuarios.

Es necesario realizar un postcurado al prototipo con el fin de acelerar el proceso endurecimiento del material y poder garantizar un 99.5% de propiedades mecánicas del material. Para esto es necesario ubicar el prototipo de la prótesis en un horno a una temperatura de 80°C durante 4 horas. (DUQUE, 2010)

## 7.2 FABRICACIÓN DE PROTESIS PROTOTIPO SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIAL DEFINIDO Y METODO DE LAMINADO SELECCIONADO.

La fabricación de los prototipos de prótesis se lleva a cabo gracias al método seleccionado previamente para la fabricación de prototipos. Este proceso comienza con la determinación del tipo de resina a utilizar en el laminado y el tipo de refuerzos de fibra de vidrio propuestos en capítulos anteriores.

Gracias a los resultados obtenidos en el proceso de la caracterización de materiales reflejados en las tablas 7, 8, 9 y 10, y a la simulación en elementos finitos del elemento protésico, se fabrican dos prototipos con las mismas características con el fin de comprobar el buen funcionamiento del molde y poder realizar pruebas mecánicas que den información sobre la resistencia mecánica y la deformación que sufren los prototipos.

## 7.3 ENSAYO DE LAS PROTESIS PROTOTIPO.

El desarrollo general del proyecto da como resultado un modelo de prótesis dinámicas que se construye gracias a un análisis de marcha, una caracterización de materiales compuestos, un estudio en elementos finitos del elemento dinámico y un método de fabricación de prótesis prototipos.

Gracias a los adelantos en este desarrollo se logró obtener un prototipo de prueba, que se ensaya por medio de una prueba de compresión con el fin de conocer la deformación que se genera en un rango de cargas aplicadas.

Con estas pruebas, es posible conocer el comportamiento de las prótesis prototipo bajo una carga aplicada. Estos valores de compresión en cuanto a la carga y la deformación, son un punto de partida en lo que sería la fabricación de una prótesis dinámica para personas con amputación transtibial.

De esta manera, sería posible a futuro, determinar las características del elemento protésico para cada persona en particular, simplemente conociendo la deformación del elemento propia para cada usuario según su condición de discapacidad. De esta manera, se puede construir el elemento dinámico bajo la misma geometría y con la cantidad de material necesario para garantizar la deformación requerida.

Además se realizó una prueba cíclica a deformación constante que se realiza con el fin de conocer la carga que necesita la pieza para lograr deformarse una cantidad definida en cada uno de los ciclos establecidos.

#### 7.4 PROCESO PARA LA FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS

La fabricación comienza con el corte de los refuerzos de fibra de vidrio, Este proceso se realiza de manera manual y es importante que las dimensiones finales de los refuerzos sean iguales a las dimensiones de longitud y ancho que tendrá el prototipo.

Figura 35 Corte preformas fibra de vidrio



Fuente Propia de los autores

El molde en madera es encerado constantemente con el fin de garantizar que la pieza fabricada sea fácil de desmoldar.

Como se especificó anteriormente, la matriz seleccionada para este proceso es resina viniléster de referencia A430 de la empresa BASF. Esta resina se

prepara en una razón 2 a 1 con respecto a la masa total de los refuerzos utilizados y se aplica naftenato de cobalto genérico producido por la empresa SUMIGLAS al 6% del total de la resina como lo indica la ficha técnica del producto. El peróxido o catalizador genérico distribuido por la empresa SUMIGLAS se aplica en una proporción de 1,5% para iniciar así la reacción química.

Los refuerzos de fibra de vidrio son impregnados con la resina de manera manual, este proceso se realiza capa por capa hasta completar el laminado. Una vez las capas están impregnadas totalmente por la resina se procede a sellar el molde por medio de una bolsa plásticas de polipropileno. Así mismo se procede a aplicar vacío al interior por medio de una bomba de marca *Carpanelli Motori Electrici* y referencia MM63b2 tipo B15 al interior de la bolsa con el fin de eliminar la mayor cantidad de burbujas dentro del laminado y evitar así concentradores de esfuerzos.

Figura 36 Laminado manual prótesis



Fuente Propia de los autores

Figura 37 Vacío con bolsa



Fuente Propia de los autores

Una vez la resina comienza su proceso de reacción exotérmico, el elemento comienza liberar energía y logra calentar hasta una temperatura máxima de 110°C.

El vacío se aplica a un valor entre 20 y 25 pulgadas de mercurio hasta el momento en que el laminado endurezca, aún así, esto no indica que el material haya curado completamente. Se debe esperar 24 horas antes de desmoldar la pieza. Luego de esto se procede a acelerar el proceso de curado por medio de un horno a una temperatura de 80°C en el cual se introduce la pieza por un tiempo de 4 horas.

