

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA DE POSGRADO
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Diseño y fabricación de un Dispositivo de moldeo para prótesis
transtibial de materiales compuestos”**

TESIS

Que para obtener el grado de maestro en ingeniería mecánica presenta

Rodrigo Montero Amézquita

Director de Tesis:

Dr. Víctor Nuño Moreno

Mexicali, B. C.

Diciembre 2016

ÍNDICE GENERAL

	Página
Índice de Figuras	i
Índice de Tablas	iii
Glosario	vi
Resumen	xi
Abstract	xii
Objetivo general y metas	xiii
Justificación	xiii
Hipótesis	xiv
Introducción	xv
1 Estado del Arte.....	2
1.1 Causas de Discapacidad	2
1.2 Amputaciones.....	2
1.2.1 Amputación del miembro inferior por pie diabético.....	4
1.3 Antecedentes de Prótesis	5
1.4 Trabajos de investigación previos	6
1.5 Prótesis Modernas	15
1.6 Prótesis Transtibiales.....	15
1.6.1 Componentes de prótesis transtibial	18
1.7 Manufactura de prótesis	19
1.8 Planteamiento del problema	19
1.9 Sumario	20
2 Generalidades.....	22
2.1 Materiales Compuestos	22
2.1.1 Materiales compuestos reforzados con partículas.....	22

2.1.2	Materiales compuestos endurecidos por dispersión.....	23
2.1.3	Materiales compuestos reforzados con fibras	24
2.1.4	Materiales compuestos laminares	25
2.2	Técnicas de Moldeo	25
2.2.1	Moldeo en arena.....	27
2.2.2	Moldeo en concha	27
2.2.3	Moldeo por inyección	28
2.2.4	Moldeo centrífugo.....	29
2.2.5	Moldeo a la cera perdida.....	30
2.3	Fibras en materiales compuestos.....	32
2.3.1	Presentaciones comerciales de fibras.....	33
2.3.2	Fibra de Carbono.....	35
2.3.3	Fibra de Orgánicas	36
2.3.4	Fibra de Vidrio	37
2.3.5	Fibras Naturales	38
2.4	La matriz en un material compuesto	39
2.4.1	Resinas Poliéster	40
2.4.2	Resinas Viniléster	40
2.4.3	Resinas Epoxi.....	40
2.4.4	Resinas Fenólicas.....	41
2.5	Métodos de fabricación de materiales compuestos	41
2.5.1	Materiales utilizados	42
2.5.2	Moldeo por colocación manual.....	44
2.5.3	Moldeo por vacío	46
2.5.4	Procesamiento por Autoclave	47

2.5.5	Etapa de curado del compuesto.....	49
2.6	Moldes para Materiales Compuestos	50
2.6.1	Aspectos fundamentales previos.....	50
2.6.2	Diseño de molde	52
2.7	Materiales de construcción de moldes para materiales compuestos	58
2.8	Métodos de fabricación de moldes.....	58
2.8.1	Maquinado C.N.C.	58
2.8.2	Velocidades de corte	60
2.8.3	Normas que regulan la fabricación	62
2.9	Sumario	64
3	Metodología	67
3.1	Despliegue de la función de calidad (QFD)	69
3.1.1	Identificación del cliente.....	69
3.1.2	Determinación de los requerimientos del cliente.....	69
3.1.3	Importancia relativa de los requerimientos del cliente	70
3.1.4	Características Técnicas.....	70
3.1.5	Funciones de servicio.....	71
3.1.6	Matriz de planeación.....	72
3.1.7	Evaluación de la importancia.....	74
3.1.8	Matriz de correlaciones.....	75
3.1.9	Requerimientos Técnicos.....	76
3.2	Diseño Conceptual	78
3.3	Materiales de trabajo	79
3.4	Maquinado.....	81
3.4.1	En Madera.....	81

3.4.2	En Aluminio.....	83
3.5	Sumario	84
4	Desarrollo.....	86
4.1	Primera y segunda propuesta de molde.....	90
4.1.1	Fabricación de molde.....	94
4.1.2	Prueba del molde.....	96
4.2	Tercer propuesta de molde	98
4.2.1	Fabricación del molde.....	102
4.2.2	Prueba de molde.....	107
4.3	Sumario	114
5	Resultados.....	116
5.1	Molde progresivo y costos	116
5.1.1	Costo inicial de moldes.....	119
5.1.2	Costo del molde de un 2do paciente	121
5.1.3	Costo de fabricación del compuesto	122
5.1.4	Costo total de prótesis según el número de pacientes.....	123
5.2	Ensamble de prótesis transtibial de material compuesto.....	124
5.3	Análisis térmico en etapa de curado.....	125
5.4	Condiciones de frontera en curado del compuesto.....	128
5.5	Tiempo de vacío	133
5.5.1	Tiempo de vacío en molde superior.....	133
5.5.2	Tiempo de vacío en molde inferior	134
5.6	Prueba en prótesis transtibial.....	135
6	Conclusiones	140
6.1	Trabajo a futuro	141

7	Bibliografía	144
8	Apéndices.....	149

Índice de Figuras

Figura 1.1 Porcentaje de la población con discapacidad según causa de la misma [5]	2
Figura 1.2 Niveles de Amputación [7].....	4
Figura 1.3 Análisis de elemento finito realizado por Silver en 1997.....	7
Figura 1.4 Propuesta de prótesis de pie del Politécnico de Milán (2009).....	9
Figura 1.5 Prótesis con socket moldeado al alto vacío de Sutton y Hoskins (2011)	10
Figura 1.6 Pie protésico diseñado por estudiantes de la Universidad de Arkansas (2012)	11
Figura 1.7 Ensamble de miembro inferior propuesto analizado por Ghaith (2012)	12
Figura 1.8 Sockets utilizados en trabajo de Action Medical (2014).....	13
Figura 1.9 Nivel de amputación y modelado de los colgajos de piel [25].....	17
Figura 1.10 Colgajo de piel suturado anteriormente a nivel de tibia [25]	17
Figura 1.11 Componentes de prótesis transtibial [26]	18
Figura 2.1 Molde de Arena Cerrado	27
Figura 2.2 Moldeo en concha.....	28
Figura 2.3 Moldeo por inyección.....	29
Figura 2.4 Moldeo centrífugo	30
Figura 2.5 Moldeo a la cera perdida en cascara.....	31
Figura 2.6 Partículas dispersas usadas como refuerzo.....	33
Figura 2.7 Fibras Discontinuas, aleatoria (izq.) unidireccional (der.)	34
Figura 2.8 Distintas configuraciones de tejido de fibras.....	34
Figura 2.9 Comparativa entre un pelo humano y la fibra de carbono.....	36
Figura 2.10 Aramida	37
Figura 2.11 Fibra de Vidrio	38
Figura 2.12 (izq.-der.) Fibra de carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio	42
Figura 2.13 (izq.-der.) espuma de poliuretano, panel tipo nido de abejas y madera	42
Figura 2.14 Film perforado	43
Figura 2.15 Material de respiración o sangrado.....	44
Figura 2.16 Moldeo de fibra de vidrio por colocación manual.....	44
Figura 2.17 Moldeo por vacío.....	46
Figura 2.18 Distribución de material para laminado por vacío	47
Figura 2.19 Componentes de un autoclave [40]	48

Figura 2.20 Etapa de curado de resina epoxi [41]	49
Figura 2.21 Consideraciones sobre pliegues y cantos del molde.....	54
Figura 2.22 Simetría del laminado en moldes de materiales compuestos	55
Figura 2.23 Gradientes de Desmoldeo.....	56
Figura 2.24 Consideraciones sobre grandes superficies planas	57
Figura 2.25 Ejes de trabajo de máquina CNC [44].....	59
Figura 2.26 Herramientas de corte utilizadas en maquinado [45]	60
Figura 2.27 Variables para calcular velocidad de corte [46]	62
Figura 3.1 Diagrama de Flujo de Proyecto	68
Figura 3.2 Esquemático de funciones de servicio.....	71
Figura 3.3 Gráfica de benchmarking	74
Figura 3.4 Matriz de correlaciones de los “Cómo”	76
Figura 4.1 Catalogo Össur [49].....	86
Figura 4.2 Catalogo Endolite [50]	87
Figura 4.3 Prótesis Vari-Flex modelo 2004.....	87
Figura 4.4 Prótesis Prototipo Rev. A	88
Figura 4.5 Sección media de prótesis	88
Figura 4.6 Plano de prótesis transtibial propuesto con dimensiones y componentes	89
Figura 4.7 Molde Rev. 1	90
Figura 4.8 Molde Rev. 2	92
Figura 4.9 Dibujo con medidas de molde Rev. 2.....	93
Figura 4.10 Diseño CAM utilizado para fabricar molde	94
Figura 4.11 Pieza inferior de molde Rev. 2 siendo maquinada	95
Figura 4.12 Molde Rev. 2 en madera terminado	95
Figura 4.13 Equipo necesario para vacío	96
Figura 4.14 Corte de fibra de carbono para primer prototipo,	97
Figura 4.15 Propuesta de Molde escalable	98
Figura 4.16 Molde superior Rev. 3	99
Figura 4.17 Molde inferior Rev. 3	99
Figura 4.18 Dibujo de molde superior con dimensiones y componentes Rev. 3.....	100
Figura 4.19 Dibujo de molde inferior con dimensiones y componentes Rev. 3.....	101

Figura 4.20 Ventana de MasterCAM para configurar operaciones de maquinado.....	103
Figura 4.21 Ruta simulada en MasterCAM	103
Figura 4.22 Maquinado de pieza de molde Rev. 3	104
Figura 4.23 Cortadores utilizados para el maquinado del molde.....	104
Figura 4.24 Cortadores de bola utilizados para fabricación del molde.....	105
Figura 4.25 Molde superior terminado	106
Figura 4.26 Molde inferior terminado	106
Figura 4.27 Fibra de carbono cortada previo a la fabricación del compuesto	107
Figura 4.28 Orientación de las fibras de carbono y su geometría de corte	108
Figura 4.29 Aplicación de cera al molde en etapa de preparación del molde	108
Figura 4.30 Báscula digital para medir mezcla de resina epoxi y catalizador	109
Figura 4.31 Aplicación de resina epoxi después de colocar fibra de carbono	110
Figura 4.32 (Izq.) Colocando contrapartes en molde. (Der.) Cerrando molde con tornillos	111
Figura 4.33 Molde superior cerrado, sellado y estrangulado al vacío previo a etapa de curado	112
Figura 4.34 Molde inferior cerrado, sellado y estrangulado al vacío previo a etapa de curado .	112
Figura 4.35 Molde superior con las contrapartes retiradas al momento de desmoldeo	113
Figura 5.1 Molde progresivo, superior (izq.) e inferior (der.)	117
Figura 5.2 Molde superior seccionado explicando la dimensión variable.....	118
Figura 5.3 Molde inferior seccionado explicando dimensión variable.....	119
Figura 5.4 Tiempos de maquinado de tres componentes diferentes	120
Figura 5.5 Gráfica de costo de prótesis por paciente	124
Figura 5.6 Ensamble prótesis transtibial (vista explotada)	125
Figura 5.7 Transferencia de calor a través de una pared.....	127
Figura 5.8 Nodos en malla para evaluar temperaturas en análisis térmico.....	129
Figura 5.9 Análisis térmico en molde superior sometido a 80 °C por 2 horas.....	130
Figura 5.10 Análisis térmico en molde inferior sometido a 80 °C por 2 horas.....	131
Figura 5.11 Temperatura en nodos en el transcurso de 120 minutos en molde superior.....	132
Figura 5.12 Nodo con temperatura máxima en el transcurso de 120 minutos en molde inferior	132
Figura 5.13 Análisis estructural a prótesis (izq.) y grafica de concentración de esfuerzo según porcentaje de marcha (der.).....	135
Figura 5.14 Prótesis transtibial con montaje para prueba	136

Figura 5.15 Máquina para pruebas mecánicas	137
Figura 5.16 Prótesis montada en máquina para pruebas.....	138
Figura 5.17 Gráfica de Carga/Desplazamiento en prótesis transtibial.....	139

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Resumen del estado del arte.....	14
Tabla 2.1 Tabla comparativa de fibras [34]	33
Tabla 2.2 Comparación entre tejidos de fibras continuas	35
Tabla 2.3 Características generales de diferentes resinas	39
Tabla 2.4 Ventajas y Desventajas del proceso de colocación manual	45
Tabla 3.1 Requerimientos obligatorios y deseables del producto.....	70
Tabla 3.2 Características técnicas de diseño	71
Tabla 3.3 Matriz de planeación de producto.....	72
Tabla 3.4 Matriz de ponderación de requerimientos del cliente	73
Tabla 3.5 Matriz de ponderación de producto comparada con otros fabricantes	73
Tabla 3.6 Tabla de evaluación de la importancia	75
Tabla 3.7 Requerimientos Técnicos y su meta de diseño de proyecto	77
Tabla 3.8 Funciones de servicio del proyecto.....	78
Tabla 3.9 Materiales necesarios para fabricar los moldes	80
Tabla 3.10 Materiales necesarios para realizar la prueba de los moldes	80
Tabla 5.1 Costo de materiales para fabricación de moldes (pesos)	119
Tabla 5.2 Costos de proceso de manufactura de moldes (pesos).....	121
Tabla 5.3 Costo de manufactura de molde para un 2do paciente	121
Tabla 5.4 Costo de material para compuesto por prótesis	122
Tabla 5.5 Costo de prótesis por paciente	123
Tabla 5.6 Propiedades térmicas en materiales isotrópicos.....	126

Glosario

Adhesivas	Sustancia que, interpuesta entre dos cuerpos o fragmentos, sirve para pegarlos.
Advenimiento	Llegada de algo o alguien.
Aglutinante	Sustancia líquida que solidifica pasado algún tiempo.
Amputación	Acción de cortar y separar enteramente del cuerpo un miembro o porción de él.
Artropatías	Enfermedad de las articulaciones.
Arteriografía	Técnica de visualización de las arterias por diversos métodos, como los rayos X, la resonancia magnética o los ultrasonidos.
Autoclave	Equipo utilizado para someter piezas a vacío y temperatura dentro de un recipiente hermético con el fin de tener una etapa de curado satisfactoria.
Barrenos	Agujero que se hace con la barrena o broca.
Biomecánica	Síntesis entre la biología y la mecánica donde los principios de la mecánica se aplican a sistemas biológicos.
Biomédica	Conjunto de disciplinas como la bioquímica, la biología molecular y celular y genética, que desempeñan un papel fundamental en la medicina actual.
CAD	Diseño Asistido por Computadora (del inglés Computer-Aided Design).

CAM	Manufactura Asistida por Computadora (del inglés Computer-Aided Manufacturing).
Cavidad	Espacio hueco dentro de un cuerpo cualquiera.
Código G	Nombre común y el más utilizado para el lenguaje de programación en control numérico.
Cohesión	Acción y efecto de reunirse o adherirse las cosas entre si o la materia de que están formadas.
Congénita	Que se engendra juntamente con algo.
Corrosión galvánica	Proceso electroquímico en el que se genera desgaste paulatino de los cuerpos por acción de agentes externos, persista o no su forma.
Cuasi isotrópico	Propiedad en la cual no depende de la elección de los ejes, sin importar el lado del que se mida una propiedad o magnitud física siempre va a aproximar a lo mismo.
Curado	Endurecido, seco, fortalecido o curtido.
Desbaste	Estado de cualquier materia que se destina a labrarse, después de que se la ha despojado de las partes más bastas.
Dispersión	Distribución aleatoria de un conjunto de valores o material.
Enfermedad vascular	Esta fundamentalmente causada por la arterioesclerosis, que se produce por un aumento del grosor de la capa interna de las arterias.
Estrés Von mises	Es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión, se calcula a partir de las tenciones principales en un punto de un sólido deformable.

Extirpa	En operación quirúrgica, quitar un órgano o una formación patológica.
Fundición	Proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas donde consiste en fundir un material e introducirlo a una cavidad donde se solidifica.
Geometría ergonómica	Geometría adaptada a las condiciones del usuario, basadas en la comodidad y eficacia.
Homogéneos	De composición y estructura uniformes.
ISO	Organización Internacional de Normalización (del inglés International Organization for Standardization)
Laminado	En materiales compuestos es el conjunto de fibras mezclados con una matriz en alguna orientación específica.
Maquinado	Proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material por arranque de viruta o abrasión.
Material compuesto	Son combinaciones de dos o más materiales diferentes que poseen una interface discreta y reconocible que los separa con el fin de mejorar sus propiedades al ser unidos.
MEF	De las siglas Método de Elemento Finito, es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería con el cual se puede predecir como un objeto real reaccionara a fuerzas, calor, vibración, flujo de fluidos, fenómenos eléctricos y magnéticos, entre otros.
Metrología	Ciencia que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesas y medidas.

Muñón	Parte de un miembro cortado que permanece adherida al cuerpo.
Ortopedista	Especialista en el arte de corregir o de evitar las deformidades del cuerpo humano por medio de ciertos aparatos o ejercicios corporales.
Patología	Conjunto de síntomas de una enfermedad.
Película perforada	Llamada “reléase film” en inglés, es utilizado para despegar fácil la pieza una vez que el proceso de vacío esta completado (hablando de materiales compuestos).
Pie diabético	Aparece cuando existen niveles inadecuados de glucosa en sangre, es una alteración clínica de base etiopatogénica neuropatía cuando se produce lesión y/o ulceración en el pie.
Pilar	En un pie protésico, elemento estructural, de sección poligonal o circular con función de soporte.
Policondensación	Son reacciones químicas en las cuales el polímero final se origina mediante sucesivas uniones entre monómeros, los cuales emiten moléculas condensadas durante el proceso de unión.
Prótesis	Partes artificiales que sustituyen una parte del cuerpo con el propósito de restaurar alguna función.
QFD	Despliegue de funciones de calidad, del inglés (Quality Function Deployment) es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, a características técnicas y operáticas satisfactorias.
Rebaba	Porción de materia sobrante que sobresale irregularmente en los bordes o en la superficie de un objeto cualquiera.

Remache	Es un pedazo pequeño de metal o perno el cual es utilizado para unir dos laminas juntas, no tiene cabeza, es deformado y presionado cuando se utiliza.
Resistencia a torsión	Propiedad mecánica de los materiales a ser girados o rotados.
Rigidez	Cualidad de un material a que no se pueda doblar.
Servo	Sistema electromecánico que amplifica la potencia reguladora.
SFM	Del inglés “Surface Face Milling”, fresado o maquinado en un material a nivel de una superficie o cara.
Socket	Parte de la prótesis en la cual se sienta el muñón.
Transfemoral	Que se sitúa a través de la femur.
Transtibial	Que se sitúa a través de la tibia.

Resumen

El presente trabajo muestra el desarrollo del sistema de moldes progresivos para la fabricación de prótesis transtibiales de material compuesto con el fin de obtener un método de fabricación de prótesis económico para clínicas ortopédicas. Se planteó un diseño de prótesis transtibial innovador en conjunto con la estudiante de doctorado M.C. Miriam Siqueiros Hernández, se evaluaron los requisitos del cliente y se propuso un diseño de molde para fabricar el primer prototipo en madera, posterior se detectaron algunas mejoras y se le añadió la idea de molde progresivo con la cual la fabricación de una nueva prótesis entre paciente 1 y paciente 2 requerirá tan solo fabricar 6 piezas en lugar de 18 piezas que comprenden a un molde nuevo. Se utilizaron sistemas CAD/CAM para la fabricación del proyecto y se probaron los moldes, se realizó un análisis térmico en los moldes para evaluar la etapa de curado y se evaluaron los costos del proyecto para obtener un costo por prótesis donde este va disminuyendo entre mayor sea el número de pacientes. Asimismo, mediante el mecanizado CNC y generación de código G se fabricaron los moldes y se tomaron los tiempo para evaluar los costos del maquinado,

Abstract

In the present work it's shown the development of a progressive mold system for the fabrication of composite transtibial prosthesis with the goal of obtaining an economic prosthesis fabrication method for orthopedic clinics. It is proposed an innovative transtibial prosthesis design in collaboration with the PhD student M.S. Miriam Siqueiros Hernandez, the customer requirements were evaluated and a mold design for the first wood prototype was proposed, after this some improvements were detected and the progressive mold idea was added and with this the fabrication of a prosthesis between patient 1 and patient 2 was only going to need the manufacture of 6 parts instead of 18 parts that integrate a new mold. CAD/CAM systems were used for this project and the molds were tested, a thermic analysis was done to evaluate the curing phase of the composite and a cost analysis was also done to obtain a cost per prosthesis where the price decreases the grater the patient number is. Likewise, through the CNC machining and the G code generation the molds were manufactured and machine time was taken to obtain the process's cost.

Objetivo general y metas

Fabricación de un dispositivo de moldeo considerando todos los componentes del sistema, porta moldes flexibles, estructura de posicionamiento, sistema de vacío y curado, para desarrollo de prótesis transtibial de materiales compuestos.

Las siguientes metas nos permitirán llegar a nuestro objetivo:

- Mencionar los antecedentes en el área de prótesis de miembros inferiores.
- Estudiar la anatomía relacionada con amputaciones miembros inferiores.
- Seleccionar la técnica de moldeo para el material compuesto.
- Indicar el procedimiento de corte para material compuesto en la geometría 3D.
- Generar planos 2D y archivos 3D para la fabricación de prototipos mediante sistema CAM.
- Modelar, simular y programar código para la manufactura de la prótesis.
- Fabricar y hacer pruebas del equipo de moldeo.

Justificación

Tan sólo en 2013 más de 75,000 amputaciones de pie por diabetes se registraron en México en todo el sector Salud, contando con 16.5 millones de diabéticos y de esos 35% lo ignora [1]. Se estima que más de 170 millones de personas sufren de diabetes en el mundo y se espera que este número se duplique para el año 2030 [2].

En México se estima que por cada 100 pacientes diabéticos 14 desarrollarán nefropatía, de 7 a 10 pie diabético y que 30% de ellas terminará en amputación. [3]. En el caso del DIF Nacional tiene un papel importante en la rehabilitación del amputado, pero cuenta con sólo 11 unidades en las delegaciones de algunos estados que fabrican prótesis, pero no tiene el presupuesto adecuado, por lo que sólo fabrican alrededor de 400 prótesis al año. [4]

Hoy en día en México, el paciente termina no utilizando una prótesis sea por costo, peso, incomodidad, etc. Utilizando las distintas investigaciones en esta área se pretende profundizar con fin de aportar un desarrollo innovador que facilite la fabricación y disminuya costos de una prótesis.

Hipótesis

Por medio del diseño, construcción y validación de un sistema de moldeo progresivo y escalable (estandarizado) se logrará fabricar prótesis transtibiales de materiales compuestos de bajo costo para clínicas ortopédicas.

Introducción

El diseño y fabricación de prótesis para seres humanos ha sido una necesidad de todos los tiempos y siempre un requerimiento social dado que las personas de escasos recursos, se les suministran prótesis tardíamente ya sea por la escases y/o los costos. La propuesta del presente proyecto de tesis es la realización de un estudio para el diseño y manufactura de prótesis de las extremidades inferiores con enfoque a prótesis transtibiales a través del diseño de moldes para la fabricación de prótesis en materiales compuestos.

Con este trabajo se pretende fabricar un dispositivo de moldeo considerando todos los componentes del sistema, porta moldes flexibles, estructura de posicionamiento, sistema de vacío y curado, para desarrollo de prótesis transtibial de materiales compuestos. Se pretende diseñar y fabricar un sistema de moldeo progresivo y escalable con el cual se lograra fabricar prótesis transtibiales de materiales compuestos de bajo costo para clínicas ortopédicas. Comenzando por elegir y diseñar un modelo de prótesis transtibial considerando un análisis de despliegue de función de calidad, con él recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce en pasos sucesivos, a características técnicas y operáticas satisfactorias.

Se obtiene el diseño de la prótesis transtibial para fabricar de material compuesto y considerando el análisis QFD se diseña un prototipo de molde el cual se someterá a pruebas para evaluar su viabilidad, con esta prueba se diseñará el segundo prototipo considerando lo aprendido en la primer prueba, a este molde se le aplica la idea de molde escalable con el fin de economizar la fabricación de moldes

Capítulo I

Estado del Arte



1 Estado del Arte

1.1 Causas de Discapacidad

Según la ENIGH de 2012, 6.6% de la población de México reporta tener discapacidad, siendo en su mayoría adultos mayores (51.4 %). Los motivos que producen discapacidad en las personas puede ser variados, pero el INEGI los clasifica en cuatro grupos de causas principales: nacimiento, enfermedad, accidente y edad avanzada (observe Figura 1.1).