## 7.5 ENSAYO DE COMPRESIÓN REALIZADO

El tipo de ensayo que se lleva a cabo para determinar la deformación de la prótesis bajo una carga aplicada consiste en una prueba de compresión

realizada en la maquina universal INSTRON 3366 con número de serie Q5582 del laboratorio de materiales de la universidad EAFIT.

El ensayo se llevó a cabo a una velocidad de 20 mm/min y se obtuvieron datos a una razón de 5 ptos/seg hasta un límite de 1.9 kN. Con estas características, se generaron 1501 datos y se llegó a una deformación máxima de 100 mm.

Una de las características principales de la prueba es conocer el comportamiento elástico del prototipo, pues es importante garantizar que para el rango de cargas aplicadas, el material del elemento permanezca en su zona elástica y se recupere totalmente.

#### 7.5.1 Resultados obtenidos en el ensayo de compresión

A continuación se presenta una tabla en la cual se especifica la deformación del elemento para cada carga aplicada y un rango de peso equivalente que inicia en 40 Kg y e incrementa 10 Kg hasta un límite de 180 Kg.

De esta manera se observa que para cada valor de peso existe una deformación respectiva del prototipo. Con estos valores se puede iniciar a futuro un estudio para fabricar prótesis dinámicas a usuarios específicos, simplemente partiendo de los valores obtenidos en el ensayo de compresión y determinando para cada caso en particular si el usuario requiere que el elemento se deforme en mayor o menor cantidad. Se puede redefinir si la fabricación del elemento protésico se construye con mayor o menor número de capas.

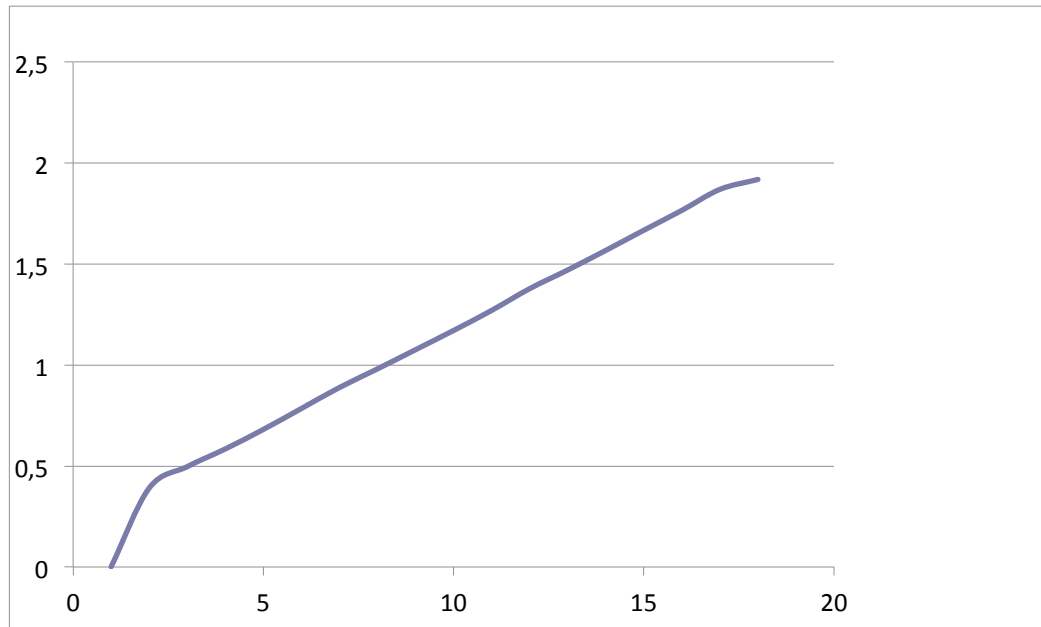
Una gráfica generada con los valores obtenidos en el ensayo de compresión, muestra que para la carga máxima aplicada, el comportamiento del material es aún elástico.

Tabla 11 Datos ensayo de compresión

<b>PUNTOS GENERADOS</b>	<b>DEFORMACIÓN (mm)</b>	<b>CARGA APLICADA (KN)</b>	<b>PESO EQUIVALENTE (Kg)</b>
267	17,733	0,390	40
346	22,999	0,496	50

413	27,466	0,584	60
488	32,466	0,680	70
569	37,866	0,784	80
646	42,999	0,888	90
712	47,400	0,980	100
781	52,000	1,075	110
849	56,533	1,170	120
919	61,199	1,270	130
996	66,333	1,378	140
1065	70,933	1,470	150
1141	76,000	1,567	160
1234	82,200	1,667	170
1332	88,733	1,765	180
Fuente Propia de los autores			

Figura 38 Grafico de Carga vs Deformación



Fuente Propia de los autores

## 7.6 ENSAYO DE PRUEBA CÍCLICA REALIZADO

Este tipo de ensayo se lleva a cabo en la máquina triaxial dinámica marca GCTS del laboratorio de suelos de la universidad EAFIT. En esta, se ubica el prototipo de prótesis dinámica y se somete a cargas cíclicas senoidal de compresión y tensión, la cuales deforman la pieza a una amplitud doble y constante de 40mm. Esta amplitud doble de 40mm se divide en dos etapas; 20mm para compresión y 20mm para tensión a una frecuencia de ensayo de 1Hz la cual es el valor de tiempo aproximado que toma realizar un paso completo en una marcha acelerada.

Con esta prueba, se logra determinar la carga en Newton que debe ejercer la máquina para lograr deformar la pieza dicha cantidad. No es posible someter el prototipo de la prótesis a una amplitud mayor, ya que las características de la máquina solo dan un límite de 45 mm de amplitud doble.

El ensayo se llevó a cabo durante 15 minutos, obteniendo así un total de 900 ciclos del cual se obtienen los valores de carga para la compresión de 20 mm y para la tensión de 20 mm.

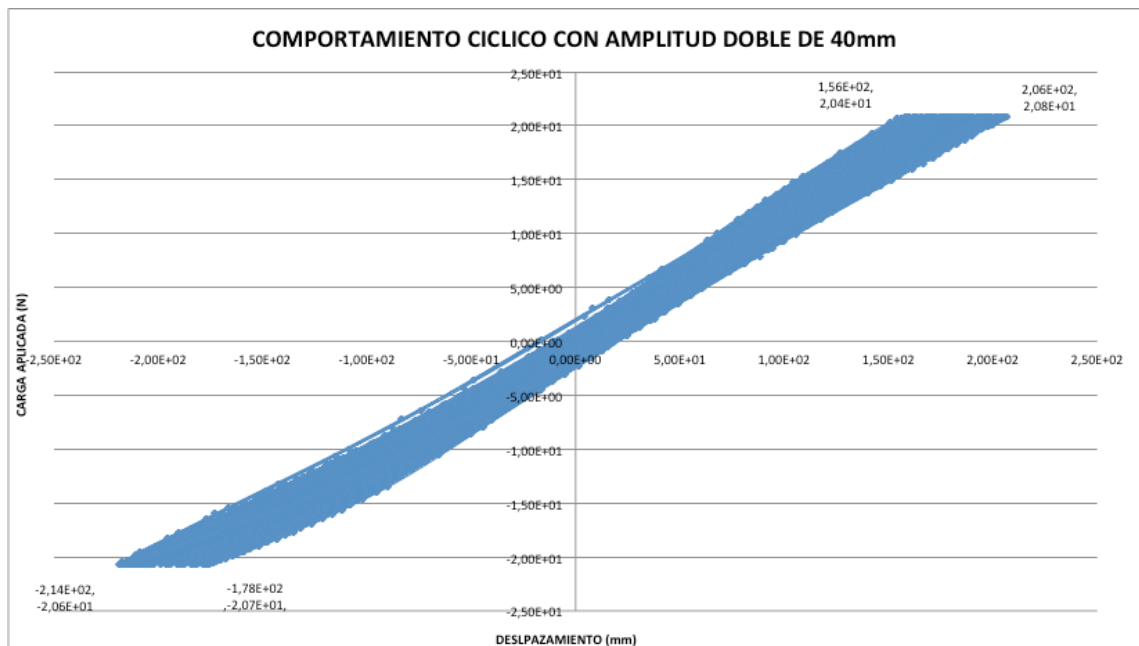
Las variaciones en la carga ejercida por la máquina se pueden traducir como fatiga del prototipo de prótesis, pues indica que para lograr deformarse la

misma cantidad en cada ciclo, se requiere una carga menor a medida que aumenta el tiempo de la prueba.

### 7.6.1 Resultados obtenidos en el ensayo cíclico

A continuación se presenta una gráfica de carga vs deformación, donde se logra apreciar el comportamiento del prototipo durante la prueba.