De cada 100 personas con discapacidad:

- 39 la tienen porque sufrieron alguna enfermedad.
- 23 están afectador por edad avanzada.
- 16 la adquirieron por herencia, durante el embarazo o al momento de nacer.
- 15 quedaron con lesión a consecuencia de algún accidente.
- 8 debido a otras causas.

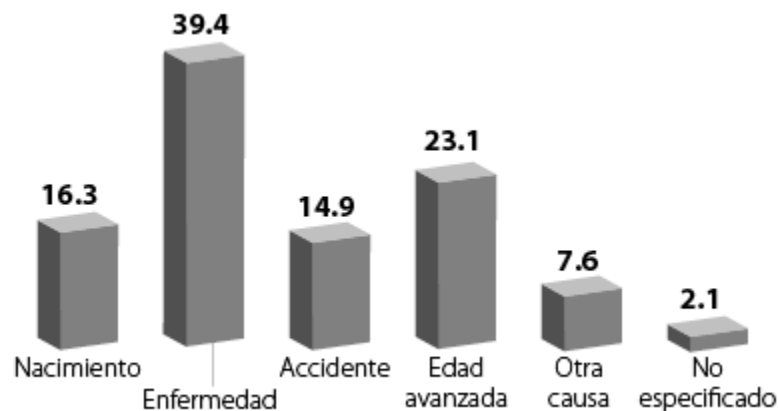


Figura 1.1 Porcentaje de la población con discapacidad según causa de la misma [5]

1.2 Amputaciones

Una amputación es el procedimiento que extirpa parte o la totalidad de un miembro a través de uno o más huesos. Existen tres causas principales por las cuales se lleva a cabo una amputación; enfermedad, trauma o deformación congénita.

Entre las enfermedades que causan amputaciones, el 80% es por problemas vasculares, debido a la circulación insuficiente, ya que al haber una limitación del paso de la sangre arterial hacia la extremidad inferior, se producen úlceras y gangrenas, estas conducen hacia una amputación. En el mundo, se estima que alrededor de 135 millones de personas sufren de diabetes, siendo una causa importante de amputaciones ya que es una enfermedad que disminuye la circulación sanguínea en las extremidades. Esto también puede llevar a la formación de úlceras e infecciones, provocando finalmente una amputación. Asimismo, tumores en huesos, músculos y piel, podrían provocar la pérdida de miembros. [6]

Si es que se desarrolla un tumor en alguna extremidad, es necesario extraerlo para evitar problemas mayores, así como también la expansión del mismo hacia otras partes del cuerpo. La lepra es una enfermedad que disminuye lentamente la sensibilidad en manos y pies, si es que hubiera una herida infectada en estas partes y no se da un tratamiento adecuado, puede también terminar en amputación. Se han realizado investigaciones para obtener datos de edades con más riesgo de sufrir amputaciones, sin embargo, cuando las causas son infecciones, enfermedades o accidentes, es muy relativa la edad y no se pueden tener estadísticas, sólo en caso de diabetes es por lo general en gente pasada los 60 y cuando son por accidentes o traumas, suele presentarse en poblaciones activas.

Existe también la amputación debido a malformación congénita, las amputaciones debido a esta ocupan un porcentaje bajo. En estos casos, puede ser por que los niños nacen con un miembro anormalmente corto, deforme o sin miembro. La amputación depende de que tan grave sea la malformación y en caso de que sea necesaria, se aplica desde ese momento una prótesis en reemplazo del miembro perdido, solo el 3% de las amputaciones son por malformaciones congénitas.

Existen distintos niveles de amputación como se muestra en la Figura 1.2. El nivel de amputación más frecuente es debajo de la rodilla (transtibial). El siguiente es encima de la rodilla (transfemoral).

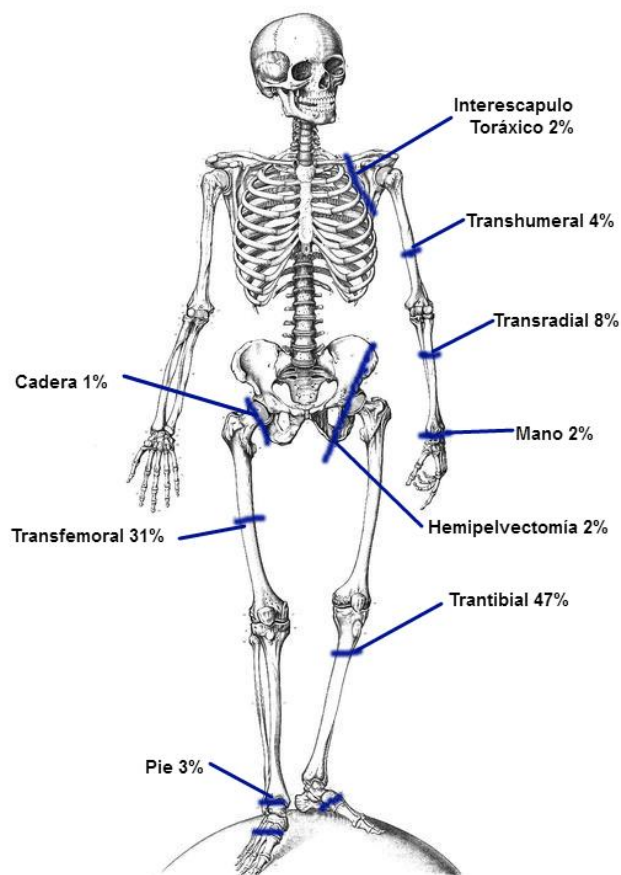


Figura 1.2 Niveles de Amputación [7]

1.2.1 Amputación del miembro inferior por pie diabético

Según reportes del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), 70% de las amputaciones no traumáticas de pie son consecuencia de complicaciones infecciosas por diabetes mellitus. Las cuales son originadas, principalmente por falta o mal control médico de este tipo de enfermedad. Aunque existe un 5% de amputaciones derivadas de accidentes automovilísticos, de trabajo o quemaduras de tercer grado. Mientras que la Secretaría de Salud y Asistencia (SSA) informa que en un año se amputaron 75,000 piernas en México en 2007. [8]

Se define pie diabético a una alteración clínica de base etiopatogénica neuropatía cuando se produce lesión y/o ulceración en el pie, la tercera parte de los diabéticos que ingresan en un hospital lo hacen por artropatías en miembros inferiores, cuando se les descubre la enfermedad, el 10% tienen instaurada enfermedad vascular. El diabético es 5 veces más propenso a lesiones isquémicas en los pies, casi el 70% de las amputaciones que se realizan son en diabéticos.

Cuando el riego sanguíneo hacia los pies no es suficiente, la situación empeora aún más. Pies sanos necesitan el oxígeno y los nutrientes esenciales que aporta la sangre. En personas con diabetes, el riego a veces no es adecuado, y esto hace que las heridas tarden más en curar. Cuando el riego sanguíneo se ve gravemente disminuido, el pie corre un alto riesgo de que se dañen sus tejidos y algunas partes del pie se podrían ver amenazadas. [9]

1.3 Antecedentes de Prótesis

La historia de las prótesis se remonta a la antigüedad ya que la amputación es un tema que ha acompañado al hombre durante toda su existencia. En las primeras culturas las prótesis no eran más que simples muletas o copas de madera y cuero que protegían al muñón. Poco a poco estas prótesis se fueron modificando para tener un mayor rango de movimiento y darle más libertad a la persona.

La utilización de prótesis está relacionada con el número de discapacitados alrededor del mundo y éstas se han ido mostrando desde las prótesis de madera en el siglo XVI hasta las prótesis de varios grados de libertad que se tienen actualmente. Las prótesis son elementos que suplantarían o proveerían una parte del cuerpo que falta por diversos motivos, estas bien podrían tener una función sobre este espacio, pero también pueden estar en estos sitios por mera apariencia, así el usuario puede insertarse en la sociedad sin tener mucho temor a los demás por su incapacidad. De los tipos de prótesis tenemos que pueden ser desde miembros artificiales, prótesis auditiva, ocular, maxilofacial, sexual o dental, entre otras.

La fabricación de prótesis de miembro inferior ha ido variando con el tiempo, en función del descubrimiento de nuevos materiales, más resistentes, más livianos y más simples de manipular

para la elaboración de la prótesis lo cual contribuye a una mayor eficiencia de la misma y comodidad para el paciente. [10]

Otra etapa donde se desarrolló notablemente el área de prótesis e implantes en el ser humano fue en la guerra civil estadounidense, a medida que se desarrollaba la guerra, la cantidad de amputados incrementaba en forma astronómica, lo que obligó a los estadounidenses a ingresar en el campo de la protésica. [11]

En México existen registros de algunas fábricas que ya se dedicaban a la manufactura de prótesis desde 1924, pero fue hasta inicios de la década de los 40's cuando empezó una etapa en la que diversos grupos clínicos motivaron y patrocinaron la creación de los primeros talleres dedicados al diseño, fabricación y adaptación de sistemas prostéticos. En ellos se utilizaban como principales materiales la madera y el aluminio.

1.4 Trabajos de investigación previos

La biomecánica es una disciplina científica que tiene por objeto el estudio de las estructuras de carácter mecánico que existen en los seres vivos, fundamentalmente del cuerpo humano. Esta área de conocimiento se apoya en diversas ciencias biomédicas, utilizando los conocimientos de la Mecánica, la Ingeniería, la Anatomía, la Fisiología y otras disciplinas, para estudiar el comportamiento del cuerpo humano y resolver los problemas derivados de las diversas condiciones a las que puede verse sometido.

Actualmente muchas universidades y ciertos departamentos especializados evalúan las patologías que aquejan al hombre para generar soluciones capaces de analizarlas, repararlas o paliarlas. A continuación se resumen diversos trabajos que están dentro de esta línea de investigación.

- El propósito de éste trabajo era desarrollar una herramienta que proveería estimados cuantitativos de la interfaz de partes prostéticas y la presión que ejercen sobre el paciente

para mejorar el entendimiento del contacto entre muñón/socket y el ajuste entre ellos. Como resultado de este estudio se realizaron mediciones en áreas de carga de tres pacientes durante diferentes facetas o posiciones, una muestra significativa de la presión medida en el interfaz de muñón/socket del paciente son representadas en la Figura 1.3, en cada uno de los casos el caso de mayor presión depende del diseño de socket y la alineación de éste [12].

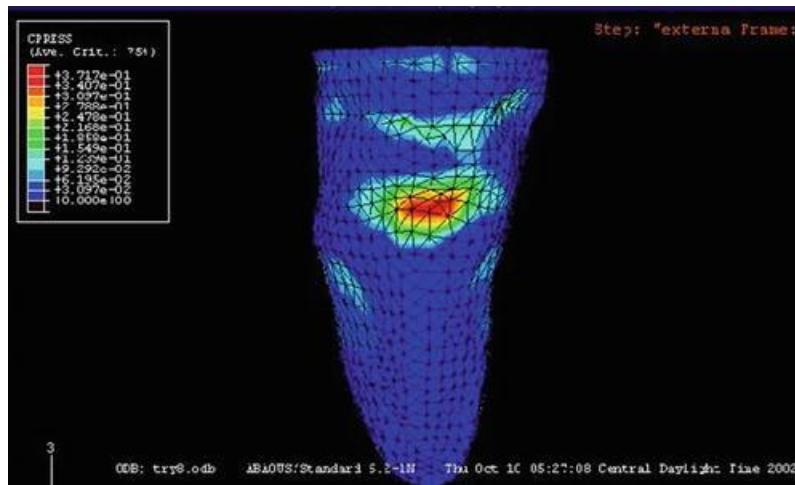


Figura 1.3 Análisis de elemento finito realizado por Silver en 1997

- En la presente investigación se realizaron pruebas estructurales en distintos sockets para prótesis transtibiales de materiales compuestos, para realizar éste estudio, los valores de cargas y métodos que fueron desarrollados emulaban a estándares de la Organización Internacional de Normalización (ISO), la cual establece estándares para pruebas estructurales de prótesis de miembros inferiores pero no contaba con una en específico para la parte del socket de la prótesis [13].

La prueba experimental simulaba la instancia máxima de carga durante la última fase de apoyo de la marcha, diez sockets transtibiales fueron evaluados, cinco diferentes materiales de refuerzo y dos tipos de resina con la cual se construyeron los sockets. Se utilizó un complemento de cuatro barrenos distanciados entre sí para montarse sobre la placa que se utiliza para conectar el socket y el pilar. Cada muestra fue sometida a su

carga última en una máquina de prueba que funcionaba a base de servo e hidráulicos a 10 N/s.

Como resultado de este trabajo se obtuvo que ninguno de los compuestos sometidos a prueba cumplieron con el estándar ISO 10328 en su nivel A100, condición II (4025 N) como se requería para otros componentes prostéticos. Lo destacan los que trabajaron con esto mencionan que fue la diferencia estadística entre compuestos en cuanto a su tipo de resina o matriz utilizada.

- En el desarrollo de este artículo se pretendía probar una prótesis transtibial de bajo costo desarrollada por Saito et al. (Modern Plastics 1997; 74:175-7) la cual estaba hecha de fibra reforzada con plástico. La prótesis está comprendida de un pilar de aluminio, una cubierta cosmética y una sección transversal de un pie fabricado de compuesto sujeto al aluminio. Se probó una réplica de esta prótesis con utilizando el estándar ISO 10328, la experimentación falló catastróficamente a menos de 6600 N de fuerza. Como comparación del análisis numérico realizado en elemento finito se obtuvo una variación de 18.6%, considerando que no es tanta la variación entre estas dos pruebas [14].
- Aparatos prostéticos pueden almacenar y volver energía durante la fase de marcha para intensificar la funcionalidad del miembro inferior del amputado. El proceso de selección de aparatos de ajuste es complicado, en parte debido a la confusa teoría del tema. Este trabajo examina el moderno “almacenamiento de energía” de aparatos prostéticos a través de conceptos de energía, una recomendación por una nomenclatura revisada y técnicamente consistente [15].
- El propósito de esta investigación fue cuantificar fuerza estructural entre varios aditamentos sistemas pilar-socket incorporados en prótesis transtibiales de materiales compuestos, entre los cuales cinco sistemas fueron probados; dos de ellos fueron fabricados por laminados de una sola etapa y los otros tres hechos de laminados de doble etapa, estas prótesis fueron compradas de catálogo de Ossur, Ohio, PDI y SPS [16].

Como resultado de este trabajo se coincidió que ambas prótesis fabricadas de laminados simples fallaron en la parte del pilar, mientras que las de laminado doble fallaron la unión de pilar-socket, las tres resultaron con los sujetadores (tornillos) jalándose y extrayéndose del socket.

- Las prótesis con fibra de carbono permiten almacenar energía durante la primer fase de marcha y durante su última fase, es por ello que la manufactura de dichas prótesis se volvió tan famoso pero al mismo tiempo deben de cumplir con los estándares de calidad como lo estipula la norma ISO 10328 la cual consiste en tres tipos de pruebas; prueba estática con carga de 1610 N en la parte del ante pié y del tacón y debe soportar una carga ultima de 2415 N. La segunda prueba es una carga cíclica a 1330 N por $2 \cdot 10^6$ ciclos y por ultimo una prueba estática de torsión a 50 Nm. Por lo tanto en este trabajo se propuso una prótesis de pie y se sometió a estas pruebas (ver propuesta de prótesis en Figura 1.4) teniendo como resultados pruebas exitosas de acuerdo con la norma mencionada anteriormente [17].



Figura 1.4 Propuesta de prótesis de pie del Politécnico de Milán (2009)

- [18] Alto vacío es una tecnología muy prometedora en el área de prótesis, se ha visto que existen muchos beneficios por el lado del ajuste del socket al muñón del paciente, sin embargo existen muy poca información e investigaciones con el efecto de beneficiar la

funcionalidad con el paciente. Este único reporte de caso documenta los efectos en un paciente de usar una prótesis fabricada en alto vacío y usar una fabricada con molde.

El paciente había experimentado una amputación transtibial a sus 16 años de edad, tras utilizar un socket moldeado por varios años se le pidió que utilizara una nueva, en este caso era moldeada con alto vacío como se observa en la Figura 1.5, el paciente fue interrogado tras 1 semana, 1 mes y 1 año de uso, tras una semana el paciente mostró una mejora en la condición de su piel y expresó un incremento de confianza en tareas difíciles, tras un mes de uso; el paciente ya no experimentaba dolor y mostró mejora en su simetría de ciclo de marcha, tras un año; el paciente mostró mucho mejoramiento en su ciclo de marcha y balance, así como la habilidad de utilizar su prótesis cómodamente las 24 horas del día.



Figura 1.5 Prótesis con socket moldeado al alto vacío de Sutton y Hoskins (2011)

- Este trabajo realizado por un grupo de alumnos de posgrado de la Universidad de Arkansas [19], los cuales realizaron análisis, prueba y diseño de un pie protésico de bajo

costo, el que permitiría al paciente con amputación de miembro inferior que no podía pagar una prótesis de alta tecnología para recobrar la perdida de movilidad.

El prototipo (visto en Figura 1.6) fue sometido a pruebas de acuerdo a la norma ISO 10328, el diseño fue concebido utilizando metales de resorte en la parte del tacón y los puntos de contacto de los dedos.



Figura 1.6 Pie protético diseñado por estudiantes de la Universidad de Arkansas (2012)

- Este trabajo realizado por investigadores de la Universidad de Putra Malaysia en el que explican como la parte del socket de una prótesis de un paciente amputado debe de ser constantemente cambiada por el paciente debido a cambios corporales del paciente conforme pasan los años, el cambio constante y ajuste representan un gasto grande para el paciente. El trabajo hace un énfasis en una propuesta de cambio de material para el socket de la prótesis, la cual es reemplazada por un compuesto natural [20].

Los resultados de este trabajo son basados en la compatibilidad de las propiedades de materiales existentes y materiales propuestos los cuales nos encaminan a una alternativa más eficiente económicamente, amigable con el ecosistema y sin alterar las características necesarias para un miembro artificial.

- [21] En este artículo, los autores nos hablan del análisis por elemento finito realizado a una prótesis de pie de un diseño propuesto por investigadores de la Universidad de Heriot

Watt (ver Figura 1.7), las cuales fueron analizadas siendo de titanio grado 5 y acero inoxidable 302, asumiendo condiciones de frontera y cargas apropiadas. Se realizaron dos análisis de elemento finito; el estático en postura de pie y un análisis dinámico en una situación de salto.

Los resultados obtenidos muestran que el impacto de carga al momento del salto es el más dominante, siendo este donde ambos materiales suportaron la carga estática y un estrés Von mises mínimo. Por otro lado en el análisis de Von Mises de un impacto da carga dinámica el cual alcanzó 590.8 MPa para la pieza de titanio y 831.6 MPa para la de acero inoxidable, los valores obtenidos están por encima del esfuerzo máximo del material y causarían una falla.

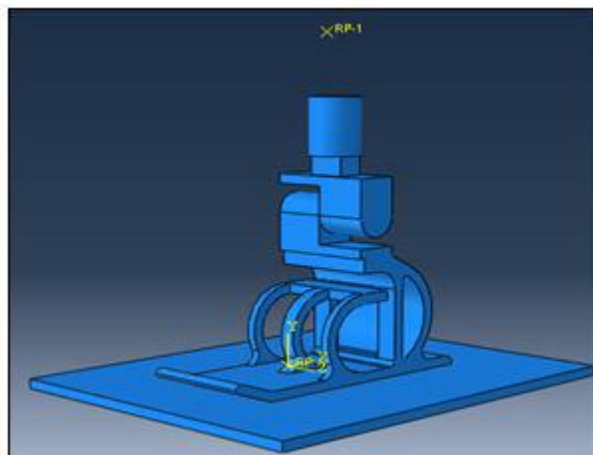


Figura 1.7 Ensamble de miembro inferior propuesto analizado por Ghaith (2012)

- En esta publicación, investigadores de la UNAM, nos muestran como mediante el método de correlación de imágenes digitales es posible evaluar una prótesis sin necesidad de instrumentarla o modificarla. La técnica de correlación de imágenes ha sido útil en diversas aplicaciones, pero ha sido poco explorada en el ambiente de las prótesis. En este trabajo se presentó una técnica capaz de medir la deformación real en sistemas protésicos de pacientes amputados, bajo condiciones de carga y postura reales. Además vieron las principales zonas de deformación de un sistema protésico, con la ventaja de

que la evaluación se pueden llevar a cabo aplicando cargas y posturas reales de un paciente en un análisis dinámico [22].

- En este estudio comparan la actividad general de pacientes con prótesis transtibial durante una semana utilizando un dispositivo llamado ActivPal™ el cual monitorea detalladamente la actividad del paciente. Se utilizó este dispositivo con 24 pacientes que utilizaron una prótesis transtibial con socket del tipo cojinete tendón rotuliano (PTB) y otros 24 pacientes que utilizaron una prótesis transtibial con socket del tipo tomas de rodamiento de superficie total (TSB) como se ven en la Figura 1.8, las mediciones de este seguimiento arrojaron; 9130 pasos diarios en promedio de los pacientes con socket PTB y 7383 pasos diarios en promedio de los pacientes con socket TSB. Los resultados que arrojaron indicaban que ambos grupos de pacientes eran activos durante el día, caminando alrededor de 8000 pasos en promedio [23].

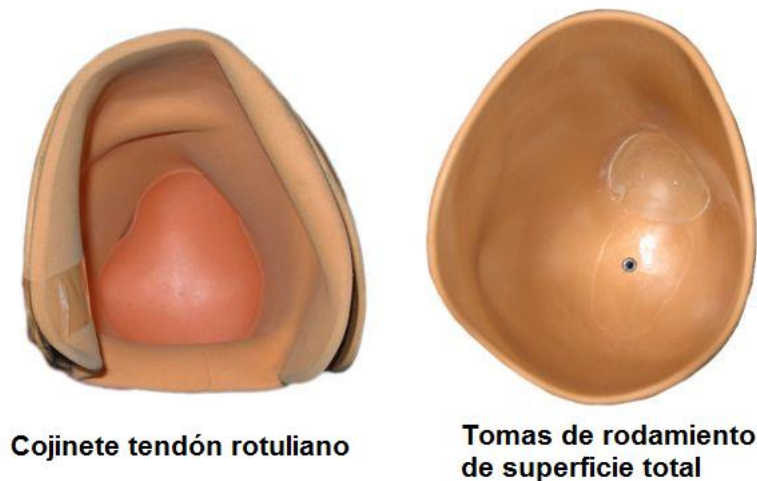


Figura 1.8 Sockets utilizados en trabajo de Action Medical (2014)

La información recopilada en el estado del arte sirva para ver qué tan cerca está de la realidad el proyecto, así como para generar varias ideas de todo lo que contiene una prótesis y conocer los distintos métodos de fabricación y sus materiales; desde teoría, localización de

puntos críticos y resultados a los que hay que llegar. En Tabla 1.1 la se muestra un resumen de los diferentes estudios realizados en esta línea de investigación mencionados anteriormente.