Figura 39: Comportamiento cíclico del prototipo con amplitud doble de 40mm



Fuente Propia de los autores

Se observa, que durante los 900 ciclos de la prueba, la carga se disminuyó 50 Newton entre el valor inicial y final de carga aplicada a compresión y 36 Newton entre el valor inicial y final de la carga aplicada a tensión.

Normalmente esto se puede definir como fatiga de la pieza, aún así, las dimensiones de la máquina obligan a realizar cambios en el montaje del prototipo de prótesis, Esto genera que la pieza de acero galvanizado que soporta el prototipo en la base de la maquina se deforme gradualmente a medida que avanzaba el tiempo de la prueba, lo cual se considera una causa de error.

Al finalizar el tiempo de la prueba, se observa que el prototipo no sufre cambios en la geometría ni alteraciones superficiales en el material. Lo que nos lleva a concluir que el material tiene una buena respuesta frente a un estado de carga y elongación cíclica.

Otro aspecto importante de la prueba cíclica, es que el prototipo de la prótesis, fue sometido a tensión a pesar de que esta no está diseñada para soportar este tipo de cargas.

## 8 CONCLUSIONES

Se identificó un método apropiado para la fabricación de prótesis dinámicas con matriz polimérica económica y refuerzo de fibra de vidrio, este método es el RTM (Resin transfer moulding), el cual presenta importantes ventajas para el tipo de producto en particular. Además se rediseñó la geometría de acuerdo a criterios ergonómicos. El diseño y los posibles materiales para la fabricación fueron evaluados desde el punto de vista de la resistencia mecánica. También se construyeron prototipos que fueron evaluados experimentalmente mostrando un muy buen desempeño y confirmando que el diseño es adecuado.

Se realizan modificaciones geométricas al diseño inicial de la prótesis basado en información obtenida sobre los elementos protésicos aplicados a la realización de actividades físicas de tipo deportivo o recreativo y con la información obtenida de un análisis antropométrico de marcha acelerada. Se define un modelo de prótesis que tiene como objetivo facilitar el desempeño físico de personas con amputación transtibial unilateral o bilateral. Esta geometría diseñada es un modelo ajustable a personas en un rango de estatura entre 1,40 m a 1,90 m y de peso entre 40 Kg y 80 Kg.

Se hace un proceso de caracterización mecánica de distintos compuesto con tres resinas: Vinyléster A430, Poliéster 30805 y Poliéster 30805 al 70% - 30872 al 30%; y 3 refuerzos de fibra de vidrio diferentes: unidireccional (940 gr/cm<sup>2</sup>), Woven Rovin (850 gr/cm<sup>2</sup>) y MAT (430 gr/cm<sup>2</sup>). Se encontró que los compuestos con vinyléster y poliéster combinado tienen muy buenas propiedades mecánicas, además de ser similares entre sí. La resina combinada de poliéster tiene un costo más bajo, pero su viscosidad es mayor y el tiempo de curado aumenta hasta tres veces más con respecto al otro compuesto, esto afecta la fabricación de las prótesis. Por lo anterior se selecciona la resina vinyléster como matriz polimérica.

Se analiza la resistencia mecánica utilizando el método de elementos finitos para la prótesis diseñada con el material seleccionado. El análisis permite identificar el mayor esfuerzo en la curva inferior del elemento y deformación de este bajo distintas condiciones de carga. Se concluye que para las condiciones evaluadas el elemento no presenta falla.

Se propone como método para la fabricación de prótesis el RTM. Este método resulta particularmente ventajoso puesto que se tiene un acabado superficial por ambas caras, permite hacer insertos metálicos, garantiza la dimensiones de los productos, tiene menor desperdicio de material y requiere poca mano de obra. La desventaja es el alto costo del molde, cercano a 50`000.000 de pesos. Por lo anterior, para la fabricación de los prototipos se utiliza un método combinado entre Vacuum Bagging y laminado manual.

Utilizando un método combinado de Vacuum Bagging y laminado manual, se construyeron dos prototipos con refuerzo de fibra de vidrio y matriz vinyléster.

Se observa que la baja viscosidad de la resina permite un buen llenado del molde y evacuación del aire, además el tiempo de curado es adecuado. Los prototipos obtenidos presentan pocas y pequeñas burbujas que no afectan de manera significativa el desempeño de la pieza.

Se construyeron dos prototipos, uno de estos fue evaluado en un ensayo de compresión a un límite de desplazamiento de 100 mm y una carga aproximada de 200 kg. Para estas condiciones el prototipo no presentó falla y se mantuvo dentro del rango de deformación elástica, este resultado es satisfactorio y supera los rangos de carga esperados. El ensayo no se continuó a la falla, puesto que el límite de desplazamiento de la máquina es 100 mm.