Tabla 1.1 Resumen del estado del arte

Año	Autor(es)	Material	Innovación
1997	T. Silver	Material compuesto	Análisis elemento finito entre socket-muñón genérico para saber área que ejerce mayor presión
1999	A. Current, F. Kogler, G. Barth	Material compuesto	Análisis elemento finito en prótesis transtibial bajo la norma ISO 10328
2000	J. Hanl, M. Taya	Plástico y aluminio	Diseño propio probado con análisis de elemento finito y con la norma ISO 10328
2002	A. Hafner, J. Brian	Material compuesto	Analiza el almacenamiento de energía en una prótesis durante el ciclo de marcha humano
2007	R. Graebner, T. Current	Material compuesto	Análisis estructural a cinco prótesis comerciales de fabricantes diferentes
2009	D. Bonacini, B. Mangiante, L. Vergani, C. Colombo	Material compuesto	Diseño propio al cual le hacen las pruebas que indica la norma ISO 10328 (tensión, compresión, fatiga y torsión)
2011	E. Sutton, R. Hoskins, T. Fosnight	Plástico y aluminio	Análisis en paciente con prótesis de socket moldeado y socket manufacturado al alto vacío
2012	N. Galuska, A. Buchta, A. Long, S.	Acero	Diseño propio con materiales de bajo costo y sus pruebas bajo

	Weindel		la norma ISO 10328
2012	R. Che Me, R. Ibrahim, P. Tahir	Material compuesto (fibras naturales)	Estudio de fibras naturales para sustituir a la fibra de carbono en prótesis y disminuir su precio
2012	F. Ghaith, F. Khan	Titanio grado 5 y acero inoxidable 302	Diseño propio al cual le hacen pruebas elemento finito
2013	A. Hernandez, A. Alvarez, M. Sanchez	Material compuesto	Evaluación de prótesis utilizando método de correlación de imágenes digitales para ver su deformación
2014	A. Buis, T. Dumbleton, D. Murray, B. McHugh	N/A	Comparación de pacientes en sus actividades diarias con socket tipo PTB y TSB utilizando el dispositivo ActivPal™

1.5 Prótesis Modernas

Los dispositivos actuales son mucho más livianos, se elaboran con plástico, aluminio y materiales compuestos para proporcionar a los amputados dispositivos más funcionales. Además de ser dispositivos más livianos y estar hechos a la medida del paciente, el advenimiento de los microprocesadores, los chips informáticos y la robótica en los dispositivos actuales permitieron que los amputados recuperen el estilo de vida al que estaban acostumbrados, en lugar de simplemente proporcionarles una funcionalidad básica o un aspecto más agradable. Las prótesis son más reales con fundas de silicona y pueden imitar la función de una extremidad natural hoy más que nunca. [11]

1.6 Prótesis Transtibiales

Las prótesis son aquel reemplazo total o parcial de una parte del cuerpo por un objeto artificial similar ya sea por perdida por una amputación o que no exista. En el caso de las prótesis de miembro inferior se clasifican según su nivel de amputación, material constitutivo y características estructurales. [24]

- Según su nivel de amputación
 - Hemipelvectomia
 - Prótesis arriba de rodilla (transfemoral)
 - Prótesis bajo la rodilla (transtibial)
 - Desarticulados (cadera, rodilla, tobillo)
 - Amputaciones parciales de pie
- Según su material constitutivo
 - Convencionales
 - Modulares
- Según características estructurales
 - Endoprótesis (prótesis articulares: rodilla, cadera)
 - Exoprótesis (prótesis de miembros: superiores, inferiores)

Anteriormente las prótesis transtibiales eran por mero uso estético, sin embargo, hoy en día las prótesis transtibiales son las más utilizadas por gran parte de la sociedad con tales problemas, sin distinción de clases, etnias, inteligencia ni nacionalidad.

La decisión de amputar debe ser dictada por consideraciones sencillas y evidentes. La necesidad de amputar se establecerá cuando haya una infección incontrolada, dolor, una neuropatía irreversible, etc.

Para determinar el nivel de amputación el primer requisito es un cuidadoso examen físico, la apariencia del tejido, la temperatura de la piel, la presencia o ausencia de edema, la agudeza de la sensación del nivel. Son muy útiles la arteriografía, la pletismografía, la

termografía y otros procedimientos objetivos como la cartografía de la piel con fluorescencia arterial. [25]

Mostrando un ejemplo de amputación (ver Figura 1.9) donde el nivel de amputación es de 9 a 13 cm por debajo de la rodilla, es decir un muñón corto por debajo de la rodilla. Normalmente, usamos colgajos de piel largos por detrás y cortos por delante.

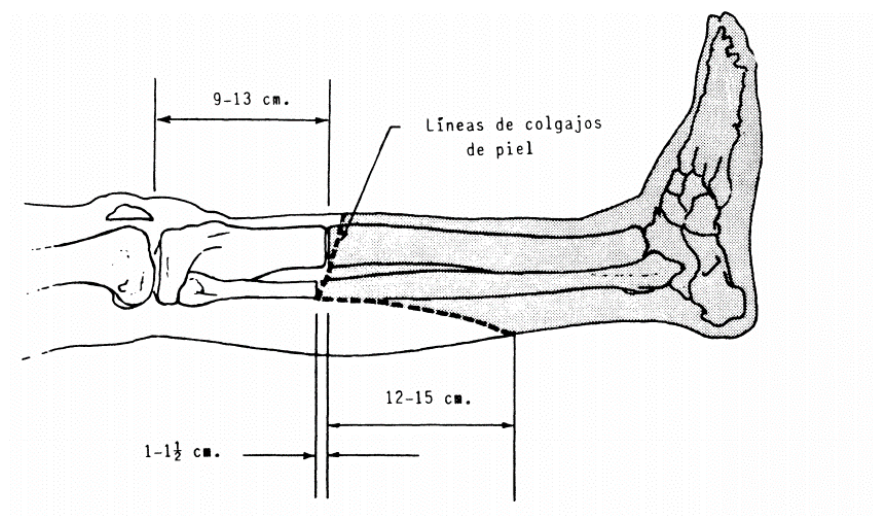


Figura 1.9 Nivel de amputación y modelado de los colgajos de piel [25]

Después se acerca la piel y se cierra sin sutura subcutánea (observar Figura 1.10). Se contornean moderadamente las orejas de perros mediales y laterales. No deben llevarse hacia atrás demasiado, pues pueden estorbar a la circulación de la piel.

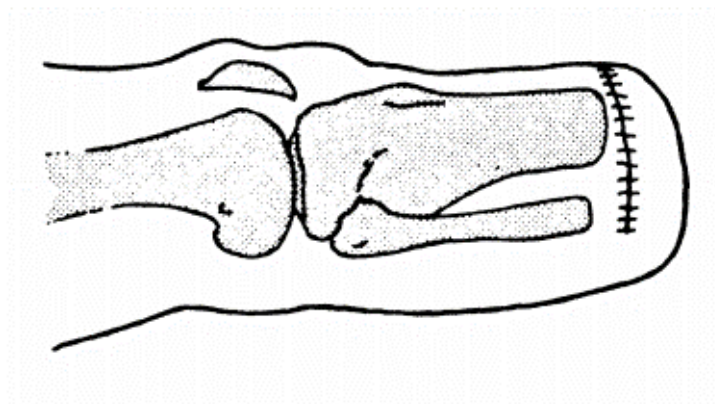


Figura 1.10 Colgajo de piel suturado anteriormente a nivel de tibia [25]

1.6.1 Componentes de prótesis transtibial

Los tipos de prótesis pueden ser clasificados en tres categorías, pasivas; cuyos elementos y funcionamiento se describe mediante instrumentos mecánicos, semi-activas; que presentan mecanismos que se adaptan a la marcha del paciente y activas; que son totalmente automatizadas y poseen un control propio.

Las prótesis de miembro inferior constan de 5 secciones; suspensión, socket, rodilla, pilar y pie (ver Figura 1.11).

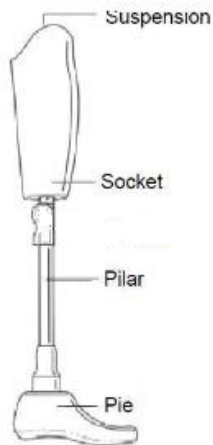


Figura 1.11 Componentes de prótesis transtibial [26]

Existen distintos materiales para fabricar cada uno de estos componentes, así como métodos para fabricarlos. La suspensión también conocida como “liner” puede ser de uretano, silicón o algún gel y está en contacto directo con la piel o muñón y su función es disminuir el desgaste, así como aportar comodidad al utilizar la prótesis y asegurar la prótesis al cuerpo del paciente. Por lo general este toma la forma del muñón mediante alguna técnica de moldeo. El socket es aquel en el cual se apoya el miembro inferior y la prótesis, es utilizado para contener el muñón y transferir el peso del cuerpo con el resto de la prótesis, también puede contener revestimientos para actuar como relleno para brindar mayor comodidad. [27]

El pilar es usado para transferir el peso del cuerpo, este debe tener la altura ajustada al paciente. Depende del diseño y del método de fabricación el material del cual estará hecho el pilar, comúnmente son de aluminio. Por último el pie es el que brinda el soporte y transfiere el peso al suelo, regularmente tiene la forma o geometría de un pie humano para encajar con un zapato.

1.7 Manufactura de prótesis

Existen diversos métodos para manufacturar prótesis, entre ellos está la fundición, doblado utilizando matriz y punzón utilizando una dobladora, el maquinado, moldeo por inyección en el caso de ser prótesis de materiales compuestos, entre otros. Cada uno de estos métodos implica toda una metodología, un tiempo de maquinado y un costo distinto. Las prótesis han sido elaboradas con materiales tradicionales como la madera, acero y cuero, así como los materiales aeroespaciales como el titanio, plásticos y fibra de carbono. La fibra de carbono se utiliza para crear delgadas, ligeras y resistentes prótesis de respuesta dinámica, su desventaja de esta radica en el elevado precio de los materiales realizados en fibra de carbono debido a que la fibra es un polímero sintético que requiere un caro y largo proceso de producción. Este proceso se realiza a alta temperatura entre 1100 °C y 2500 °C en atmósfera de hidrógeno durante semanas o incluso meses dependiendo de la calidad que se desee obtener ya que pueden realizarse procesos para mejorar algunas de sus características una vez obtenida la fibra.

1.8 Planteamiento del problema

El diseño y fabricación de prótesis para seres humanos ha sido una necesidad de todos los tiempos y siempre un requerimiento social dado que las personas de escasos recursos, se les suministran prótesis tardíamente ya sea por la escasez y/o los costos, se puede asegurar que el diseño y fabricación de prótesis está circunscrita a un grupo de empresas especializadas generalmente extranjeras.

La propuesta del presente proyecto de tesis es la realización de un estudio para el diseño y manufactura de prótesis de las extremidades inferiores con enfoque a prótesis transtibiales a través del diseño de moldes para la fabricación de prótesis en materiales compuestos, la tecnología de diseño de moldes deberá soportarse en una base de datos que considere información ergonómica de la población en estudio, género, edad, actividad laboral. Metodología de fabricación automatizada bajo el concepto de maquinado de superficies en alta velocidad y utilizando material compuesto mediante cortes en geometría ergonómica.

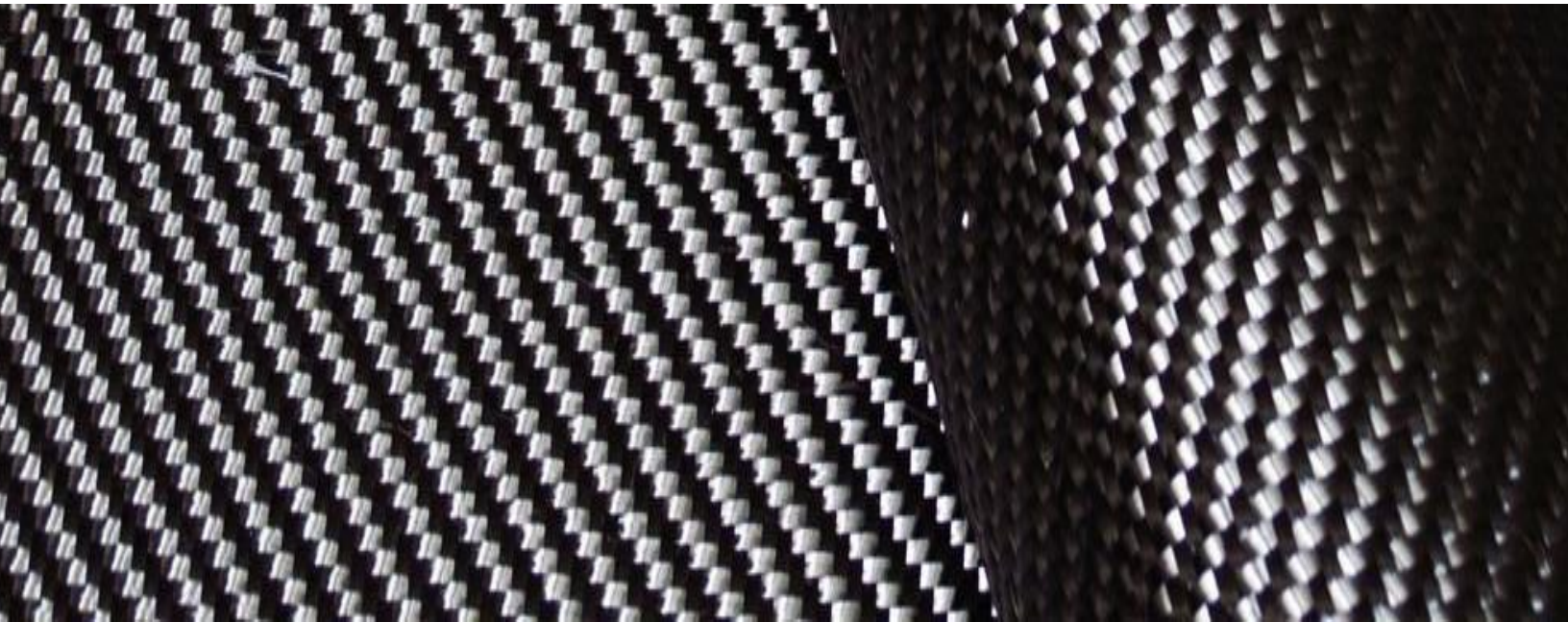
1.9 Sumario

En este capítulo se abordan diversos avances en el diseño y funcionalidad de las prótesis protésicas a través del tiempo. Hablamos de antecedentes de prótesis en la humanidad. Se mencionan las causas principales de discapacidad y de amputaciones enfocándonos en la amputación de miembro inferior por pie diabético. En la segunda parte de este capítulo se habla de las prótesis modernas, las cuales ya involucran procesos de fabricación complejos, micro procesadores, chips informativos y robóticos, así como materiales especiales como materiales compuestos, aleaciones especiales, etc.

Las prótesis transtibiales y sus componentes también son mencionados, así como el uso e importancia de cada uno. Finalmente se hizo una recopilación de los trabajos de investigación más representativos realizados en los últimos 20 años en el área de biomecánica enfocada en esta línea de investigación, destacando los materiales de cada diseño de prótesis transtibial y la innovación que trajo cada una de estas investigaciones.

Capítulo II

Generalidades



2 Generalidades

2.1 Materiales Compuestos

Los compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para obtener una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera. Los compuestos se pueden seleccionar para alcanzar combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. Los compuestos pueden clasificarse en tres categorías: con partículas, con fibras y laminares, dependiendo de la forma de los materiales. La gran mayoría de los materiales compuestos son creados artificialmente pero algunos, como la madera y el hueso, aparecen en la naturaleza. [28]

Aunque existe una gran variedad de materiales compuestos, en todos se pueden distinguir las siguientes partes:

- Agente reforzante: es una fase de carácter discreto y su geometría es fundamental a la hora de definir las propiedades mecánicas del material.
- Fase matriz: tiene carácter continuo y es la responsable de las propiedades físicas y químicas. Transmite los esfuerzos al agente reforzante. También lo protege y da cohesión al material.

Los materiales compuestos se pueden dividir en:

- Reforzados con partículas
- Endurecidos por dispersión
- Reforzados con fibras
- Laminares o Estratificados

2.1.1 Materiales compuestos reforzados con partículas

Estos están diseñados para producir combinaciones poco comunes y no para mejorar la resistencia. Los compuestos reforzados con partículas contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no bloquean de manera eficiente la mezcla refractaria. Son diseñados para obtener combinaciones de propiedades poco usuales como las fibras y generalmente su presencia no es tan efectiva en el incremento de la resistencia de la matriz.

Ejemplos:

- Carburos cementados: Los insertos de carburo de tungsteno que se usan para herramientas de corte en operaciones de maquinado son comunes de este grupo, ya que es un material cerámico duro y para mejorar su tenacidad se combinan con polvo de cobalto.
- Abrasivos: Los discos para rectificado y corte se elaboran partiendo de la alúmina, del carburo de silicio y del nitruro de boro cubico, para obtener tenacidad las partículas se unen mediante una matriz polimérica.
- Contactos Eléctricos: estos deben tener una buena combinación de resistencia al desgaste y conductividad eléctrica, la plata reforzada con tungsteno proporciona estas características.

2.1.2 Materiales compuestos endurecidos por dispersión

El tamaño de la partícula es muy pequeño (diámetro entre 10 a 250 nm). A temperaturas normales, estos compuestos no resultan más resistentes que las aleaciones, pero su resistencia disminuye con el aumento de la temperatura. Su resistencia a la termofluencia es superior a la de los metales y aleaciones. Aunque no sean coherentes con la matriz, bloquean el movimiento en las dislocaciones y provocan un endurecimiento del material matriz.

Sus principales propiedades son:

- La fase es generalmente un óxido duro y estable
- El agente debe tener propiedades físicas óptimas
- No deben reaccionar químicamente el agente y la fase
- Deben unirse correctamente los materiales

Ejemplos:

- Óxido de berilio: tiene una conductividad térmica más alta que cualquier no metal, excepto el diamante y es usado en reactores aeroespaciales y nucleares.
- Zylon: se considera la fibra con más alta resistencia a la tensión, es usada en coches de carreras fórmula 1, así como en componentes de motores turborreactores.

2.1.3 Materiales compuestos reforzados con fibras

La mayoría de los compuestos reforzados con fibra consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La resistencia del compuesto puede resultar alta a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas.

Las fibras son las responsables de las propiedades mecánicas, sirven para resistir los esfuerzos normales. Las fibras pueden ser continuas, largas o cortas, en un intervalo de 5 mm a 25 mm de longitud, en cuanto a su disposición pueden ser paralelas, unidireccionales o bidireccionales, en forma de tejido o aleatoriamente orientadas.

La matriz es el responsable de las propiedades físicas y químicas, transmite las cargas a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la carga aplicada.

Ejemplos:

- Fibra de carbono: constituida por finos filamentos de 5-10 μm de diámetro y compuesto principalmente de carbono. Tiene propiedades mecánicas similares al acero y es tan ligera como la madera o el plástico. Tiene una amplia variedad de aplicaciones industriales como en la fabricación de bicicletas, coches e incluso en aviones, sustituyendo aleaciones metálicas.
- Fibra de vidrio: es un material que consiste en numerosos y extremadamente finas fibras de vidrio, son útiles aislantes térmicos debido a su alta proporción de superficie respecto al peso. Es utilizada en albercas y carrocerías.

- Kevlar: es una poliamida sintetizada, la cual sus fibras consisten en largas cadenas de poliparafenileno tereftalamida, molécula que soporta altas temperaturas, siendo 5 veces más resistente que el acero y no es afectada por la corrosión, actualmente se utiliza para reforzar prendas textiles de montaña por su gran capacidad y resistencia. [29]

2.1.4 Materiales compuestos laminares

Los compuestos laminares comprenden recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, chapados bimetálicos, laminados y todo un conjunto de otras aplicaciones. Además, también es posible considerar como parcialmente laminares a los compuestos reforzados con fibra producidos en forma de cintas o de tejidos. Muchos de ellos estarán realizados con el fin de mejorar la resistencia a la corrosión, a la vez que mantienen un bajo costo, una elevada resistencia o un peso ligero. Otras características importantes son una resistencia superior al desgaste o a la abrasión, una mejor apariencia y una expansión térmica fuera de lo común. [30]

Ejemplos:

- Madera Contrachapada: también conocida como multilaminado o triplay, consiste de un tablero elaborado con finas chapas de madera pegadas con fibras transversalmente una sobre otra con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor. Son usadas en la mayoría de construcciones.
- Aluminio-aramida: conocido como el ARALL (por sus siglas en inglés) es un compuesto revestido en el cual se une aluminio comercialmente puro con aleaciones de aluminio de más alta resistencia, el aluminio puro protege contra la corrosión a la aleación de mayor resistencia, es utilizado en construcción de aeronaves, intercambiadores de calor y tanques de almacenamiento.

2.2 Técnicas de Moldeo

Una parte de primera importancia de la fabricación es impartir una forma a un objeto y la función de algún material para alcanzar una geometría o forma final. En el moldeo, se funde un sólido, se calienta hasta una temperatura convenientemente y se trata para conferirle una determinada composición química. La materia fundida, metálica generalmente se vacía en una

cavidad, o molde, cuya forma adquiere durante la solidificación. Así en una operación única, es posible obtener formas sencillas o complicadas de cualquier metal que sea fundible, pudiendo tener el producto resultante prácticamente cualquier configuración predeterminada por el diseñador al objeto de dotarlo de la mejor resistencia a las tensiones de servicio, con unas propiedades direccionales mínimas y habitualmente un aspecto agradable.

En todos los procesos de moldeo intervienen seis factores fundamentales. Estos son:

1. Construcción del molde, a base de una cavidad de la forma deseada provista sobre medidas que impone la contracción del metal a solidificarse.
2. Instalación adecuada para fundir el metal que ha de colarse; no sólo que produzca una temperatura suficiente, sino que trabaje con buena calidad y bajo coste.
3. El metal licuado debe introducirse en el molde de manera tal que escape todo el aire y los gases contenidos en el molde, este debe llenarse completamente para que la pieza resultante sea compacta.
4. Debe preverse lo necesario para que el molde no oponga demasiada resistencia a la contracción que acompaña al enfriamiento subsiguiente a la solidificación del metal. De lo contrario la pieza se agrietará y su resistencia será baja.
5. Retirar pieza del molde. Cuando la fundición se hace en moldes de materiales como arena, los cuales se rompen y destruyen tras cada colada, este punto no presenta dificultades graves.
6. Retirado el molde, puede que sean necesarias operaciones de acabado al objeto de eliminar porciones adheridas a la pieza.

Actualmente existen siete procesos de fundición fundamentales, que son: en arena, en concha, en molde durable, por inyección, por centrifugación, en molde de yeso y a la cera perdida. [31]

La desventaja económica de cualquiera de los procesos con molde desechable es que se requiere uno nuevo para cada fundido. En la fundición con molde permanente, el molde se reutiliza varias veces.

2.2.1 Moldeo en arena

En este proceso los granos de arena, mezclados con pequeñas cantidades de otros materiales para ganar moldeabilidad y cohesión, se apisonan en torno a un modelo que tiene la forma a producir. Cada pieza requiere construir un molde nuevo, este debe constar de al menos dos partes, la superior; donde se coloca el bebedero, que atraviesa la arena y se conecta a la cavidad mediante un sistema de conductos. El metal fundido se vacía en el agujero de colada y penetra en la cavidad a través del canal y un orificio llamado compuerta, el cual gradúa el caudal del fluido. Como se ilustra en la Figura 2.1. La fundición en arena es el proceso que se usa con más amplitud, casi todas las aleaciones de fundición pueden fundirse con arena.

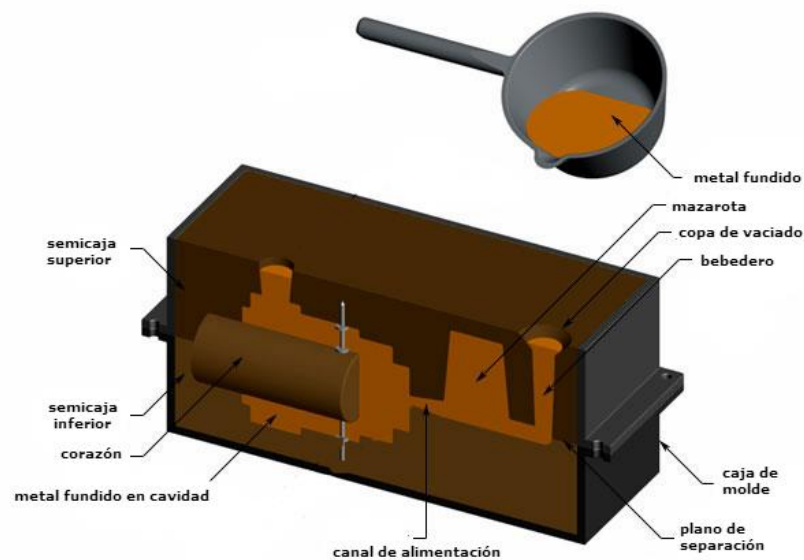


Figura 2.1 Molde de Arena Cerrado

2.2.2 Moldeo en concha

El moldeo en cascarón o concha es un proceso de fundición en el que el molde es un cascarón delgado hecho de arena y que se mantiene cohesionado por medio de un aglutinante de reina termofija.

Este proceso tiene muchas ventajas, la superficie de la cavidad de un molde en un cascarón es más suave que la del molde convencional de arena verde y dicha suavidad permite un flujo más fácil durante el vertido del metal líquido y una mejora de acabado en la pieza final. Las desventajas del moldeo en cascarón incluyen un modelo de metal más caro que el correspondiente al moldeo con arena verde, esto hace que el moldeo con concha sea difícil de justificar para cantidades pequeñas de piezas, pero puede maquinarse para la producción masiva y es económico para cantidades grandes. Algunos ejemplos de piezas fabricadas con el empleo de moldeo con concha incluyen engranajes, cuerpos de válvulas, boquillas y árboles de levas como se observa en la Figura 2.2. [32]

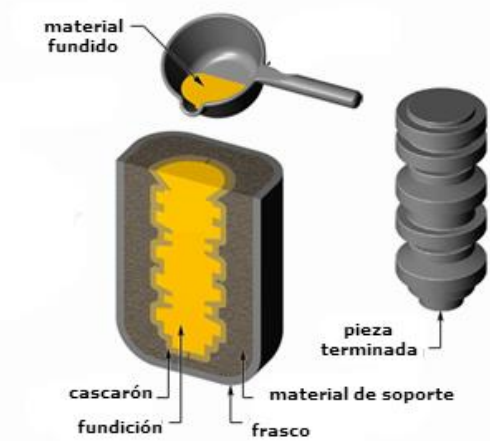


Figura 2.2 Moldeo en concha

2.2.3 Moldeo por inyección

La mayoría de estas piezas son de aleaciones no férreas, aunque actualmente ya se producen cantidades importantes de piezas férreas moldeadas por inyección. A causa de que se combinan moldes metálicos, matrices y presión, se consiguen en estos procesos espesores finos y excelente reproducción de detalles, además de una gran duración del molde. Un ciclo de moldeo por inyección consta de las siguientes operaciones:

1. Cierre y obturación de las matrices.
2. Inyección del metal en la matriz y mantenimiento de la presión.
3. Solidificación del metal.

4. Apertura de la matriz.
5. Expulsión de la pieza.

El moldeo por inyección permite conseguir una precisión dimensional excelente. Con aleaciones de base aluminio, magnesio, cinc y cobre pueden mantenerse tolerancias lineales de ± 0.075 mm (0.003 pulgadas). [31]

Observando la Figura 2.3, nos damos cuenta que para este proceso se debe contar con un actuador para introducir el metal fundido hacia el dado y por lo general se cuenta con un sistema de enfriamiento para el dado, esto para acelerar el proceso de solidificación de la pieza.

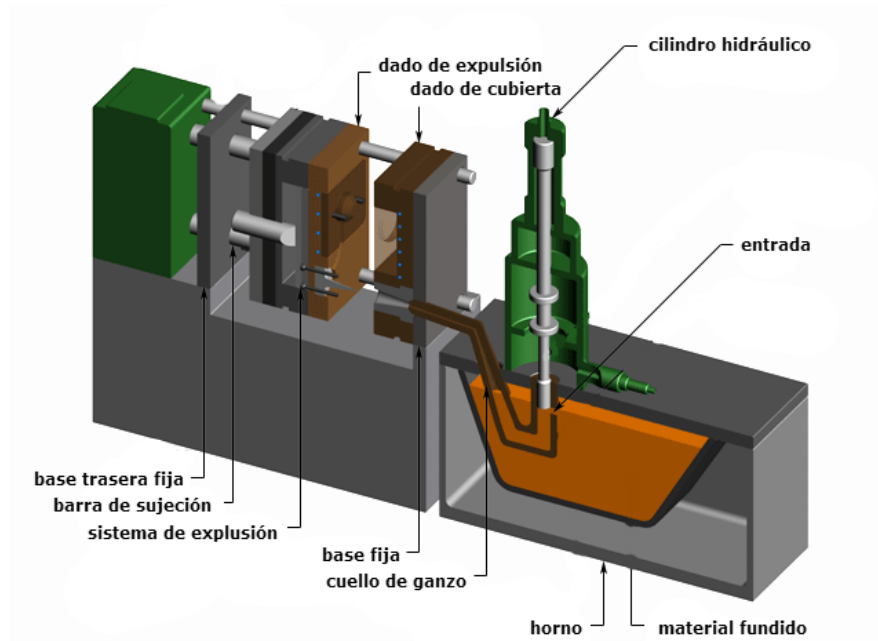


Figura 2.3 Moldeo por inyección

2.2.4 Moldeo centrífugo

En el moldeo centrífugo, el metal fundido se adapta a la forma de la cavidad del molde por acción de la fuerza centrífuga que se desarrolla en el molde al rotar este en torno a su eje longitudinal (Figura 2.4), a velocidades de 300 a 3000 rpm, mientras se introduce en él el metal fundido. La diferencia claramente es que este proceso utiliza la fuerza centrífuga en lugar de gravedad o presión, solo se pueden producir piezas cilíndricas y simétricas axialmente. Dentro de las ventajas de este proceso están: bajo costo de producción, bajo costo de mano de obra, merma

mínima generada, buen acabado y precisión en piezas terminadas. Es utilizada comúnmente para fabricación de tubos, rines, boquillas, conectores, etc.

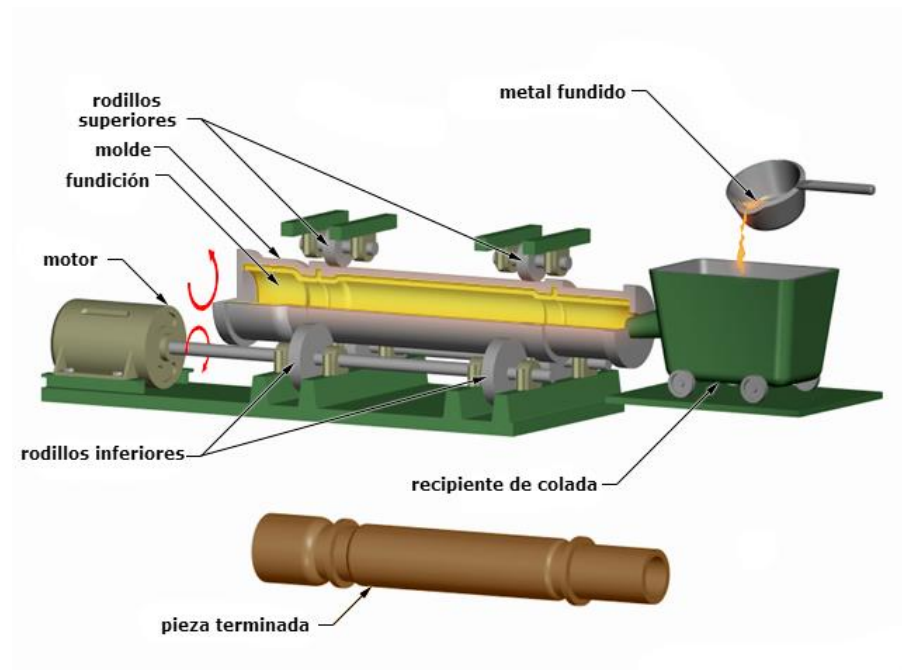


Figura 2.4 Moldeo centrífugo

2.2.5 Moldeo a la cera perdida

El moldeo a la cera perdida es verdaderamente una técnica muy antigua. Alcanzó importancia industrial hasta la II Guerra Mundial, cuando sirvió para fabricar álabes de turbinas de motor a reacción a partir de metales de maquinado dificultoso. El moldeo a la cera perdida comprende las siguientes operaciones (ver Figura 2.5):

1. Construcción de un modelo patrón.
2. Construcción de una matriz o molde a partir del modelo patrón.
3. Obtención de modelos de cera. Estos se obtienen inyectando a presión cera fundida en la matriz patrón y dejando que se solidifique.
4. Preparación de una batería de modelos con un bebedero común.
5. Cubrimiento del castillo con una capa fina de material de revestimiento. Se sumerge el castillo en una pasta poco densa de refractario finamente molido.

6. Finalización del revestimiento del castillo
7. Vibración de la caja a moldear para eliminar el aire atrapado y asentar el material de revestimiento en torno al castillo.
8. Endurecimiento del revestimiento.
9. Eliminación del modelo por fusión o disolución de la cera y extracción de la misma. Esto puede realizarse metiendo boca abajo en un horno, o bien pasándolos por un disolvente.
10. Precalentamiento del molde como preparativo para colar.
11. Colada.
12. Desmolde.

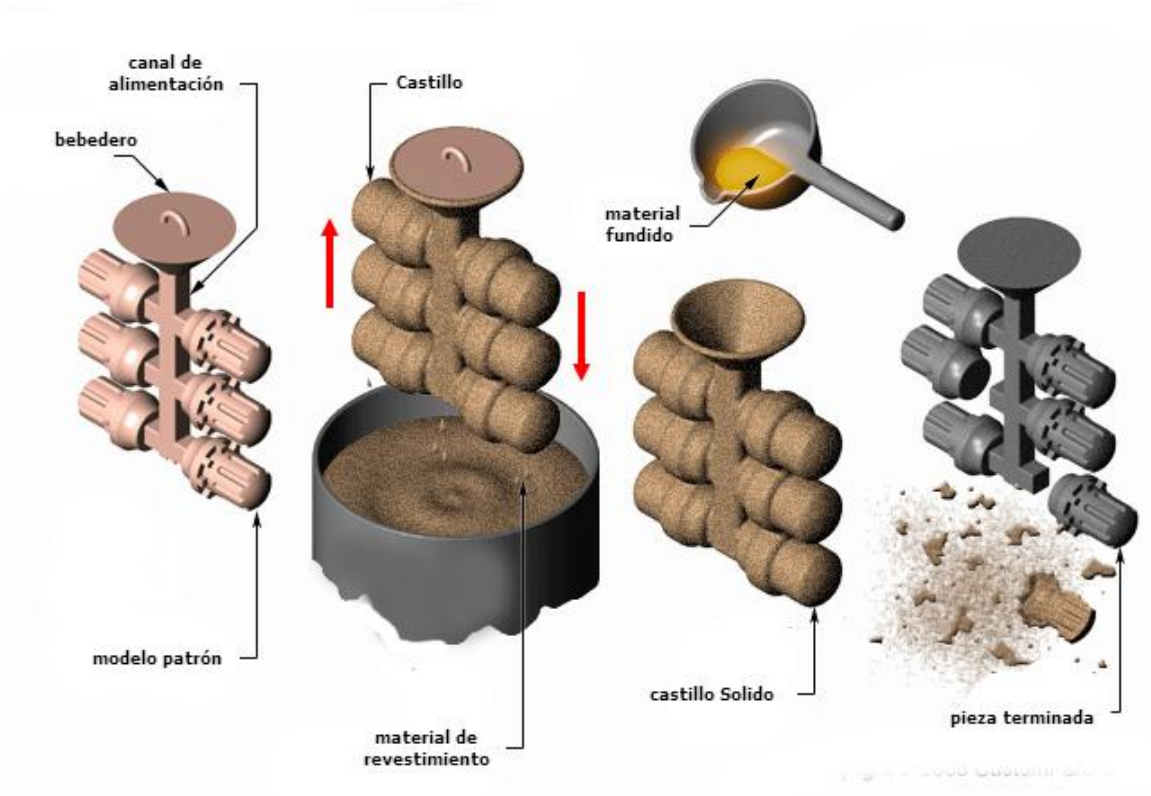


Figura 2.5 Moldeo a la cera perdida en cascara

Las desventajas en este proceso son; los tiempos del proceso son muy elevados, por lo tanto, es muy costosa la mano de obra y el costo de las herramientas. Teniendo ventaja de

generar figuras o modelos complejos con detalles específicos en variedad de tamaños, teniendo un buen acabado y precisión en las piezas terminadas.

2.3 Fibras en materiales compuestos

La influencia de las fibras sobre las características totales del compuesto es determinante ya que las propiedades del compuesto son función tanto del porcentaje como de la orientación de las fibras, entre mayor porcentaje de fibras incrementa la resistencia y rigidez del compuesto; Pero el porcentaje máximo deberá estar limitado para asegurar así que la totalidad de la superficie de las fibras quede recubierta con el material de la matriz, éste límite máximo suele establecerse en el 80%.

El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras. Como regla general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra.

Son las responsables de las buenas propiedades estructurales del compuesto. Sobre todo logran que el material compuesto tenga unas elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia en su dirección longitudinal. Las principales fibras que se utilizan en plásticos reforzados son de naturaleza cerámica; las de vidrio, las de carbón y las de aramida. [33] A continuación se muestra una tabla (Tabla 2.1) comparativa de algunas de las propiedades de estas tres fibras.

Tabla 2.1 Tabla comparativa de fibras [34]

Propiedad	Vidrio	Carbono	Aramida
Tensión de Rotura (Mpa)	2410	3100	3617
Modulo de Tensión (Gpa)	69	220	124
Alargamiento a la Rotura (%)	3.5	1.4	2.5
Densidad (kg/m ³)	2.54	1.75	1.48

2.3.1 Presentaciones comerciales de fibras

Existen diferentes tipos de refuerzos fibrados, los cuales se pueden clasificar según:

- Particulados

Consiste en partículas de varias formas y tamaños dispersas de manera aleatoria en la matriz como se observa en la Figura 2.6, pueden ser considerados homogéneos en una escala mucho mayor a la de las partículas, debido al carácter aleatorio de la distribución de las partículas, pueden ser considerados cuasi-isotrópicos. Ejemplos de estos son: el concreto, partículas de aluminio en poliuretano (usado en cohetes) y partículas de carburo de silicio (usado en herramientas)

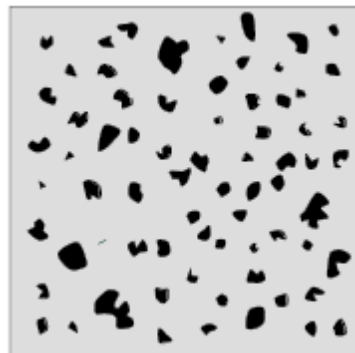


Figura 2.6 Partículas dispersas usadas como refuerzo

- Fibras discontinuas

Contiene fibras cortas como refuerzo, las fibras son largas respecto a su diámetro. La orientación de las fibras puede ser aleatoria o unidireccional (observar Figura 2.7), se utiliza generalmente en aplicaciones de baja sollicitación mecánica. Comercialmente se suelen encontrar en forma de mantas.

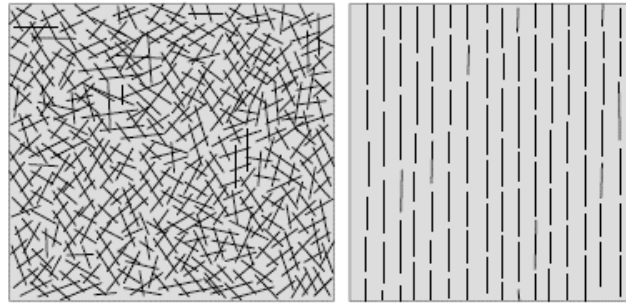


Figura 2.7 Fibras Discontinuas, aleatoria (izq.) unidireccional (der.)

- Fibras continuas

Consiste en fibras largas y continuas, la orientación de las fibras puede ser unidireccional, bidireccional o multidireccional. Para aplicaciones donde se requiere más de una orientación se combinan diferentes ángulos de fibras. Se utiliza generalmente en aplicaciones donde se requiere alta rigidez o resistencia. Existen diferentes configuraciones de tejido como se observa en la Figura 2.8.

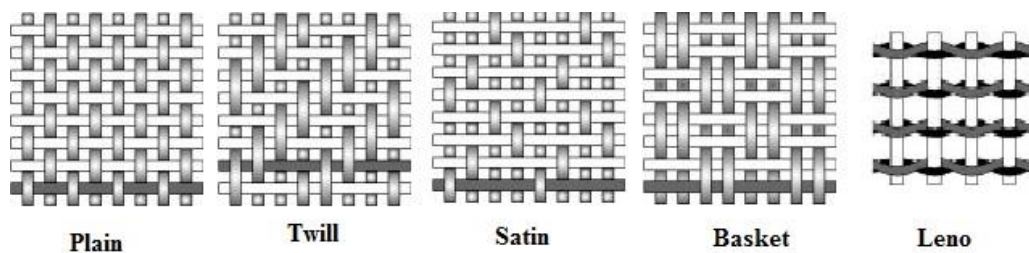


Figura 2.8 Distintas configuraciones de tejido de fibras

Describiendo la Figura 2.8 la configuración Plain es aquella que es tejida de manera simetría una encima de otra, la Twill es la que se va tejiendo de manera repetitiva de dos o más tiras de fibra, la Satin es aquella que tiene el mismo principio que twill pero se modifica para

producir menor intersecciones y no es simétrica, la de tipo Basket es la que se teje de dos en dos o de más, esta puede ser tanto 2x2 como 8x2, la Leno provee estabilidad en fibras abiertas y cuenta con un tejido similar al de Plain pero se enrosca en cada intersección quedándose fija. A continuación se muestra una comparativa entre los tejidos mencionados anteriormente en la Tabla 2.2. [35]

Tabla 2.2 Comparación entre tejidos de fibras continuas

Propiedad	Plain	Twill	Satin	Basket	Leno
Buena estabilidad	****	***	**	**	*****
Baja porosidad	***	****	*****	***	*
Alto en fricción	**	***	*****	**	*
Balance	****	****	**	****	**
Simetría	*****	***	*	***	*
Bajo rizado	**	***	*****	**	**
*****= excelente ****=bueno ***=aceptable **=pobre *=muy pobre					

2.3.2 Fibra de Carbono

La estructura atómica de la fibra de carbono es similar a la del grafito, consiste en láminas de átomos de carbono arreglados en un patrón regular hexagonal. La fibra de carbono que utilizamos en la actualidad como refuerzo de materiales compuestos se fabrica a partir de un polímero llamado poliacrilonitrilo (PAN), a través de un complicado proceso de calentamiento.

Los filamentos de fibra de carbono tienen un diámetro que oscila entre 5 y 8 mm como se observa en la Figura 2.9, están combinados en mechas que contienen entre 5000 y 12000 filamentos. Estas mechas pueden retorcerse en hilos y formar tejidos. Las fibras de carbono tienen alta resistencia mecánica y alta rigidez, pero son poco resistentes al roce y al impacto de baja energía. [36]

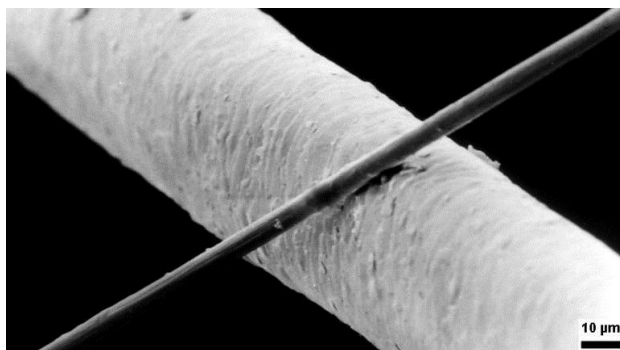


Figura 2.9 Comparativa entre un pelo humano y la fibra de carbono

Es muy utilizada en la industria aeronáutica para disminuir el peso de los aviones. Su elevado precio limita las aplicaciones en la industria del automóvil.

2.3.3 Fibra de Orgánicas

La aramida es un filamento orgánico que proviene de ciertos derivados del petróleo vista en la Figura 2.10. Su nombre se deriva de las funciones orgánicas que poseen: aromático y amida. Se utilizan en estructuras compuestas, como en las fibras de Kevlar. Fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont bajo el nombre comercial de kevlar. Los más conocidos son el kevlar 29 y el kevlar 49, el primero es de baja densidad, alta resistencia y alto módulo, con aplicaciones en la industria aeroespacial, marina, automotriz, etc. La aramida de kevlar se utiliza en materiales compuestos de elevadas prestaciones en los que son importantes un bajo peso, alta resistencia, rigidez, resistencia al dañado, resistencia a la fatiga y a la ruptura por tensión. Tienen un buen comportamiento al corte y son muy susceptibles a la humedad. Por lo general la falla de los compuestos fabricados con esta fibra no es catastrófica pues no se desarma la pieza. [34]

Las fibras de aramida tienen una alta resistencia al impacto y la corrosión y son extremadamente resistentes al ataque químico, exceptuando ácidos fuertes y bases a altas concentraciones. La aramida se degrada a 480°C en nitrógeno y a alrededor de los 380°C en aire. Se utilizan en cables, sistemas balísticos y de armamento. [37]



Figura 2.10 Aramida

2.3.4 Fibra de Vidrio

Se usa en el refuerzo de matrices plásticas para formar compuestos estructurados y productos moldeados. Los materiales compuestos de plástico y fibra de vidrio tienen entre otras las siguientes características: buena relación resistencia/peso, buena estabilidad dimensional, buena resistencia al calor, al frío, y a la humedad, aislantes de la electricidad, fáciles de fabricar y relativamente baratos. Las dos clases más importantes de fibra de vidrio que se utiliza en la industria de los materiales compuestos son el vidrio E (eléctrico) y el vidrio S (estructural). El vidrio S tiene una relación resistencia/peso más alta y tiene mayor costo que el vidrio E, se utiliza fundamentalmente para aplicaciones aeroespaciales y militares. Puede venderse en distintas presentaciones ya sea unidireccional, tejida o con fibras dispersas como se observa en la Figura 2.11.

Son las fibras más comúnmente utilizadas, en principio porque su costo es menor a las de carbono o aramida. Las matrices más comunes son las resinas de poliéster. Tienen una densidad y propiedades a la tracción comparable a las fibras de carbono y aramida pero menor resistencia y módulo de tensión, aunque pueden sufrir mayor elongación sin romperse. [38]

Las aplicaciones más comunes son:

- Carrocerías de automóviles y barcos
- Recipientes de almacenaje

- Principalmente la industria del transporte en general.



Figura 2.11 Fibra de Vidrio

2.3.5 Fibras Naturales

Actualmente, cada vez se utilizan más materiales reforzados con fibras que sean más económicas y de menor impacto medioambiental. Para ello, se están reforzando muchos polímeros con fibras provenientes de productos naturales como el lino o la fibra de coco; utilizándose más en la industria del automóvil donde según una directriz de la UE para el 2015 el 95 % de la masa de un coche debe ser reutilizable.

Teniendo que las fibras de refuerzo provienen de vegetales, el impacto medioambiental total en la fabricación de las piezas es mucho menor. Se está dedicando mucho esfuerzo de investigación en la fabricación de materiales compuestos completamente “ecológicos” o “verdes”. En ellos se refuerza la matriz del polímero natural (p. ej. celulosa) con fibras de origen vegetal (p. ej. fibra de lino). Ya existen polímeros comerciales completamente “verdes” y se prevé que su producción aumente en el futuro (aunque, actualmente, los precios son mayores que los análogos obtenidos del petróleo). [36]

2.4 La matriz en un material compuesto

La función principal de la matriz es la de distribuir los esfuerzos entre las fibras a través de la inter-cara. Actúa como ligante manteniendo unidas las fibras por medio de fuerzas adhesivas y cohesivas. Además de tener funciones como:

- Fijación de las fibras en el ordenamiento geométrico deseado.
- Protección a las fibras de los esfuerzos de compresión.
- Protección a las fibras de los medios externos (humedad, ataque químico)

A continuación las características generales de las diferentes matrices (Tabla 2.3).

Tabla 2.3 Características generales de diferentes resinas

Propiedad	Matriz				
	<i>Poliéster insaturado UP</i>	<i>Resina Epoxi</i>	<i>Resina Fenólica</i>	<i>Resina Vinilester</i>	<i>Resina Poliimida</i>
Densidad(gr/cm ³)	1.17-1.26	1.17-1.25	1.25-1.3	1.17-1.25	1.27-1.42
Alargamiento ala rotura (%)	<3	6-8	<3	3.5-7	6-10
Fluencia	Muy baja				
Temperatura de moldeo (°C)	Temperatura ambiente hasta 180	Temperatura ambiente hasta 170	150-190	Temperatura ambiente hasta 175	350
Temperatura de reblandecimiento	80-160	80-130	100-150	100-150	260 en periodos cortos hasta 500
Propiedades reológicas	Muy Buenas				Depende del fabricante
Calor de reacción	Reacción	exotérmica	dependiente	de la geometría	pieza
Contracción del fraguado (%)	6-10 lineal entre 1.8 y 2.4	1-3	0.5-1.5	0.1-1	0.5-0.7
Contracción posterior (%)	Hasta 3	Prácticamente ninguna	Hasta 0.4	Hasta 1	Prácticamente ninguna
Tiempo de almacenamiento	Temp.Amb. 6 meses	Bajas Temp. 6 meses	Temp.Amb. 6 meses	Temp.Amb. 6 meses	Temp.Amb. 6 meses

Los tipos de resina utilizados son:

2.4.1 Resinas Poliéster

La resina poliéster es la de uso común y se produce a partir de reacciones de policondensación entre dos monómeros (diol + ácido dicarboxílico). Es de bajo costo, buenas propiedades mecánicas y buen comportamiento eléctrico. Se suministra con viscosidad media y baja, solo requieren la adición de acelerador y catalizador.