El otro prototipo se sometió a una prueba cíclica a deformación constante de 20 mm a compresión y 20 mm a tensión durante 900 ciclos. Durante la prueba no se identificó ningún tipo de falla, lo cual es positivo. Sin embargo se presentaron algunos inconvenientes para ubicar el prototipo en la máquina de ensayos y a medida que avanzaba la prueba los elementos de sujeción de la pieza se fueron desajustando afectando así los resultados. Por esto, se recomienda realizar pruebas de cargas cíclicas adicionales con un montaje más apropiado y un mayor número de ciclos.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

ADAMS, V., & ABRAHAM, A. (1999). *Building Better Products with Finite Element Analysis*. Nuevo Mexico, estados Unidos.

ASTM INTERNATIONAL. (24 de 06 de 2004). Standart Test Method for Tensible Properties of Polymer Matrix Composite Materials. USA.

BEDOYA, A. F. (2005). *Metodología de Diseño y Análisis de Elementos Estructurales Fabricados en Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio Usando El Método De Los Elementos Finitos*. Medellin, Colombia.

CARVALHO, A. (1992). *Fiberglass X Corrosao*. São Paulo.

CIREC. (2011). *Centro Integral de Rehabilitacion de Colombia*. Obtenido de <http://www.cirec.org/>

Dimensiones (Ossur). (2010). Obtenido de <http://www.ossur.com/lisalib/getfile.aspx?itemid=19207>

DiscapacidadColombia. (26 de Agosto de 2007). *Discapacidad Colombia*. Obtenido de <http://www.discapacidadcolombia.com/Estadisticas.htm>

DUQUE, J. F. (2010). Ingeniero Andercol. Medellin.

FERNÁNDEZ IGLESIAS, J. L. (2010). Obtenido de <http://www.joseluisfernandeziglesias.com/wp-content/uploads/2008/07/jlfi-la-imagen-social-de-las-personas-con-discapacidad.pdf>

HANCOCK, J. D. (1929). *Innominate Society*. Recuperado el 2011, de <http://www.innominateociety.com/Articles/The%20Evolution%20of%20Artificial%20Limbs.htm>

HERNANDES STENGELE , F. (2008). *Disenho y contruccion de prototipo neumtico de protesis de pierna humana*.

HERNANDES STENGELE , F. (14 de 06 de 2008). Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana. Cholula, Puebla, Mexico.

Impact Levels (Ossur). (2010). Obtenido de <http://www.ossur.com/?PageID=13470>

Instituto Politécnico Nacional. (2007). *CORROSIÓN Y SU PREVENCIÓN*. Zacatenco, Mexico.

International Paralympic Committee (IPC). (1999). *Official Website of the Paralympic Movement • IPC*. Recuperado el 16 de 08 de 2012, de Official website of the Paralympic Movement: <http://www.paralympic.org/ParalympicGames>

J-Boats. (2004). *J-Boats*. Obtenido de <http://www.jboats.com/blog/jblog.html>

KIM, R. Y., & MIRAVETE, A. (1992). *Ensayos de materiales compuestos*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.

LOPEZ SANCHEZ, A. J. (2009). *Elaboracion de protesis con respuesta dinamica*. Medellin.

mahavir-kmina. (s.f.). Obtenido de [www.mahavir-kmina.org](http://www.mahavir-kmina.org)

Ministerio de la Proteccion Social. (2010). Obtenido de <http://www.minproteccionsocial.gov.co/discapacidad/>

MIRAVETE, A. (2000). *MATERIALES COMPUESTOS*. Zaragoza, España: Antonio Miravete.

Modular III (Ossur). (2010). Obtenido de <http://www.ossur.com/pages/13459>

PELAEZ, C. (2011). Director Técnico. *CENOP*.

PISTORIUS, B. Ó. (20 de Diciembre de 2007). *Ultima Jornada*. Recuperado el 2009, de <http://www.ultimajornada.com/2007/12/scar-pistorius.html>,

PLAZA BAONZA, G. R. (2005). *Departamento de Ciencia de Materiales*. Recuperado el 2011, de Departamento de Ciencia de Materiales: [http://www.mater.upm.es/polimeros/Documentos/Cap6\\_5Moldeoinyeccion.pdf](http://www.mater.upm.es/polimeros/Documentos/Cap6_5Moldeoinyeccion.pdf)

PONS, A. C. (2007). Proyecto Menorquín Yacht. CARTAGENA, COLOMBIA.

REINHARD, T. J. (1998). *HANDBOOK OF COMPOSITES*. (S. T. Peters, Ed.) Mountain View, California, USA: CHAPMAN & HALL.