2.4.2 Resinas Viniléster

Esta fue desarrollada específicamente para la fabricación de componentes plásticos reforzados resistentes a productos químicos. Posee una elevada resistencia química y propiedades físicas superiores a las de poliéster. Sus propiedades se encuentran entre las de poliéster y las de epoxi. Tiene buena resistencia química, son producidas a partir de una reacción entre una resina epoxi y un ácido de metacrilato o acrílico. El material resultante se disuelve en estireno, dando al producto una menor viscosidad muy similar a la de poliéster.

El principal problema en los procesos productivos que emplean estas resinas al igual que las de poliéster, es el de las emisiones de estireno al ambiente. Esta presenta una disolución entre 30% y 40%, mientras que la de poliéster ronda el 40% a 50%.

2.4.3 Resinas Epoxi

Posee las mejores propiedades, se basa en los llamados epóxidos (generalmente bisfenol A), que endurecen por poliadición al reaccionar con endurecedores polifuncionales como aminas, fenoles o poliácidos. Poseen las mejores características mecánicas y de mayor resistencia térmica. Su estabilidad dimensional es otro punto fuerte de estas resinas, que se traduce en una ausencia de contracción durante el proceso de curado.

Su principal inconveniente es la absorción de humedad, su elevado costo y debido a su gran viscosidad; la dificultad de la impregnación de refuerzos.

2.4.4 Resinas Fenólicas

Son los sistemas de resinas más antiguos y se fabrican mediante una reacción de condensación entre el fenol y el formaldehído en la que se genera agua como producto residual. Tiene excelentes propiedades de resistencia al fuego, alta estabilidad térmica, buena resistencia química y una absorción de humedad. Se presenta en forma de polvos de moldeo, resinas líquidas y resinas de resolución. Se pueden moldear a alta, media y baja presión. [39]

2.5 Métodos de fabricación de materiales compuestos

La decisión del método de fabricación depende del tipo de matriz y de la fibra, la temperatura necesaria para formar la parte y curar la matriz, sin olvidarnos del costo-eficiencia del proceso. Cada método tiene sus limitaciones en cuanto al diseño estructural de la pieza, es por ello que los diseñadores necesitan entender las ventajas, limitaciones, costos, tasas de producción y volúmenes. El proceso básico para la fabricación de matrices de materiales compuestos involucra las siguientes operaciones:

- Colocación de la fibra en la orientación requerida
- Impregnación de la fibra con resina
- Consolidación de las fibras impregnadas, removiendo excesos, aire o sustancias volátiles
- Curado o solidificación del polímero
- Extracción del molde
- Operaciones finales como recorte y remover rebabas

2.5.1 Materiales utilizados

Los materiales involucrados en los procesos de fabricaciones de piezas de materiales compuestos varían, debido a que en los procesos complejos se utilizan mayor número de materiales para lograr la fabricación de la pieza. A continuación enlistaremos algunos de los materiales más utilizados.

- Fibra

Material utilizado como refuerzo, ejemplos en Figura 2.12.

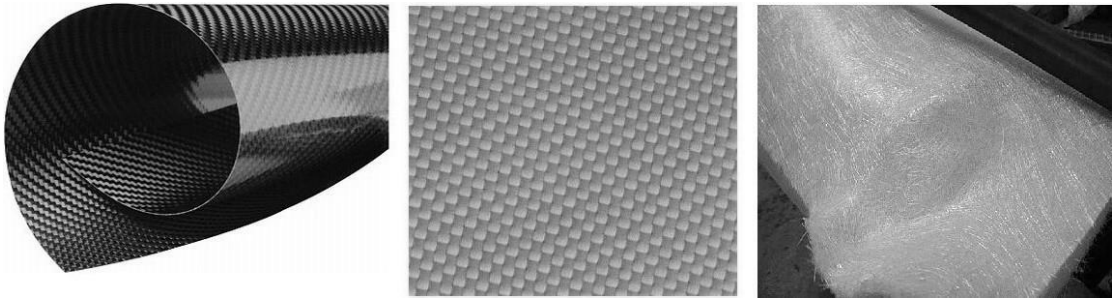


Figura 2.12 (izq.-der.) Fibra de carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio

- Resina

Material utilizado como matriz, todas necesitan un proceso de curado para alcanzar su estructura reticulada. Puede ser epoxi, poliamida, fenólica o de poliéster.

- Corazón o núcleo

Estos son utilizados para brindar propiedades específicas a la pieza, sea rigidez, cuerpo o soporte, los más habituales son la espuma de poliuretano, panel tipo nido de abejas y madera vistos a continuación en Figura 2.13.

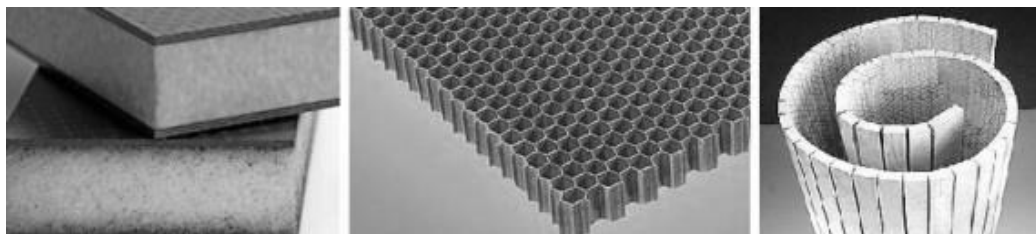


Figura 2.13 (izq.-der.) espuma de poliuretano, panel tipo nido de abejas y madera

- Agente desmoldante

Previene la adherencia de la pieza al molde, también se suele utilizar para prevenir la adherencia entre otros elementos dentro de la bolsa de vacío.

- Peel Ply

Material poroso que frena el flujo de resina, permite determinar una rugosidad superficial donde se utiliza, generalmente no se remueve hasta el momento del pegado para evitar la contaminación de la superficie.

- Bolsa de vacío

Es la encargada de sellar todo el laminado, generalmente es de nylon, puede ser elástica para una mejor terminación superficial y evitar pliegues, el costo varía según sea la temperatura en la cual se utilizará, son higroscópicos y el contenido de humedad actúa sobre ellos como un plastificante, teniendo influencia sobre sus propiedades mecánicas. Cuando su contenido de humedad es bajo, el film se vuelve rígido y quebradizo, deteriorando sus propiedades de alargamiento. Por ello, es recomendable almacenar en lugares donde la humedad relativa sea mayor al 55%.

- Film Perforado

Este evita la adherencia del material de respiración/sangrado a la pieza permitiendo la salida de resina excedente, existen diferentes configuraciones de agujeros, diferentes diámetros y separaciones entre ellos, el más común es el visto en la Figura 2.14.

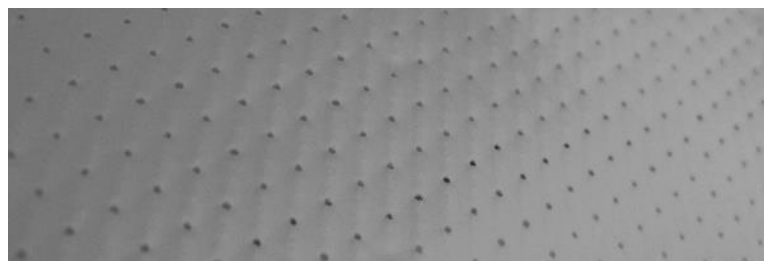


Figura 2.14 Film perforado

- Material de respiración/sangrado

Es un tejido sintético fabricado de fibras de poliéster recicladas, razón por la cual presentan imperfecciones en su superficie. Permite la dispersión del vacío evitando el estrangulamiento de la bolsa, también absorbe el exceso de resina que atraviesa el film perforado (Figura 2.15).



Figura 2.15 Material de respiración o sangrado

2.5.2 Moldeo por colocación manual

Es el método más simple y ampliamente utilizado en los procesos de manufactura. Implica la colocación manual de fibras sobre un molde y posteriormente la aplicación de resina como se observa en la Figura 2.16. El curado se realiza por lo general a temperatura ambiente. Este proceso se divide en cuatro etapas; preparación del molde, recubrimiento con gel, colocación y curado.



Figura 2.16 Moldeo de fibra de vidrio por colocación manual

Dependerá de la etapa de preparación del molde la complicación de la colocación de fibras en él, sea el molde de madera, yeso, plástico, compuesto o metal dependiendo del número de partes, temperatura de curado, presión, etc. Moldes permanentes, utilizado para corridas largas son fabricados de metal, moldes de compuestos son utilizados para baja producción ya que no son buenos al reutilizarse, el molde podrá ser hembra o macho dependiendo de qué superficie requiera que sea lisa. Una capa de un agente de liberación se aplica al molde para facilitar la remoción de la pieza terminada.

Tabla 2.4 Ventajas y Desventajas del proceso de colocación manual

Ventajas	Desventajas
Se pueden fabricar piezas grandes y complejas	Solo una superficie de la pieza queda lisa
Costo mínimo de inversión en equipo	Calidad depende de operarios
Costo mínimo de herramienta	Trabajo intenso
Porosidad mínima	Baja tasa de producción
Construcción en sándwich es posible	Alta emisión de sustancias volátiles
Insertos y refuerzos fácil de acomodar	Uniformidad del producto difícil de obtener
Partes con excelente acabado	Largos tiempos de curado a temperatura ambiente
No hay necesidad de hornos de curado	

Los agentes de liberación comúnmente son cera, alcohol polivinílico, silicón o papel de desmoldeo. La opción del agente a utilizar dependerá del tipo de material que se colocará en el molde y el grado de brillo deseado en la pieza.

Los costos y tasas de producción de este proceso varían dependiendo de la fibra y matriz utilizada, el costo del herramental dependerá del número de partes a manufacturar y el proceso que involucra. El costo por parte se minimizará escogiendo el modo de construcción adecuado del molde y ajustando la tasa de producción al equipo disponible. Finalmente el costo por pieza afecta la calidad del producto, debido a que los operadores sean expertos o simplemente técnicos, el costo por unidad puede ser de hasta \$280 m.n. /kg para piezas de alta calidad aeroespacial utilizando fibra de vidrio.

2.5.3 Moldeo por vacío

Una presión uniforme es aplicada al laminado antes del curado, esto mejora su consolidación de la fibra y evita que haya un exceso de resina, aire o sustancias volátiles de la matriz. La presión se aplica gracias a un diafragma flexible o bolsa como se observa en la Figura 2.17.



Figura 2.17 Moldeo por vacío

Las láminas se colocan en el molde y se esparce la resina, se utiliza un agente de liberación en ambos lados para evitar que se pegue o escape el aire. Se coloca adhesivo en todas las orillas de la bolsa para evitar que tenga respiraciones. Una vez sellada la pieza se aplica vacío mediante una bomba inyectando resina para posteriormente ser curada con calor y presión. El vacío evita que haya excesos de sustancias volátiles, solventes, aire atrapado o resina. Posterior al ciclo los materiales se convierten en una sola pieza con la forma del molde. Existen tres métodos para aplicar presión al laminado: bolsa de presión, bolsa de vacío y procesamiento por autoclave. La calidad de la pieza dependerá de la habilidad del operador.

La técnica del moldeo asistido por vacío consiste en crear presión sobre un laminado durante su ciclo de curado. La presurización del laminado cumple varias funciones. Primera, remueve el aire atrapado entre capas. Segunda, compacta las capas de refuerzo por transmisión de fuerzas, proporcionando laminados más uniformes. Tercera, evita que la orientación del laminado se modifique durante el curado. Cuarta, reduce la humedad. Quinta y quizás la más importante, la técnica de vacío optimiza las relaciones refuerzo-matriz en las piezas de materiales

compuestos. Todas estas ventajas han sido utilizadas durante años para maximizar las propiedades físicas de los materiales compuestos, tanto en campos como la aviación así como en industrias de componentes para competición. [39]

El proceso de vacío puede incluir o excluir la impregnación de resina, esto es puede ser que la pieza sea muy compleja y la manera más sencilla de fabricarla es mediante la impregnación manual o en el caso de ahorrar tiempo podemos colocar mangueras extras que nos ayuden a que fluya la resina de un contenedor a la pieza al aplicarle vacío. En ambos casos habrá que utilizar el mismo material. Los materiales mostrados en la Figura 2.18 nos muestran el orden en el cual se deben de colocar para llegar a cabo el moldeo por vacío.

Teniendo el molde o base donde se realizará la pieza debemos aplicar un agente desmoldante previo a la colocación de la fibra, teniendo esto colocamos tela de prensa o peel ply para facilitar la liberación de la pieza, posterior la película perforada, el respirador para facilitar la circulación de aire y por último la bolsa de nylon con cinta sellante donde sea necesario, logrando un vacío hermético.

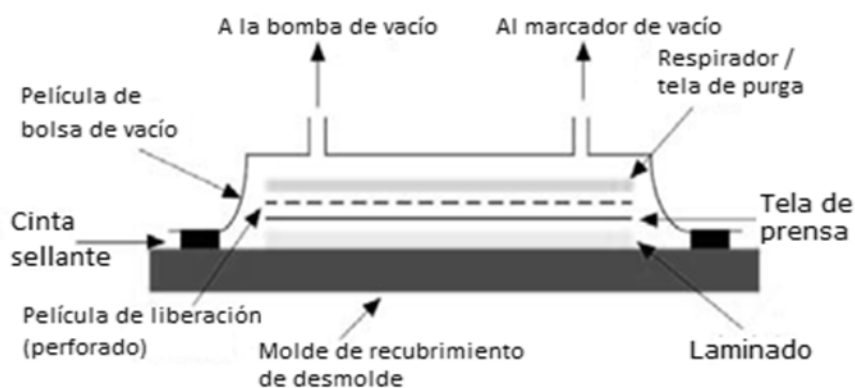


Figura 2.18 Distribución de material para laminado por vacío

2.5.4 Procesamiento por Autoclave

Módulos de Autoclave son contenedores con gas comprimido mientras se procesa el compuesto, son usados cuando se requiere alta calidad o piezas complejas, este método es bueno

para piezas grandes y tasas de producción moderadas. El procesamiento por Autoclave es una extensión del proceso de vacío con bolsa, brindando presión más alta y mayor compresión.

La mayoría de autoclaves para manufactura de compuestos son contenedores cilíndricos con cúpulas en los extremos, de los cuales una es la entrada o puerta del contenedor. La opción del material para el herramental usualmente está basada en la temperatura que se utilizará en el curado y la cantidad de piezas requeridas, moldes de yeso y madera son utilizados como prototipo donde la temperatura de curado es baja, para la etapa de producción se utilizan partes de poliéster, materiales epoxi, aluminio, acero, etc. Operaciones de autoclave consumen grandes cantidades de energía y material, incluyendo gases industriales (nitrógeno es usado para presurizar como alternativa a los compresores de alta presión).

En la autoclave se introducen laminados de materiales compuestos, generalmente pre-impregnados, a efecto de someterlos a una mayor presión de compactación y a una temperatura de curado más elevada (ver Figura 2.19).

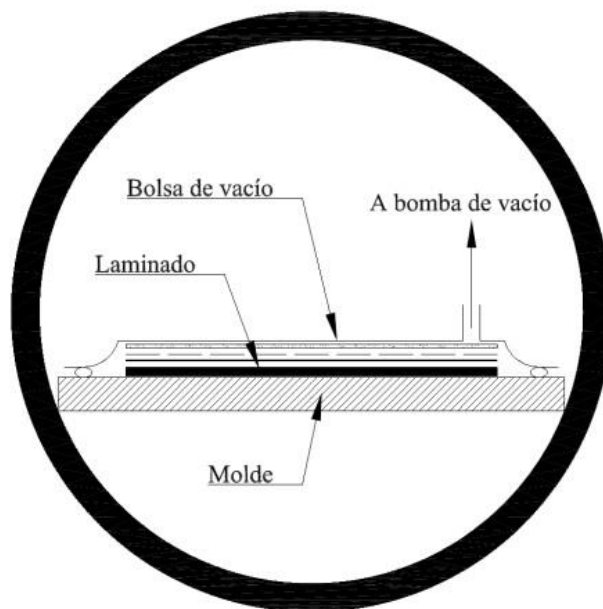


Figura 2.19 Componentes de un autoclave [40]

2.5.5 Etapa de curado del compuesto

A pesar de que la etapa de curado puede formularse con una gran variedad de condiciones de trabajo, distintas combinaciones de resina/endurecedor se pueden utilizar, cada una de ellas para desempeñar mejor en un rango de temperaturas de aplicación, influyendo en su fuerza y longevidad. La mayoría de resinas epoxi se desempeñan mejor o al menos alcanzan lo mejor de sus propiedades físicas en temperaturas arriba de los 15 °C, algunas combinaciones están formuladas para curar en temperaturas en temperaturas bajas (2 °C)

Al mezclar la resina epoxi y el endurecedor se produce una reacción química la cual genera calor llamada reacción exotérmica, temperaturas altas aceleran la reacción mientras que temperaturas bajas retardan y reducen la actividad de reticulación en las moléculas de epoxi como se observa en la Figura 2.20.

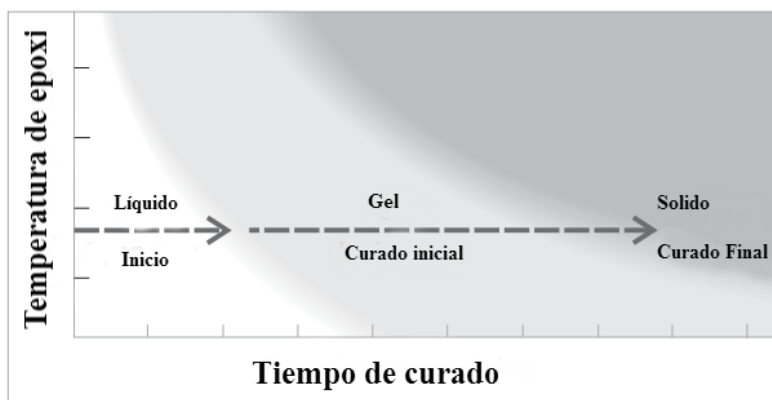


Figura 2.20 Etapa de curado de resina epoxi [41]

Uno de los riesgos del curado en un ambiente frío es que la mezcla se vuelve flexible al no estar completamente curada, al realizar pruebas en estos compuestos la resistencia a fatiga y la resistencia a ruptura se verá reducida notablemente, otro factor que afecta en las propiedades mecánicas del compuesto es las burbujas de aire que quedan durante la mezcla de esta aplicación, en el caso de los compuestos curados en vacío esto no deberá de ser problema.

2.6 Moldes para Materiales Compuestos

Cuando trabajamos con materiales compuestos, la etapa del diseño del molde adquiere una relevancia especial debido a que de la eficiencia de la producción dependen los costes de fabricación. Por lo tanto, de un acertado diseño del molde dependerá en gran medida el éxito o fracaso del producto. Para ello, existen una multitud de factores a considerar, que influyen de forma directa en la viabilidad técnica y económica del producto.

La experiencia del diseñador de la pieza en campo constructivo es sin duda, la más importante, ya que condiciona la realización del producto, al destinar su diseño a un proceso determinado de fabricación. Es indispensable entonces reunir en esta primera etapa del proyecto a las diferentes partes implicadas y discutir las ventajas e inconvenientes del diseño de la pieza. Incorporar modificaciones y cambios en la pieza en esta primera fase del proyecto tiene un coste porcentual mucho menor que si estos cambios se efectúan cuando el proyecto está muy avanzado.

2.6.1 Aspectos fundamentales previos

Los aspectos fundamentales previos a considerar en el diseño de un molde son:

- Método de producción seleccionado.

El método de producción de una pieza en materiales compuestos va a ser un factor determinante en el diseño del molde, ya que factores como la resistencia del molde, las altas temperaturas a las que será expuesto dicho molde, así como los materiales de construcción que se emplearan variarán de un método a otro, razón por la cual debe considerarse en las primeras etapas del desarrollo.

- Tamaño y complejidad del diseño de la pieza.

El tamaño de la pieza es otro aspecto a tener en cuenta en la selección del molde, ya que un tamaño excesivamente grande puede condicionar la fabricación del producto por razones de espacio, proceso constructivo, coste de los materiales, herramientas adecuadas, etc.

En contrapartida, un tamaño relativamente pequeño puede generar pérdidas económicas por incomodidad del trabajo, falta de precisión en acabados, limitaciones en los métodos de producción, etc. La complejidad del diseño es otro de los aspectos a considerar, ya que de ella depende fundamentalmente el planteamiento de particiones del molde. Una pieza excesivamente compleja necesita de múltiples particiones del molde que permitan su desmoldeo, lo que derivará en procesos posteriores como maquinado, retoques, montaje, acabado, etc.

- Coste del producto (cantidad de unidades a producir).

Sin duda, el número de unidades a producir condicionará sustancialmente el coste del producto, razón de peso entonces a la hora de determinar el tipo de molde más apropiado. Así como en la industria en general, cientos de miles de piezas de reducidas dimensiones pueden ser consideradas series pequeñas, en la náutica una serie pequeña se considera a la producción (dependiendo del tamaño de la embarcación), a un número que puede variar entre 2 y 10 unidades anuales. En el mismo sector, una gran producción se puede considerar anual de 15 o más unidades.

- Requerimientos de acabado superficial

Una de las particularidades de los materiales compuestos es que poseen sólo una cara con acabado superficial bueno, la que se encuentra en contacto con el molde. Así, dependiendo del aspecto que debe presentar la pieza una vez acabada, es decir cual cara debe presentar acabado superficial, podemos diseñar diferentes tipos de molde. Es necesario entonces conocer de antemano cuales son los requerimientos superficiales de la pieza, es decir conocer cuáles serán los requerimientos del brillo (acabados espejo-brillante-mate) resistencia al agua o agentes químicos, resistencia al fuego, etc.

2.6.2 Diseño de molde

El diseño de moldes es una tarea sumamente especializada y que corresponde llevarse a cabo por expertos. Dichos expertos suelen ser los modelistas y los constructores. Para su realización suelen utilizar una terminología y metodología específica de trabajo. Sólo con el aporte de su experiencia y conocimiento de llevar a cabo un buen trabajo. Esto supone acciones muy variadas a realizar durante esta etapa y que podríamos resumir en:

- Selección del material del molde

Los materiales con los que se pueden construir los moldes son múltiples y diversos, desde madera y sus diversos derivados (aglomerados, maderas contrachapadas, maderas prensadas, etc.) Hasta los mismos materiales compuestos como fibra de vidrio, carbono y Kevlar. Si existe la necesidad de producir series en una cantidad elevada de unidades, normalmente los moldes se realizan en los mismos materiales compuestos que se utilizarán en la construcción de piezas. Las ventajas son muchas, ya que no le afectan la temperatura ni la humedad en un amplio rango de temperaturas de trabajo, son más estables dimensionalmente y el degradado por su propio uso es menos que cuando se construyen en otros materiales. En contrapartida, suelen ser moldes más caros debido al coste de dichos materiales.

Si en cambio, queremos hacer series de producciones bajas o inclusive construir sólo una unidad, los moldes se pueden construir en madera. Este material es más ventajoso económicamente y nos permite contratar mano de obra menos específica. El problema fundamental de la construcción de moldes con madera es su propia naturaleza, es decir, son más susceptibles de ser atacados por agentes atmosféricos, por lo que su duración es limitada. También presentan limitaciones para desarrollar moldes de formas complejas.

Mención especial merecen los moldes metálicos que ocupan un lugar importante en producción de piezas pequeñas pero que resultan extremadamente costosas, por lo que debe hacerse un análisis previo de la conveniencia de su uso.

- Espesor de molde recomendados

Los espesores de pared de los moldes deben ser los más reducidos posibles, ya que repercuten en la cantidad de material a utilizar y en el tiempo de fabricación, es decir, en los costos. No obstante deben asegurar cierta rigidez del molde que evite deformaciones del mismo, trasladando dichas deformaciones a las piezas. Excesivos espesores pueden provocar enfriamiento irregular de la pieza, debido a la baja conductividad térmica del mismo, dando lugar a las temidas distorsiones y alabeos.

También debemos considerar la uniformidad de los espesores del molde, ya que espesores no uniformes pueden generar marcas de contracción en las piezas o generar tensiones internas debido a la diferencia en los tiempos de enfriamiento en diferentes sectores del molde. Solo a título orientativo, podríamos decir que un espesor recomendable de molde (para moldes simples, relativamente planos y suficientemente rígidos) sería entre una vez y media el espesor de la pieza, dependiendo del material del molde.

- Consideraciones sobre pliegues y cantos del molde

Los pliegues y cantos presentes en las piezas deberían ser transformados en radios lo más amplios posibles como se observa en la Figura 2.21, siempre y cuando no modifiquen la geometría de la pieza. Esto es debido a que en dichas zonas se producen concentraciones de tensiones y pueden provocar la rotura de la pieza. Otro aspecto interesante de destacar es que en los pliegues y cantos vivos, la distribución del laminado suele ser desigual entre fibra y matriz debido a la rigidez de la fibra no le permite adaptarse a zonas de curvatura tan brusca.

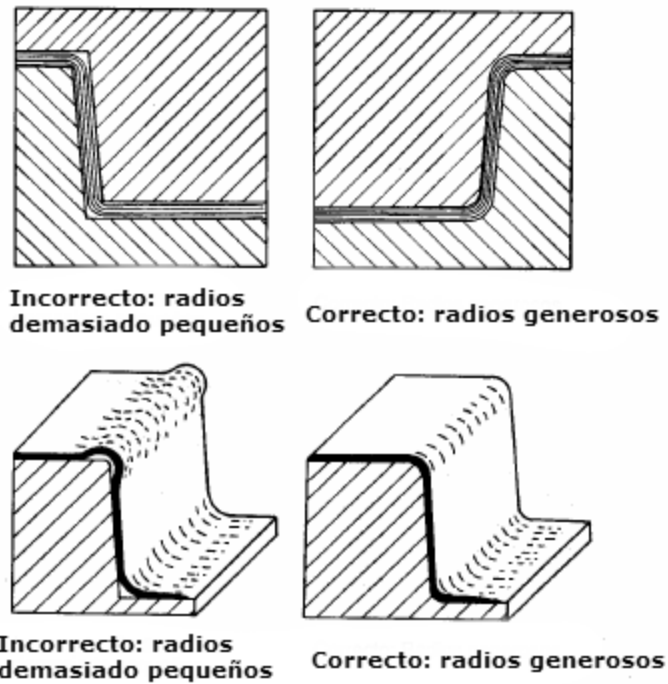


Figura 2.21 Consideraciones sobre pliegues y cantos del molde

- Simetría del laminado en moldes de materiales compuestos

La distribución del laminado, en el caso de los moldes de materiales compuestos debe hacerse de manera simétrica, ya que así obtendremos una buena estabilidad dimensional del mismo y evitaremos deformaciones que se pueden transmitir a la pieza de forma definitiva. Esta simetría debe intentar respetarse en los tres planos del estratificado que se detallan en la Figura 2.22.

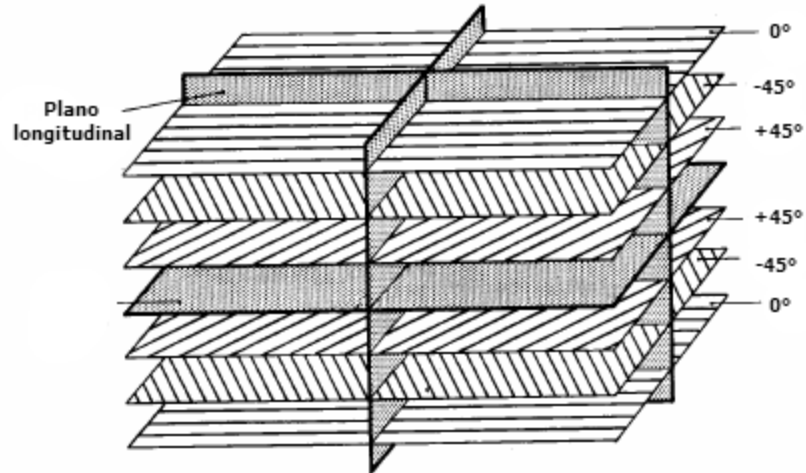


Figura 2.22 Simetría del laminado en moldes de materiales compuestos

- Gradiente de desmoldeo

Las contracciones que se producen en las piezas dentro de los moldes suelen ser diferentes de las que sufre el molde. Para evitar que las piezas queden aprisionadas dentro de los moldes, éstos deben dotarse con pendientes y conicidades que permitan un desmoldeo simple, sin excesiva fuerza (observar Figura 2.23). Dichas conicidades dependerán de la longitud de la pendiente. También se pueden dotar los moldes de contra moldes o reservas.

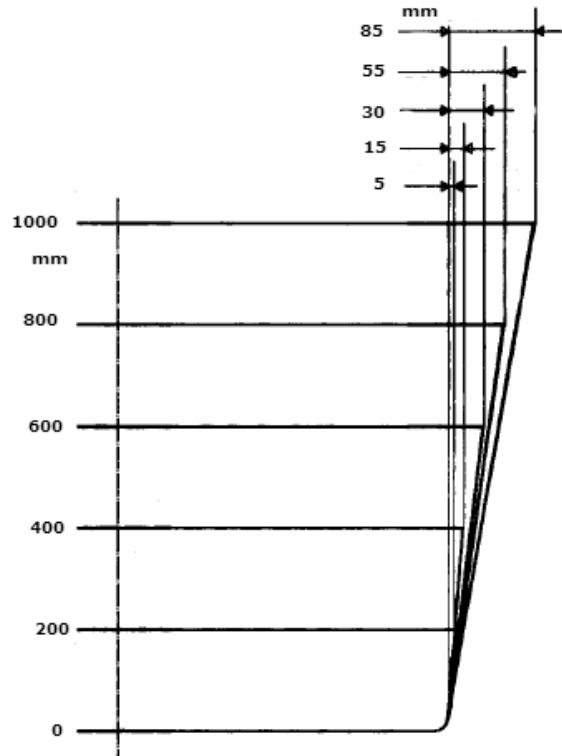


Figura 2.23 Gradientes de Desmoldeo

- Consideraciones sobre grandes superficies planas

Las grandes superficies planas presentan muchos problemas a la hora de su eyección, debido a las características del laminado, suelen abombarse o curvarse y distorsionarse. Esto afecta a la estética de la pieza, provocando aguas, ráfagas y cambios de brillo. Una solución práctica es introducir líneas de corte, cambios de planos, resaltes, agujeros y ranuras o hacer dichas superficies ligeramente curvadas, aunque esto eleva el coste de la fabricación. Otra solución es introducir nervios o refuerzos, aumentando así también la resistencia a la torsión y la rigidez de la pieza en cuestión, observar Figura 2.24.

También la utilización de grabados puede resultar beneficiosa para evitar estos defectos tan comunes en las grandes superficies planas. Todas estas soluciones podrán ser aplicadas siempre y cuando no nos encontremos con las limitaciones que impone la estética de la pieza.

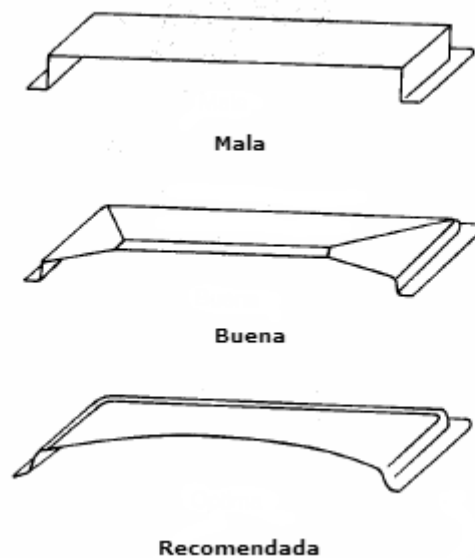


Figura 2.24 Consideraciones sobre grandes superficies planas

- Particiones de moldes

Cuando la geometría de la pieza que intentamos reproducir impide realizar el molde en una sola entidad, se recurre a realizar un molde en varias partes o también llamados moldes progresivos, que una vez acabado el proceso de laminado, se desmonta para permitir la extracción de la pieza. El diseño de los puntos de partición del molde es una etapa delicada del proceso de diseño del molde, pero conviene dedicar mayor tiempo de análisis en este periodo que realizar múltiples modificaciones posteriores en el molde.

La presencia de particiones en los moldes generará en la pieza zonas de rebabas o zonas a mecanizar posteriormente, por lo que deben ser reducidos dichas particiones al máximo. También pueden generar desalineaciones o desajustes entre las partes, por lo que se deben situar dichas particiones en zonas de menor importancia o visibilidad, beneficiando la calidad final de la pieza. [42]

2.7 Materiales de construcción de moldes para materiales compuestos

La etapa de diseño del molde adquiere una relevancia especial debido a que de la eficiencia de la producción dependen los costes de fabricación. Por lo tanto, de un acertado diseño del molde dependerá en gran medida el éxito o fracaso del producto. Dependiendo del material a moldear, del método de fabricación del molde, de la temperatura que este deberá soportar, etc. será el material del molde, normalmente para altos polímeros en proceso de inyección se utilizan moldes de acero, metales no férricos y materiales de colada no metálicos. [43]

Dependiendo la forma que se quiera crear será el molde y el material de este que se escogerá. Para objetos angulares, cuadrados o rectangulares puedes utilizar moldes de madera o contrachapado. Para objetos redondos, curvos o con formas complejas puedes elaborar tus moldes por medio de procesos como el tallado y/o laminado de uretano, o también con láminas o bloques de espuma de poliestireno. Para piezas complejas se pueden crear moldes termoplásticos moldeados al vacío. Cuando se quiera hacer un laminado plano se debe moldear con un material liso y no poroso, como la masonita, también conocida como triplex o macocel, también con chapas o láminas de acero, incluso sobre pedazos de vidrios o cristal.

2.8 Métodos de fabricación de moldes

Existen diversos métodos de fabricación del molde, según sea el más adecuado para la aplicación pensando en costo/beneficio, se puede mecanizar los moldes pero en ocasiones no hay necesidad de realizar moldes tan costosos, para estos casos se pueden fabricar de yeso, barro, etc. Es necesario analizar la aplicación que se le dará al molde, la constancia con la cual se usará, el material que se moldeará, la geometría que se quiere moldear, temperatura de operación, etc.

2.8.1 Maquinado C.N.C.

El Control Numérico Computarizado (CNC) son aquellos sistemas que convierten el diseño que puede ser Diseño Asistido por Computadora (CAD) en números, códigos o comandos. Son principalmente utilizados para programar coordenadas y con esto hacer que ciertas herramientas se desplacen y realicen cierta tarea, en el caso del maquinado; se programan los movimientos y velocidades de una herramienta para que mediante el desbaste de materia prima se obtenga la forma deseada.

Las máquinas de maquinado CNC se bajan en ejes de trabajo, existen máquinas de hasta 9 ejes de trabajo, comúnmente se utilizan de 3 o 5 ejes. En la Figura 2.25 se puede observar los ejes de trabajo X, Y, Z y una posición de trabajo en este caso: 18, 8, 23.

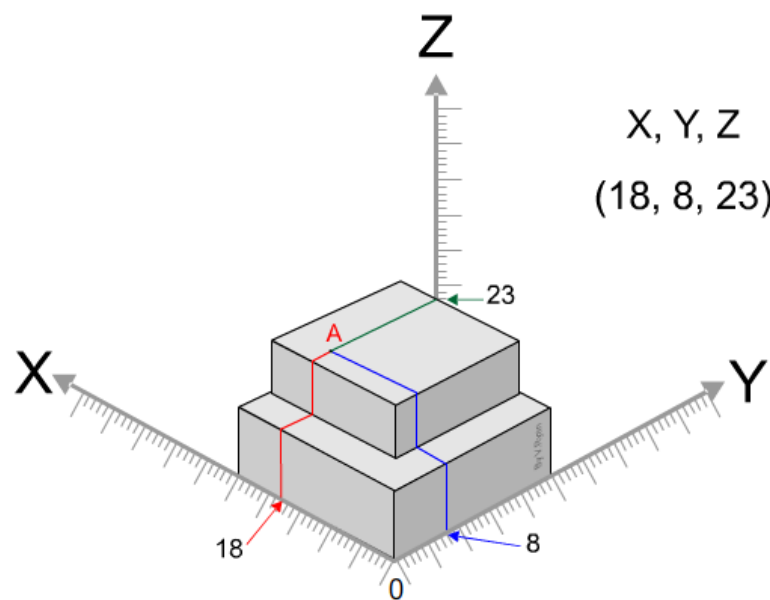


Figura 2.25 Ejes de trabajo de máquina CNC [44]

El procedimiento que se debe llevar a cabo para maquinar una pieza es el siguiente:

- Diseñar la parte (CAD)
- Obtener la materia prima, se recomienda que sea lo más aproximado a la pieza final para disminuir los tiempos de maquinado.
- Sujetar la pieza en máquina y establecer cero de trabajo, cargar herramientas y establecer sus medidas en máquina.

- Generar programa de maquinado y cargarlo en máquina CNC.
- Correr programa.

Las máquinas de control numérico necesitan un código para ser programadas, por lo general se utiliza un código “G”. La desventaja de utilizar estas máquinas para la fabricación de moldes es aumenta el costo en diferencia de otros métodos de fabricación de moldes, se necesita una persona capacitada para programar y operar la máquina, entre otras.

Teniendo la facilidad de programar la trayectoria de las herramientas podemos fabricar una gran variedad de formas y geometrías. En la Figura 2.26 se muestra la variedad de herramientas de corte que se pueden utilizar en este proceso, con lo cual se podría fabricar piezas, moldes, etc. de geometrías complejas o de tolerancias muy pequeñas, así como tener piezas con excelente acabado.



Figura 2.26 Herramientas de corte utilizadas en maquinado [45]

2.8.2 Velocidades de corte

Existen diferentes maneras de calcular las velocidades de corte ya que dependerá de varios factores, entre estos; especificaciones de la herramienta de corte, material a cortar,

velocidades de la máquina en la cual se llevará a cabo el maquinado. El cálculo de las velocidades es basado en el S.F.M. (en inglés surface feet per minute o superficie-pie por minuto) por lo general los fabricantes de las herramientas proporcionan esta información como visto en Apéndice B.

Se define como velocidad de corte la velocidad lineal de la periferia de la pieza que está en contacto con la herramienta. La velocidad de corte, se expresa en pulgadas por minuto (in/min) como se puede observar en la Figura 2.27. A partir de la determinación de la velocidad de corte se puede determinar las revoluciones por minuto que tendrá el cabezal según la siguiente formula:

$$V_R = \frac{(SFM \ 12)}{(D_H \ \pi)} \dots \dots \dots (1)$$

$$IPR = IPT \ N_D \dots \dots \dots (2)$$

$$IPM = IPR \ V_R \dots \dots \dots (3)$$

Dónde:

- V_R es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto (RPM)
- SFM es superficie pie por minuto
- D_H es el diámetro de la herramienta (pulgadas)
- IPR es avance por revolución de herramienta
- IPT es pulgadas por revolución de herramienta
- N_D es número de filos en la herramienta
- IPM es el avance (pulgadas por minuto)

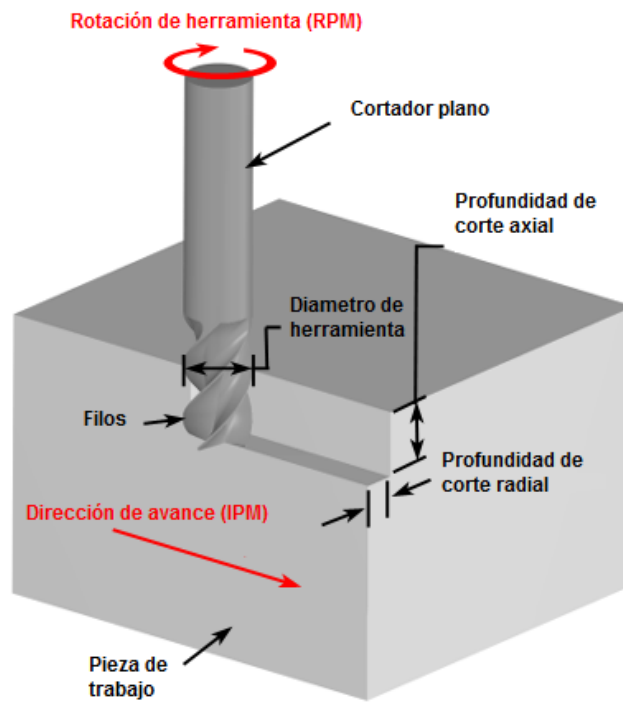


Figura 2.27 Variables para calcular velocidad de corte [46]

2.8.3 Normas que regulan la fabricación

Cuando se habla de la fabricación de un producto dependerá el país en el cual se fabrica pero en su mayoría va ligado a una serie de normatividades que regulan la fabricación, técnicas, documentación, etc. En el caso de México se tienen las normas oficiales mexicanas que son las regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes, conforme a las finalidades establecidas en el artículo 40 de Ley Federal sobre Metrología y Normalización, que establecen las reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistemas, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, mercado o etiquetado y las que se refieran a su cumplimiento o aplicación. [47]

Las Normas Oficiales Mexicanas que otorgan competencia a Profeco han sido creadas por diferentes Dependencias del Gobierno Federal:

- Secretaría de Economía
- Secretaría de Turismo
- Secretaría de Energía
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social
- Secretaría Salud

También se cuenta con las regulaciones internacionales las cuales son estándares publicados por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) la cual ha publicado más de 20,500 estándares internacionales. [48]

- ISO 13485:2003

La norma ISO 13485 de Equipos Médicos es un sistema de gestión de la calidad (SGC) reconocido internacionalmente para fabricantes de equipos médicos y servicios relacionados. La norma ISO 13485 es referente mundial de buenas prácticas en sistemas de gestión de la calidad de equipos médicos. En la cual se estipulan las documentaciones necesarias que con las cuales debe contar una empresa, entre sus capítulos se encuentra: Sistema de Gestión de la Calidad, responsabilidad de la dirección, gestión de los recursos, realización del producto y medición, análisis y mejora.

- ISO 10328:2006

La norma ISO 10328 especifica procedimientos para pruebas estáticas y cíclicas de resistencia en prótesis de miembros inferiores, así como describe procesos para realizar pruebas en componentes separados; torsión en cada componente o pruebas estáticas y cíclicas en unidades de pie-tobillo. Esta norma aplica específicamente a prótesis de miembro inferior desarticuladas, sea transfemoral o transtibial.

- NOM-241-SSA1-2012

Buenas prácticas de fabricación para establecimientos dedicados a la fabricación de dispositivos médicos. Esta norma establece los requisitos que deben reunir los procesos, desde el diseño de la instalación, desarrollo, obtención, preparación, mezclado, producción, ensamblado, manipulación, envasado, acondicionamiento, estabilidad, análisis, control, almacenamiento y

distribución de los dispositivos médicos comercializados en el país, por el tipo de insumo de que se trate y tiene por objeto asegurar que éstos cumplan consistentemente con los requerimientos de calidad y funcionalidad para ser utilizados por el consumidor final o paciente.

2.9 Sumario

En este capítulo de generalidades se abarca la teoría involucrada en este proyecto; Los compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para obtener una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera. Los compuestos pueden clasificarse en tres categorías: con partículas, con fibras y laminares, dependiendo de la forma de los materiales.

Los compuestos están formados por un agente reforzante y una matriz. Las fibras cumplen la función de refuerzo en los compuestos y son las responsables de las buenas propiedades estructurales del compuesto. Es importante la orientación, porcentaje de fibra y números de capas, los tipos de fibras que hay son: dispersas o articuladas, discontinuas y continuas. Y las fibras que existen son: de carbono, orgánicas, vidrio y naturales. La matriz en los compuestos tiene la función principal de distribuir los esfuerzos entre las fibras a través de la inter-cara. Los tipos de resina más comunes son; poliéster, viniléster, epoxi y fenólicas.

El método de fabricación de materiales compuestos dependerá del tipo de matriz, fibra y aplicación del compuesto, en las más comunes están: por colocación manual, moldeo por vacío o por autoclave. Posterior a mezclar la resina y la fibra sigue la etapa de curado en la cual se le debe aplicar temperatura para reducir el tiempo de curado en el compuesto. Los moldes para la fabricación de materiales compuestos deben de comenzar en la etapa de diseño y se debe considerar distintos factores como el grado de desmoldeo, entre otros. Se puede hacer un molde a partir de una pieza prototipo ya sea en yeso o en fibra de vidrio con resina polimérica, pero si lo que se quiere es que el molde tenga durabilidad habrá que maquinar el molde utilizando una máquina CNC, con lo cual se incluyeron velocidades de corte y normas que regulan la fabricación de prótesis de miembros inferiores.

Capítulo III

Metodología



3 Metodología

En este capítulo se hablará del procedimiento y la metodología implementada en este proyecto, siguiendo el diagrama de trabajo visto en la Figura 3.1 se plantearán varias propuestas de diseño con las que se llevará a cabo la experimentación con el fin de mejorar el diseño. Se comenzará con tener un diseño de prótesis transtibial para fabricar en material compuesto, con el cual se debe diseñar su molde y definir su proceso de fabricación, una vez finalizado esta primera propuesta se planteara la segunda en la cual ya se verá involucrada la parte flexible del molde, esto es; diseñar el molde de tal forma que cambiando una mínima cantidad de componentes se incrementen algunas dimensiones del molde con el fin de fabricar una prótesis transtibial de material compuesto para personas diferentes, ya sea que tenga la parte inferior más larga o que la amputación esté más cerca o lejos de la rodilla del paciente.

Se comenzará por realizar un diseño en conjunto con la estudiante de doctorado M. C. Miriam Siqueiros Hernández, una vez establecido este diseño, se establecerá el método de fabricación del compuesto, con esto ya comenzaremos a diseñar en Solidworks (software CAD) la primer propuesta de moldes con el cual debemos definir el material, proceso de fabricación y las dimensiones del mismo. En este punto habrá que consultar con algunos especialistas su opinión acerca de la propuesta, en dado caso que no sea viable fabricar el molde o necesite cambios, se realizarán y se volverá a definir material, proceso de fabricación y sus dimensiones. Cuando el diseño sea bueno se realizarán los cálculos y análisis necesarios para optimizarlo previo a la fabricación del molde, una vez detallado y lijado para que su acabado sea optimo se realizará una prueba en este utilizando fibra de carbono y resina para hacer la impregnación y el curado, en caso de no funcionar se volverá a retomar el análisis y los cálculos necesarios para volver a fabricar, hasta tener un molde funcional y poder tener un ensamble de la prótesis transtibial completo.

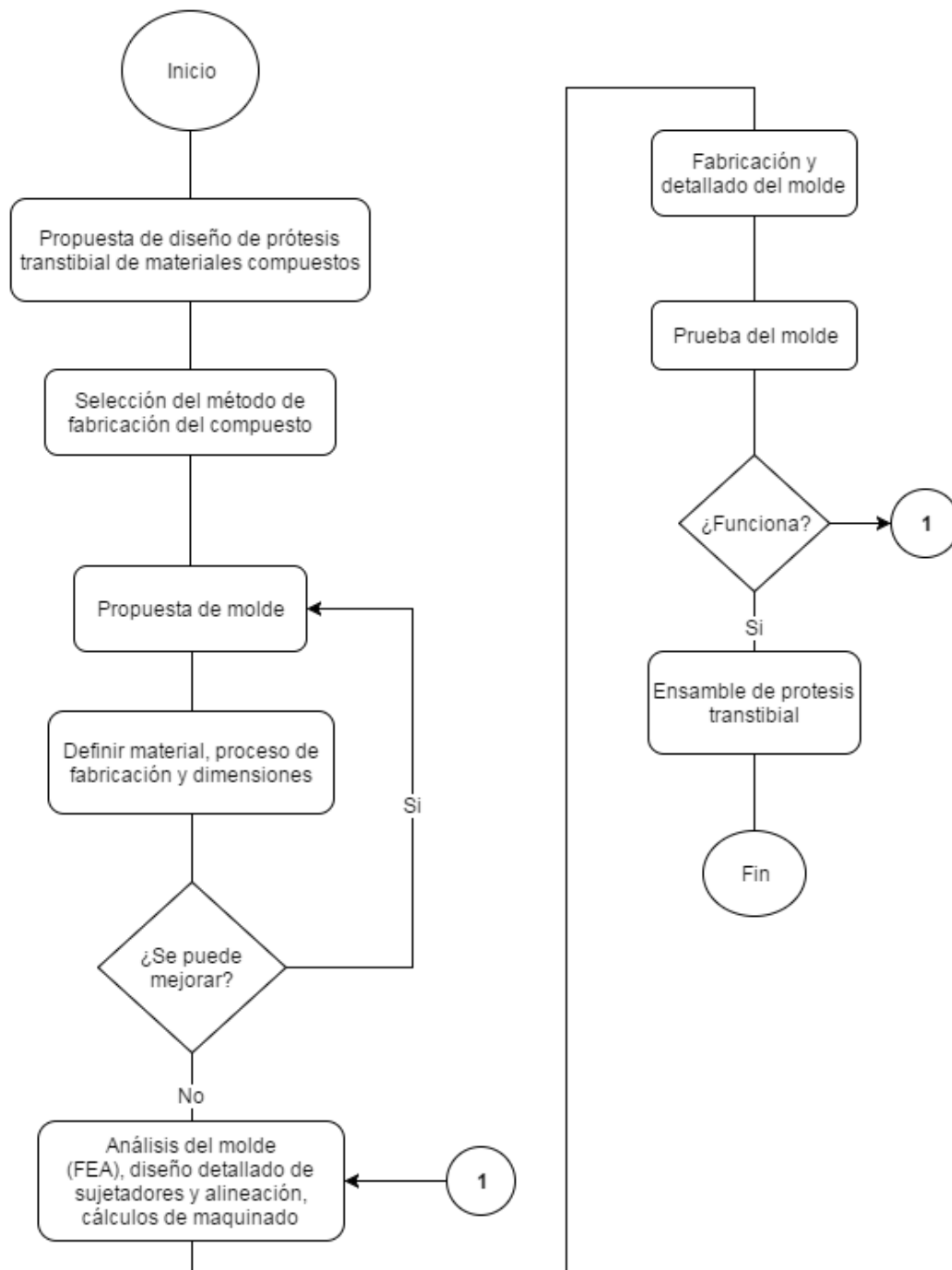


Figura 3.1 Diagrama de Flujo de Proyecto

La planeación del proceso contiene toda la información requerida para la manufactura de los moldes para prótesis transtibiales de materiales compuestos, este capítulo tiene por objetivo generar una guía de manufactura y planos que describen los pasos a seguir, las modificaciones en

cada revisión que se fue realizando, así como la forma final que debe tener la pieza. Para que una pieza mecánica sea creada primero debe haber un mercado en el cual se pueda comercializar y obtener ganancias. Es por eso que a continuación se muestra un despliegue de funciones de calidad (QFD).