Rutz, CT; Cook Composites and Polymers (CCP);. (2011). *LESSONS LEARNED WHILE DESIGNING LOW-VOLUME CLOSED-MOULD PROCESSES TO REPLACE OPEN-MOLD LAMINATION*. Recuperado el 12 de 08 de 2012, de CCP COMPOSITE CREATING PROGRESS: [www.ccponline.com](http://www.ccponline.com)

Smooth-On, Inc. (2008). *Smooth-On*. Recuperado el 2011, de Smooth-On: [http://www.smooth-on.com/pdf/Smoothon\\_HTB\\_2008.pdf](http://www.smooth-on.com/pdf/Smoothon_HTB_2008.pdf)

SUMIGLAS S.A. (s.f.). *MATERIAS PRIMAS*. Obtenido de SUMIGLAS S.A.: <http://www.sumiglas.com/diccionario.htm#carbon>

TOBON, J. J. (2010). INGENIERO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO DE MAHAVIR KMINA. Medellin.

TOLLER, C., & RIZZO, A. (s.f.). *Universidad de Puerto Rico*. Recuperado el 2011, de Universidad de Puerto Rico: <http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Compuestos%20Fabricacion.pdf>

TORRES VELÁSQUEZ , A. (2009). *DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE COMPOSITES POLIMÉRICOS PARA SU APLICACIÓN EN PRÓTESIS Y ÓRTESIS DE MIEMBRO INFERIOR* . Medellin, Antioquia, Colombia.

TORRES VELÁSQUEZ, A. (2009). (A. LOPEZ, Entrevistador) MeDellin.

WEST SYSTEM. (Abril de 2010). *WESTSY STEAM*. Recuperado el 2011, de <http://www.westsystem.com/ss/assets/HowTo-Publications/Vacuum-Bagging-Techniques.pdf>

## APÉNDICE A: CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL

En total se fabricaron 54 probetas bajo la norma ASTM D3039 STANDARD TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTIES OF POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS.

Figura: 40 Probetas de materiales compuestos



Fuente Propia de los autores

El corte de los laminados de los cuales se obtienen las probetas, se llevó a cabo por el método de corte con agua. Este servicio fue ofrecido por la empresa HIDROCORTE S.A y el trabajo se llevó a cabo en una máquina FLOW TECHNOLOGY 420 con una presión de trabajo 420 MPA y una velocidad de salida de 4 Match.

Figura 41: Procedimiento de Corte con agua



Fuente Propia de los autores

Figura 42: Montaje INSTRON 3366 y Schenk Trebel



Fuente Propia de los autores

Aquellas probetas construidas con refuerzo de fibra de vidrio MAT fueron ensayadas a tensión en la máquina universal INSTRON 3366 con número de

serie Q5582 y un límite de carga de 10 kN. Mientras que las demás probetas se ensayaron a tensión en la máquina universal *Schenk Trebel* con un límite de carga 80 kN

Los ensayos de tensión se realizaron con el fin de conocer el punto de ruptura de cada material y así proceder a determinar las propiedades mecánicas mediante la gráfica de esfuerzo y deformación de cada ensayo.