3.1 Despliegue de la función de calidad (QFD)

El despliegue de la función de calidad (o QFD, por sus siglas en inglés) es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, a características técnicas y operáticas satisfactorias. El núcleo del QFD es un mapa conceptual el cual relaciona los requerimientos de los clientes con las características técnicas necesarias para satisfacerlos, esta información se presenta con una tabla elaborada llamada “matriz de la calidad”.

3.1.1 Identificación del cliente

Hoy en día todo paciente que haya sufrido una amputación de miembro inferior en específico debajo de la rodilla (transtibial), acude con su aseguranza en busca de financiamiento para tener acceso a una prótesis transtibial de última generación las cuales son excesivamente caras. Es por eso que el mercado de este caso se enfoca en pacientes quienes no tienen un seguro de vida o de gastos médicos, personas que no tienen acceso a estas prótesis proveídas por empresas extranjeras.

3.1.2 Determinación de los requerimientos del cliente

- A. Económica.
- B. Apariencia.
- C. Durabilidad.
- D. Fácil montaje.

- E. Funcionalidad.
- F. Cómoda.

3.1.3 Importancia relativa de los requerimientos del cliente

A continuación en la Tabla 3.1 se puede observar cómo se separaron los requerimientos obligatorios y los deseables del producto con el fin de llegar a una ponderación y darles orden de prioridad.

Tabla 3.1 Requerimientos obligatorios y deseables del producto

Obligatorios	Deseables
Económica	Fácil montaje
Durabilidad	Apariencia
Funcionalidad	Cómoda

3.1.4 Características Técnicas

Esto responde a: ¿Qué quiere el cliente? ¿Cuáles son los requisitos técnicos relacionados con las características que quiere el cliente? ¿Qué tecnologías son necesarias para satisfacer o sobrepasar los requisitos del cliente? A continuación se muestra en la Tabla 3.2 las características técnicas del diseño para el moldeo de las prótesis transtibiales de material compuesto.

Tabla 3.2 Características técnicas de diseño

Características
Costo de materia prima
Creatividad e innovación
Proceso de fabricación
Materiales de calidad

3.1.5 Funciones de servicio

Las funciones de servicio se muestran en la Figura 3.2, en la cual se desempeña las distintas funciones para obtener el producto final, que va desde preparar el material hasta desmoldar la pieza final.

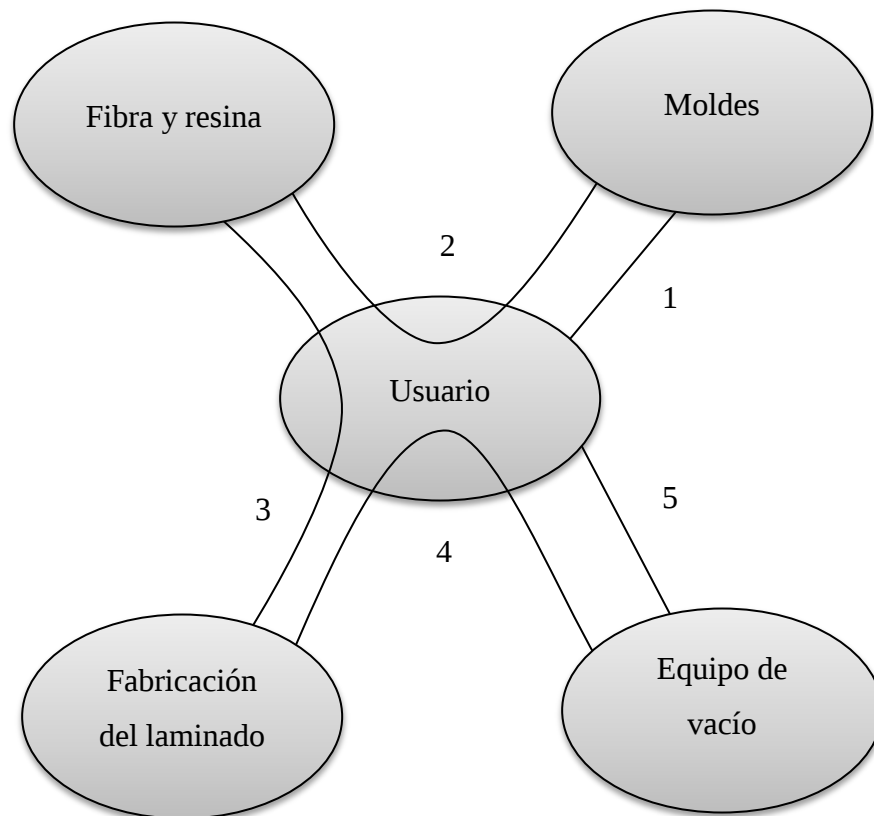


Figura 3.2 Esquemático de funciones de servicio

1. Preparar molde
2. Preparar material
3. Hacer el compuesto
4. Curado del compuesto
5. Desmoldeo

3.1.6 Matriz de planeación

En la siguiente tabla (Tabla 3.3) se muestra la matriz de ponderación de la importancia de los requerimientos del cliente con el fin de asignar prioridades a cada uno de los requerimientos. Donde 5= muy importante y 1= nada importante. Continuando con una matriz de ponderación de la correlación de los requerimientos del cliente.

Tabla 3.3 Matriz de planeación de producto

Requerimiento	Importancia
Económica	5
Apariencia	2
Durabilidad	4
Fácil montaje	3
Funcionalidad	4
Cómoda	3

Tabla 3.4 Matriz de ponderación de requerimientos del cliente

	A	B	C	D	E	F	$\Sigma (+)$	%
A	0	+	+	+	+	+	5	33.33
B	-	0	-	-	-	-	0	0
C	-	+	0	+	-	+	3	20.00
D	-	+	-	0	-	-	1	6.66
E	-	+	+	+	0	+	4	26.66
F	-	+	-	+	-	0	2	13.33
						Total =	$\Sigma = 15$	100%

Una vez definida la importancia del producto que se pretende manufacturar se hace la comparativa con la competencia o lo existente en el mercado, a continuación en la Tabla 3.5 se muestra lo mencionado:

Tabla 3.5 Matriz de ponderación de producto comparada con otros fabricantes

	1	2	3	4	5
Económica		 			
Apariencia					
Durabilidad				 	
Fácil montaje			  		
Funcionalidad					 

Cómoda			 		
 Producto propuesto	 Vari-flex de Össur	 Elite blade VT de Endolite			

En la Figura 3.3 se muestra como el producto planeado con este trabajo es superior al de la compañía Össur y Endolite en cuanto a lo económico, mientras que en sus otras características es muy similar con excepción de la apariencia.

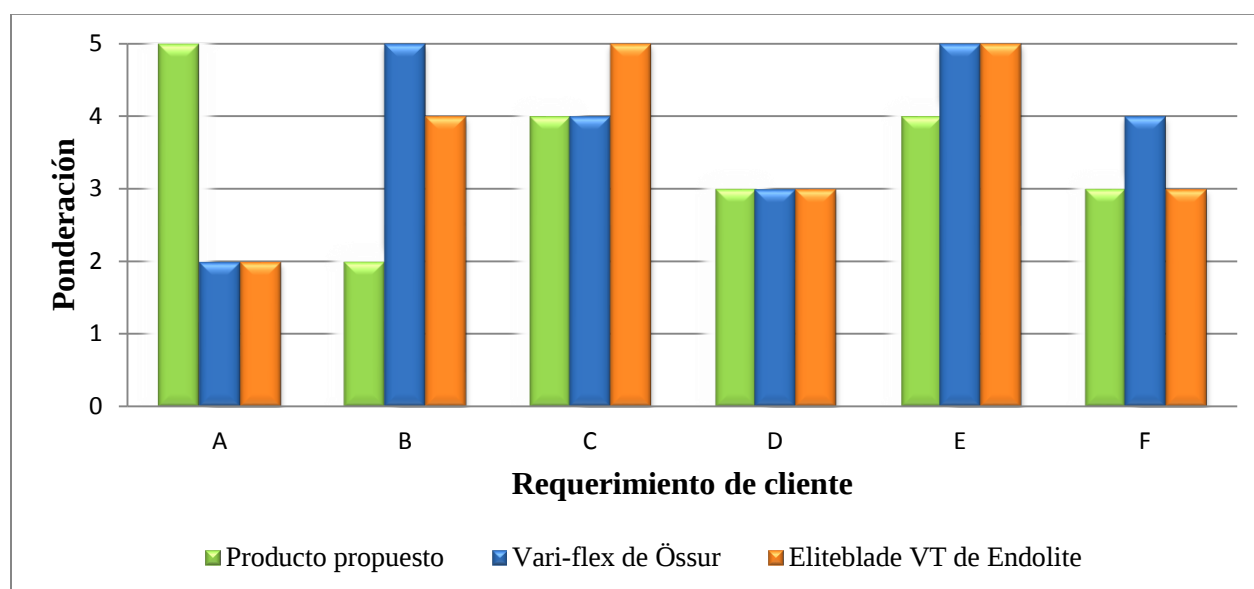


Figura 3.3 Gráfica de benchmarking

3.1.7 Evaluación de la importancia

Es importante destacar y darle un orden de importancia a las características del producto, para con esto facilitar la toma de decisiones del mismo, en la Tabla 3.6 se puede observar cómo se evaluó esta parte.

Tabla 3.6 Tabla de evaluación de la importancia

Qué/Cómo	Importancia	Costo de materia prima	Creatividad e innovación	Proceso de fabricación	Materiales de calidad
A	5	9	9	9	3
B	2	1	9	3	1
C	4	3	9	9	9
D	3	1	9	1	1
E	4	1	3	9	9
F	3	1	9	3	1
Valor Relativo	21	16	48	34	24
%	14.68	11.18	33.56	23.77	16.78

Dónde:

9 = para una relación fuerte

3 = para una relación media

1 = para una relación baja

3.1.8 Matriz de correlaciones

En la siguiente matriz de correlaciones (ver Figura 3.4) se muestra la correlación positiva o negativa de los “Cómo” de los requerimientos del cliente en cuanto al producto (prótesis transtibial) la cual es utilizada para identificar los requerimientos que caracterizan al producto, cuales lo apoyan y cuales lo entorpecen.

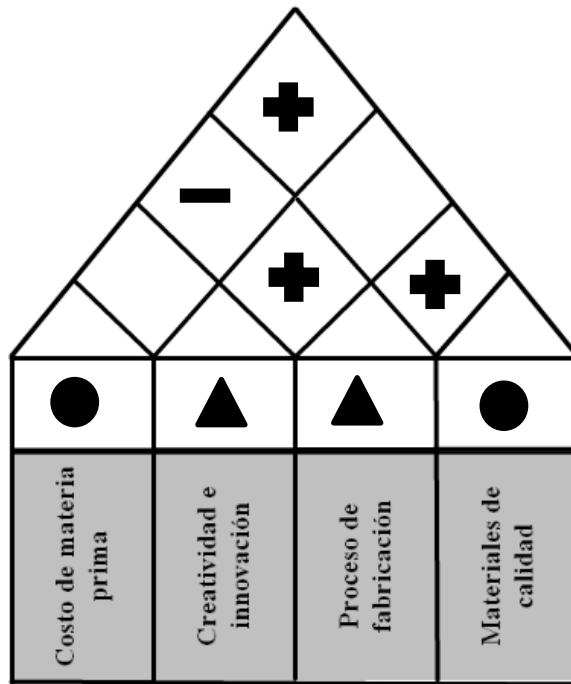


Figura 3.4 Matriz de correlaciones de los “Cómo”

Dónde:

- ▲ Depende del fabricante
- Depende de externos
- +
- Correlación positiva
- Correlación negativa

Una vez satisfechas e identificadas las necesidades del cliente se inicia el diseño conceptual y preliminar para que este contenga los detalles necesarios como lo son forma, dimensiones, tolerancias geométricas, especificación de material, acabados, recubrimientos, etc. Con el fin de ubicar las operaciones generales y factores críticos.

3.1.9 Requerimientos Técnicos

Es necesario establecer límites y metas para que este proyecto pueda ser medido, los requerimientos representan el conjunto de resultados a ser obtenidos, con la información proporcionada en la Tabla 3.7 se podrá tener una referencia y asegurarnos de que cumple con requerimientos técnicos para que este sea viable.

Tabla 3.7 Requerimientos Técnicos y su meta de diseño de proyecto

Requerimientos Técnicos	Metas de diseño
Volumen de prótesis	25 pulgadas ³
Peso de prótesis	1 kilogramo
Volumen de moldes	250 pulgadas ³
Peso de moldes	10 kilogramos
Material de construcción de moldes	Aluminio
Tiempo de fabricación del compuesto	2 horas
Ajuste de cierre del molde	± 0.005 pulgadas

3.2 Diseño Conceptual

El diseño conceptual es la parte fundamental en el proceso de diseño ya que en esta se generan las posibles opciones a tomar en cuenta para el diseño final, es aquí donde se evalúa por qué si o por qué no de la ruta a tomar (visto en Tabla 3.8). Separando las posibles etapas y variantes que en las cuales podemos elegir con el fin de tomar la ruta idónea para el proyecto, tenemos que las funciones de servicio son; el método de la fabricación de moldes, el material de los moldes, la fibra en la etapa de laminado, la resina a utilizar, el método de impregnación de resina y por último el tipo de curado.

Tabla 3.8 Funciones de servicio del proyecto

Función de Servicio	Función Técnica	A	B	C
Fabricación de moldes	Método	Cerámico	Maquinado	Fundición
Costo en molde	Material	Yeso	Aluminio	Acero
Laminado	Costo/eficiencia de la fibra	Fibra de carbono	Aramida	Polímero
	Costo/eficiencia de la resina	Resina poliéster	Resina epoxi	Resina de propileno

	Método	Impregnación manual	Moldeo por transferencia de resina	Preimpregnado
Curado	Temperatura	Temperatura ambiente	Horno eléctrico	Autoclave

En el caso del método de fabricación de los moldes ideal será por maquinado ya que de esta forma es durable y puede ser integrado por partes intercambiables, también se eligió utilizar aluminio como material para los moldes ya que es el mejor en costo/beneficio de los disponibles, la fibra elegida fue fibra de carbono por sus propiedades y fácil manejo para fabricar el compuesto, y resina epoxi por sus propiedades. El método para fabricar el compuesto será por impregnación manual debido a la facilidad y bajo costo, la temperatura de curado se eligió que sea por horno eléctrico para disminuir el tiempo de fabricación y que de esta manera sea más económica.

3.3 Materiales de trabajo

Una vez que se satisfacen las necesidades del cliente y se tiene el diseño conceptual, así como un diseño preliminar para la creación del diseño a detalle, en donde se vayan a mostrar dimensiones, formas y tolerancias, ya teniendo esto; el primer paso es la fabricación del molde para el cual el material necesario es lo que se muestre en la Tabla 3.9, para lo cual será necesario probar el molde fabricado y será necesario el material mostrado en la Tabla 3.10.

Tabla 3.9 Materiales necesarios para fabricar los moldes

Material	Cantidad	Material	Cantidad
Madera tratada (4" x 2")	6 pies	Rebabeador	1 pieza
Aluminio 6061 (4" x 2")	8 pies	Lija grano 150	2 piezas
Cortador plano de carburo (Ø 0.5")	1 pieza	Lija grano 220	2 piezas
Cortador de bola de carburo (Ø 0.5")	1 pieza	Lija grano 400	2 piezas
Cortador de bola de carburo (Ø 0.375")	1 pieza	Lija grano 600	2 piezas
Cortador de bola de carburo (Ø 0.1875")	1 pieza	Aceite WD-40	8 onzas

Tabla 3.10 Materiales necesarios para realizar la prueba de los moldes

Material	Cantidad	Material	Cantidad
Fibra de carbono 3K (50" ancho)	1 yarda	Peel ply (60" ancho)	1 yarda
Resina epoxi	150 mililitros	Film perforado (60" ancho)	1 yarda
Catalizador	15 mililitros	Material de respiración y sangrado	4 onzas
Bolsa de vacío (59" ancho)	1 yarda	Manguera de 4 mm	1 metro
Agente desmoldante	150 mililitros	Tijeras industriales	1 pieza

Cinta selladora	1 rollo		
-----------------	---------	--	--

3.4 Maquinado

Debido a cuestiones de tiempo, costo y prototipado, el primer diseño que sea considerado como viable será fabricado en madera tratada utilizando una fresadora C.N.C. previo a que un diseño final sea planteado y programado para maquinar en aluminio. En la madera tenemos muchas ventajas ya que el material es muy fácil de maquinar, pueden utilizarse velocidades y avances rápidos, el desgaste de herramienta es casi nulo y la materia prima es barata. Por otro lado, el aluminio es más costoso, existe un desgaste en la herramienta mínimo y los tiempos de maquinado son mayores a los que utilizaremos en la madera, pero la principal diferencia es la durabilidad del molde; en la madera sólo se podrá utilizar una sola vez, mientras que en aluminio se puede utilizar varias veces mientras no se dañe o deteriore el molde.

Es importante calcular las variables que se introducen al momento de programar la fresadora C.N.C., por ejemplo si la velocidad de corte es excesiva puede dar lugar al desgaste rápido de la herramienta y que por consecuencia la calidad del maquinado sea deficiente. Así como si el avance es excesivo; el riesgo de rotura de herramienta es alto y el acabado que dejara el maquinado será muy rugoso, en el caso de que el avance de la herramienta sea bajo; el desgaste de la herramienta será rápido y el tiempo de maquinado aumentaría.

3.4.1 En Madera

Las velocidades y avances en el maquinado sobre madera dependerán totalmente de la madera y de su comportamiento al maquinado, debido a la orientación de sus fibras o su compactación, ya que es muy común que en maderas que se despostillen al maquinarse con profundidades o velocidades muy altas, es por eso que lo recomendable es no utilizar una

profundidad mayor al diámetro del cortador, en revoluciones por minuto y avances utilizar los valores arrojados por los cálculos de maquinado que se muestran a continuación:

$$V_R = \frac{(SFM \ 12)}{(D_H \ \pi)} \dots\dots\dots (10)$$

$$V_R = \frac{(1200 \ 12)}{(0.5 \ \pi)} = 9167 \text{ RPM} \dots\dots\dots (11)$$

$$IPR = IPT \ N_D \dots\dots\dots (12)$$

$$IPR = (0.005)(2) = 0.01 \dots\dots\dots (13)$$

$$IPM = IPR \ V_R \dots\dots\dots (14)$$

$$IPM = (0.01) (9167) = 91 \text{ pulgadas por minuto} \dots\dots (15)$$

Dónde:

- V_R es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto (RPM)
- SFM es superficie pie por minuto
- D_H es el diámetro de la herramienta (pulgadas)
- IPR es avance por revolución de herramienta
- IPT es pulgadas por revolución de herramienta
- N_D es número de filos en la herramienta
- IPM es el avance (pulgadas por minuto)

3.4.2 En Aluminio

En el caso del maquinado en aluminio se puede tener mayor certeza de que los valores ingresados nos arrojaran los resultados deseados, no hay tanto rango de fallo como en el caso de la madera ya que el aluminio tiene mayor solidez.

$$V_R = \frac{(SFM \ 12)}{(D_H \ \pi)} \dots\dots\dots (16)$$

$$V_R = \frac{(650 \ 12)}{(0.5 \ \pi)} = 4965 \text{ RPM} \dots\dots\dots (17)$$

$$IPR = IPT \ N_D \dots\dots\dots (18)$$

$$IPR = (0.004)(2) = 0.008 \dots\dots\dots (19)$$

$$IPM = IPR \ V_R \dots\dots\dots (20)$$

$$IPM = (0.008) (4965) = 39 \text{ pulgadas por minuto} \dots\dots (21)$$

Dónde:

- V_R es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto (RPM)
- SFM es superficie pie por minuto
- D_H es el diámetro de la herramienta (pulgadas)
- IPR es avance por revolución de herramienta
- IPT es pulgadas por revolución de herramienta
- N_D es número de filos en la herramienta

- *IPM* es el avance (pulgadas por minuto)

3.5 Sumario

En este capítulo se explica la metodología del proyecto y se decidió utilizar el despliegue de la función de la calidad (por sus siglas en ingles QFD) que es un método de diseño de productos y servicios que recoge las demandas y expectativas de los clientes y las traduce, en pasos sucesivos, a características técnicas y operáticas satisfactorias. En el proceso se comienza por identificar al cliente y determinar sus requerimientos, acomodar por importancia dichos requerimientos y evaluar las características técnicas, se realizan también las funciones de servicio, todo esto para llegar a un diseño conceptual y determinar los materiales de trabajo en el maquinado, calculando las velocidades generales en el desbaste de estos materiales.

Capítulo IV

Desarrollo



4 Desarrollo

En esta parte se describen los pasos que se fueron tomando para llevar a cabo la fabricación de los moldes para al final utilizarlos y probarlos fabricando prótesis transtibiales de materiales compuestos, dichas pruebas que servirán para estandarizar el método de fabricación del compuesto, técnicas, unidades y tiempo a utilizar. Se comenzó por trabajar con la estudiante de Doctorado M. C. Miriam Siqueiros Hernández para determinar el diseño de prótesis transtibial que se utilizaría y de eso partir para el diseño de molde e irlo optimizando hasta terminar con un molde funcional, económico y fácil de utilizar.

Tomando como referencia el diseño empleado por algunos de los principales fabricantes en el ramo de prótesis a nivel mundial como lo es Össur (Islandia) y Endolite (Reino Unido), se comenzó por diseñar un prototipo de prótesis transtibial. Podemos observar algunos de los diseños de estas compañías en la Figura 4.1 y Figura 4.2.

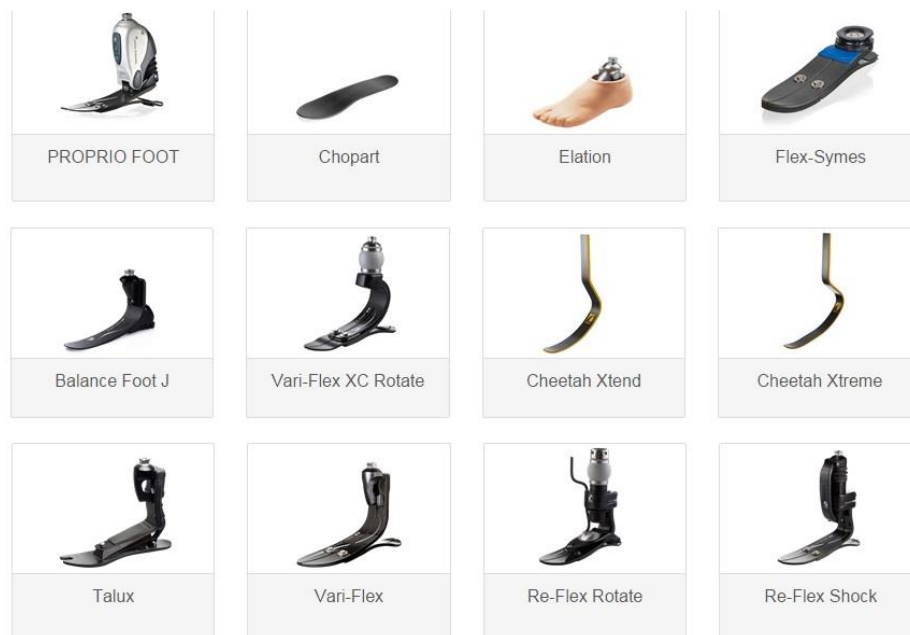


Figura 4.1 Catalogo Össur [49]

Feet



bladeXT



élan



echelonVT



echelon



elite bladeVT



eliteVT

Figura 4.2 Catalogo Endolite [50]

Después de analizar los productos que ofrecen estas compañías considerando la optimización de material, bajo peso, resistente a cargas de hasta 1627 N (persona de 166 kg), resistente al desgaste y sobre todo que tenga menor costo. El diseño en el cual nos basamos fue Vari-Flex de la empresa Össur (Figura 4.3); la cual cuenta con un diseño ligero que fácilmente se conecta a un soquet universal de rodilla.