Figura 43: Ensayo de ruptura MAT



Figura 44: Ensayo de ruptura Knytex 0°



Figura 45: Resultado de ensayo Knytex 0°

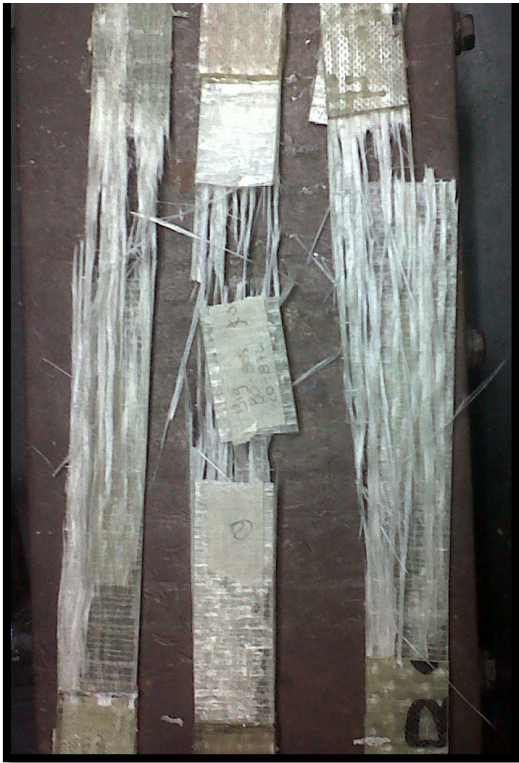


Figura 46: Resultado de ensayo Knytex 90°

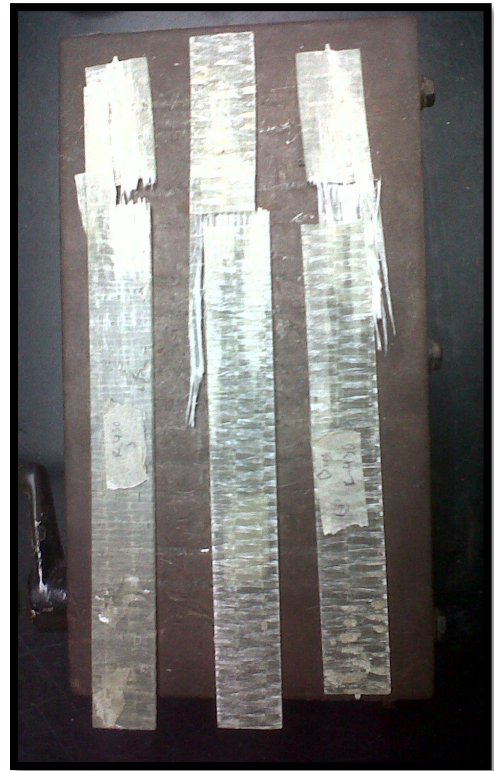


Figura 47: Resultado de ensayo Knytex 45°



Figura 48: Resultado de ensayo Woven Rovin

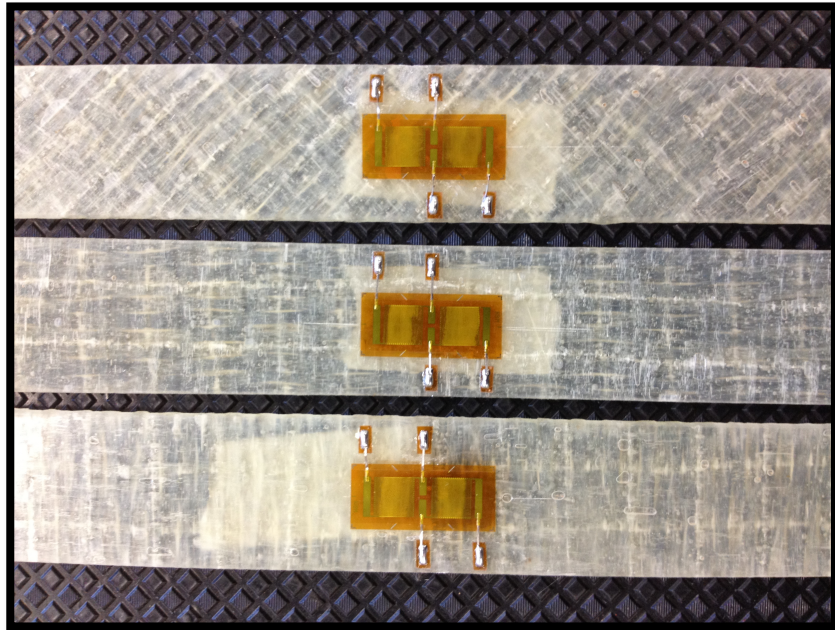


Figura 49: Resultado de ensayo MAT



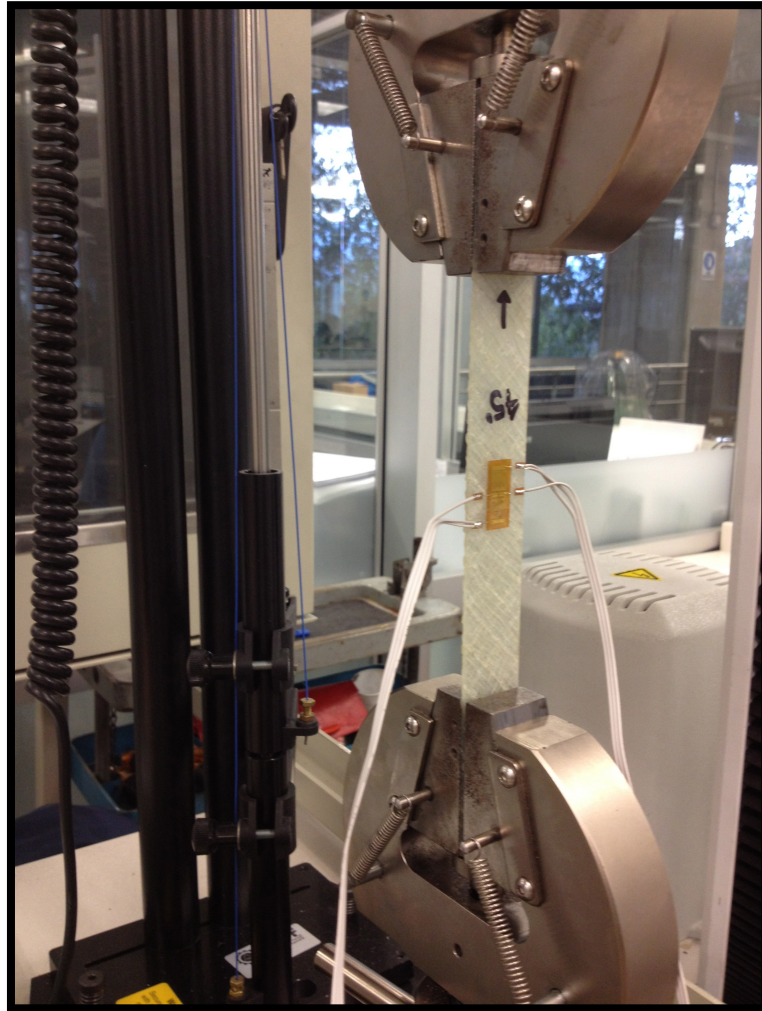
Debido a que la selección del material adecuado para el desarrollo de los prototipos de prótesis es el aquel construido con resina vinyléster, Se decidió ensayar bajo tensión las probetas construidas con matriz R430 haciendo uso de galgas extensométricas *Strain Gage* tipo "Y" Biaxiales ref. 1- XY11-6/350 ohm de la empresa BCI ingeniería.

Figura 50: *Strain Gage* tipo "Y" biaxiales ref 1-XY11-6/350 ohm



El montaje de las 3 probetas con galgas extensométricas, se realizó en la máquina universal INSTRON 3360 a un límite que corresponde al 10% del valor del punto de ruptura.

Figura 51: Montaje de probetas con galgas extensométricas



Una prueba importante para verificar las características del material, es la incineración de probetas, donde se determina el porcentaje volumétrico que hay entre la matriz y el refuerzo de la fibra de vidrio.

Las probetas fueron cortada de 25 mm X 25 mm y sometidas a una temperatura de 800°C durante 2 horas en una mufla del laboratorio de procesos de la universidad EAFIT. De esta manera se logró eliminar todo el porcentaje de Resina que componía la probeta.

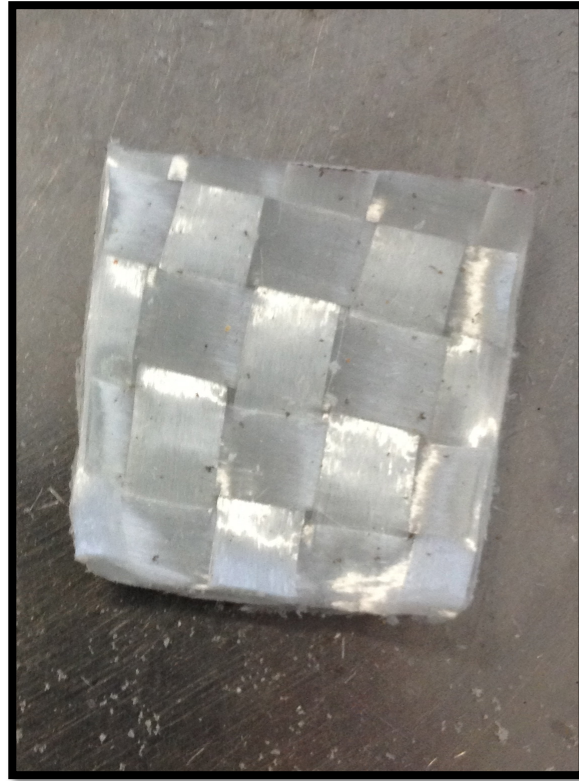
Figura 52: Probeta de incineración



Figura 53: Probetas sometidas a 800°C



Figura 54: Resultado de la probetas sometidas a incineración.



## APÉNDICE B: FICHAS TÉCNICAS

APÉNDICE C: GRAFICA ENSAYOS DE TENSIÓN REALIZADOS A LA  
PROBETAS.

## APÉNDICE D: COTIZACIONES.

APÉNDICE E: PATENTE US4822363.

APÉNDICE F: NORMA ASTM D3039.

## APÉNDICE F: PLANOS.