Figura 4.3 Prótesis Vari-Flex modelo 2004

Se buscó la manera de mejorar el diseño realizado por la empresa islandesa, llegamos a un diseño práctico, complejo desde el punto de vista de la fabricación pero a su vez con muchas ventajas sobre el cual se basó. Como podemos observar en la Figura 4.4, este diseño proporciona que la carga axial que se genera con el ciclo de marcha humano este direccionado directamente a la pieza y no a la unión como se tenía en el modelo de Össur.

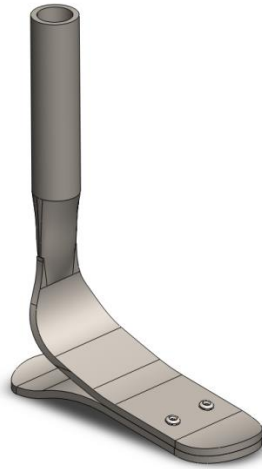


Figura 4.4 Prótesis Prototipo Rev. A

Esto nos dice que habrá que tener en cuenta la unión de la parte cilíndrica con la sección plana en el proceso de fabricación, en la Figura 4.5 podemos ver lo mencionado anteriormente. Para lo cual se deberá utilizar un corazón que dará rigidez y forma a la parte cilíndrica.

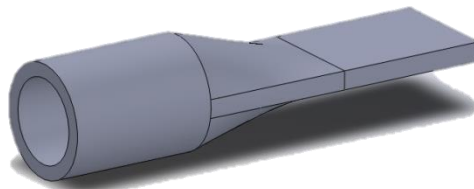


Figura 4.5 Sección media de prótesis

Este diseño se trabajó en conjunto con la compañera de doctorado M. C. Miriam Siqueiros Hernández, se llegó a dicho diseño con las dimensiones mostradas en la Figura 4.6 las cuales fueron basadas en una persona promedio de 85 kg y estatura de 1.70 cm, sólo como referencia para propósitos de diseño de molde (ver plano completo en Apéndice C)

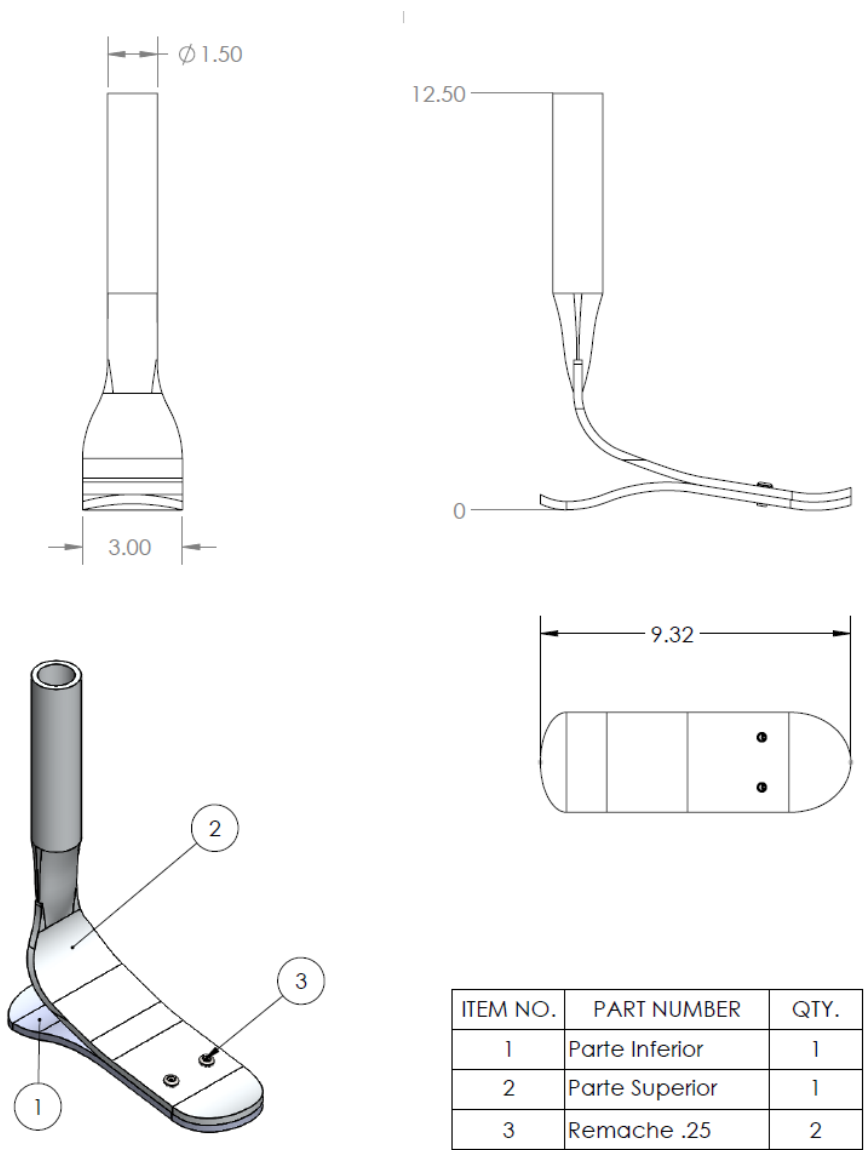


Figura 4.6 Plano de prótesis transtibial propuesto con dimensiones y componentes

4.1 Primera y segunda propuesta de molde

Con la información previa y el diseño CAD de la prótesis, continuamos por diseñar el molde para llevar a cabo la fabricación del prototipo. Se pensó en un diseño básico con el fin de tomarlo como punto de partida. Considerando la tecnología de moldes aplicada en la fabricación de polímeros llegamos a un primer diseño de molde. (Figura 4.7)

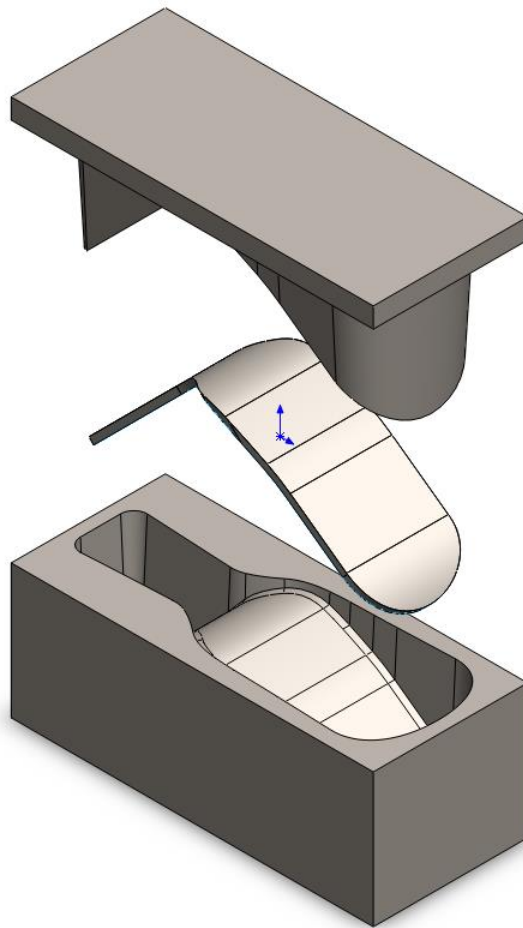


Figura 4.7 Molde Rev. 1

En este punto de partida para llevar a cabo la fabricación de la pieza nos dimos cuenta de que contaba con muchas desventajas que nos alejaban de nuestro objetivo. De primera instancia y principal problema; la materia prima con la cual se tendría que fabricar el molde tendría dimensiones de 5.75 x 5 x 13.5 pulgadas tanto en la parte de la cavidad como en la base,

complicando la parte del maquinado del molde considerando que se fabricará en Aluminio 6061 y por ello aumentando el costo de la prótesis. Otra complicación vista es que no habría manera de extender o que esto llevará a un diseño universal donde se podría lograr fabricar diversas prótesis con el mismo molde.

Debido a que se encontraron muchas inconveniencias en el diseño inicial nos vimos forzados en pensar en una mejor idea de molde para fabricar los primeros prototipos, en este punto quisimos tomar las bases que los moldes progresivos utilizan para diseñar el segundo. Ya que el realizar un molde seccionado o por partes nos brinda distintas ventajas sobre el diseño anterior como:

- Materia prima de menores dimensiones.
- Maquinado simple y sin necesidad de herramientas especiales.
- Facilidad de desmoldeo de pieza después de fase de curado.
- Viabilidad de tener extensiones para lograr molde universal.

Como se puede observar en la Figura 4.8, el molde cuenta con cuatro partes, dos de ellas son la base para la sujeción de fibras y las otras dos cierran el molde de tal forma que le dé la forma deseada a la pieza. Este molde tiene partes con menores dimensiones que las del pasado (vistas en Apéndice D) el molde está intencionado para tener una impregnación manual y aplicarle vacío para compactación del laminado.

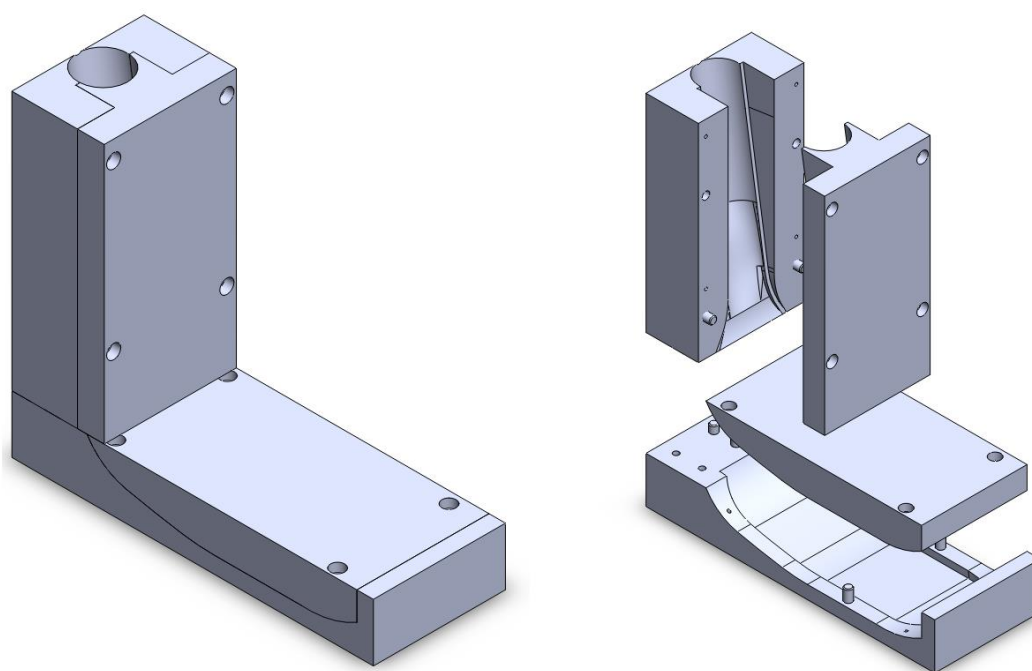
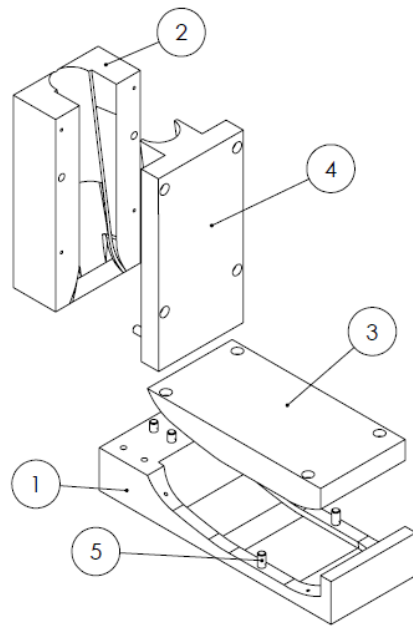


Figura 4.8 Molde Rev. 2

En la Figura 4.9 se muestra una sección del plano de ensamblaje del molde propuesto Rev. 2, el cual está planeado para fabricarse en madera debido al bajo costo, facilidad de maquinado y tiempo de fabricación, lo cual es perfecto para utilizarse como prototipo, por su contraparte tenemos el problema que solo puede ser utilizado una sola vez, ya que la resina se adhiere a la madera y a la hora de hacer el desmoldeo se daña el molde. También se le colocaron pines para localizar y hacer que el cierre del molde sea alineado manteniendo la forma de la prótesis transtibial que deseamos, por último se consideraron 4 barrenos por parte para introducir tornillos y cerrar el molde de manera que mantenga la forma que deseamos.



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Molde Inferior	1
2	Molde Lateral	1
3	Molde Inferior - 2	1
4	Molde Lateral - 2	1
5	pin	6

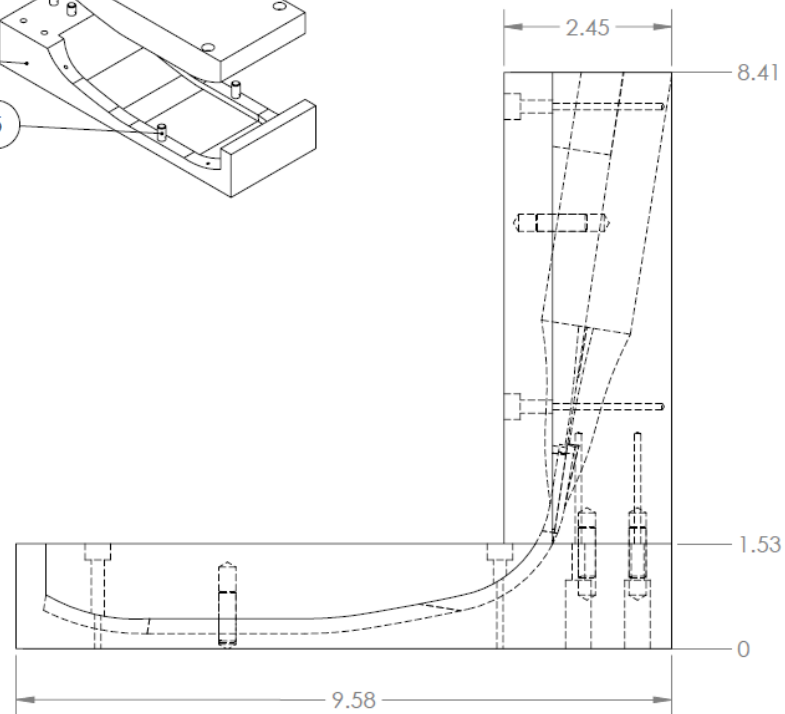


Figura 4.9 Dibujo con medidas de molde Rev. 2

4.1.1 Fabricación de molde

Una vez decidido el diseño del molde pasamos a la fabricación del molde, debido a que solo era un prototipo se trabajó con madera, la materia prima que se encontró era de 3.5 x 3.5 pulgadas. Se utilizó un programa CAM para generar el código G y maquinarlo (Figura 4.10). Las líneas mostradas en color azul son las rutas de maquinado y mostrado en rojo el contorno de la materia prima, esto para visualizar la cantidad de materia a remover y evitar problemas más adelante.

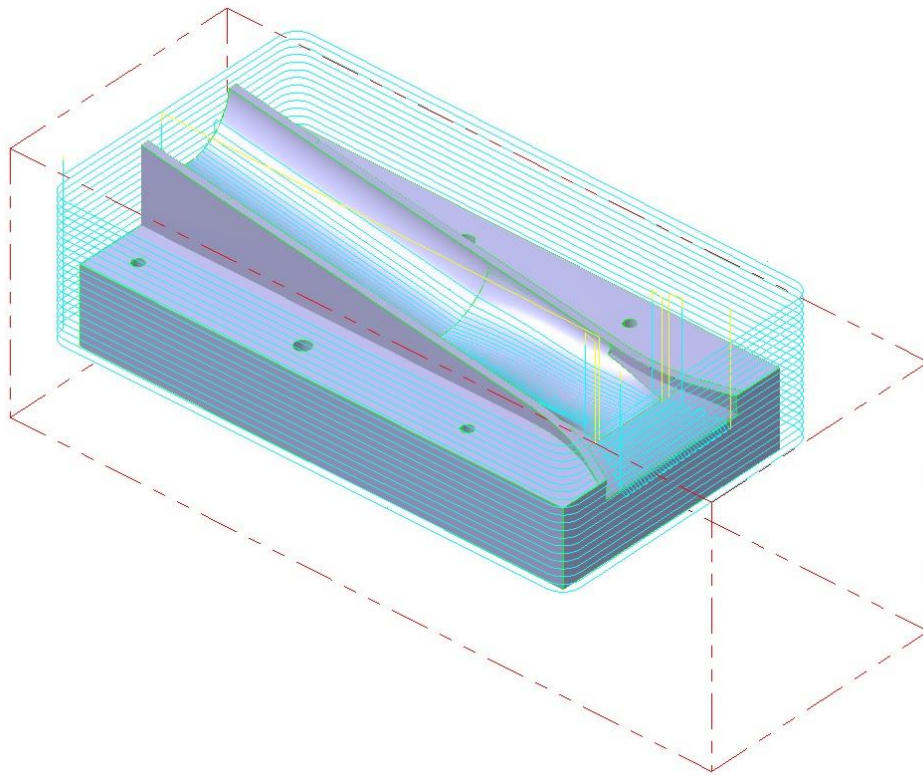


Figura 4.10 Diseño CAM utilizado para fabricar molde

Utilizando una HAAS VF-2 se maquinó el molde, en las cuatro piezas se tomó un total de 2 horas de maquinado, esto pudo haber sido más rápido pero se utilizaron avances y velocidades lentas para evitar que se despostillará la madera. La Figura 4.11 muestra la etapa del maquinado de esta primer propuesta de diseño de prótesis transtibial.



Figura 4.11 Pieza inferior de molde Rev. 2 siendo maquinada

Las piezas al terminar de maquinarse deben pasar por un proceso de detallado donde se remueve la rebaba y se le da el acabado deseado, para esto último se utilizaron lijas. También se le aplicó una capa de primer y sellador a las caras que estarían en contacto con el compuesto, esto para evitar problemas con el desmoldeo y el resultado se puede observar en la Figura 4.12.

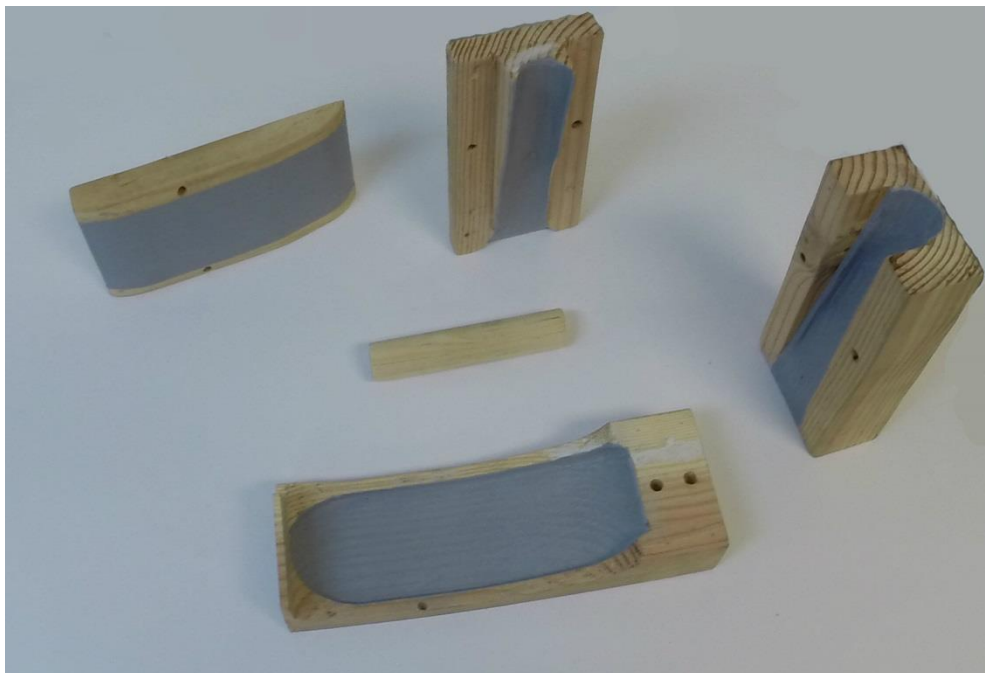


Figura 4.12 Molde Rev. 2 en madera terminado

4.1.2 Prueba del molde

Para este punto es importante asegurarse de que se cuenta con el material necesario para llevar este proceso, visto en la Figura 4.13 tenemos el material utilizado; Bomba de vacío de 1/3 caballo de fuerza, tape sellador, bolsa de vacío, peel ply, breather, agente desmoldante, resina polimérica, vacuometro, manguera, brocha y pinzas para estrangular.



Figura 4.13 Equipo necesario para vacío

También es necesario el refuerzo a utilizar en el caso de nuestro primer prototipo se utilizó fibra de carbono de 3K (tres mil hilos por manojo, hoja de datos en Apéndice A) y con orientaciones de un laminado simétrico balanceado $[90/90/45/45]_5$ para tener un compuesto cuasi-isotrópico como resultado. Se generó una geometría del compuesto proyectada en un plano para tenerla como base para el corte de la fibra de carbono como se puede observar en la Figura 4.14. Incluyendo nuestro concepto o idea de utilizar fibras continuas para evitar roturas en la parte del compuesto donde termina la parte plana y comienza la parte cilíndrica.

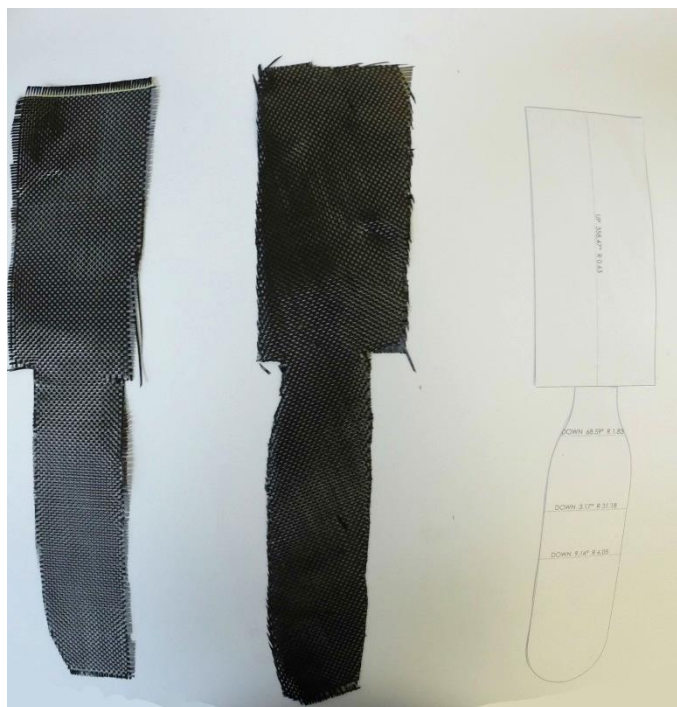


Figura 4.14 Corte de fibra de carbono para primer prototipo, 90° (izq.), 45° (medio), geometría base (der.)

Una vez teniendo todo el material listo se hizo la mezcla de la matriz, en este primer prototipo se utilizó una matriz polimérica debido a su bajo costo, se colocó el molde y se le impregno con un agente desmoldante para después continuar con la impregnación de resina en la pieza. Esta impregnación se llevó a cabo con una brocha al colocar cada capa del compuesto. Al finalizar de colocar las fibras impregnadas se cerró el molde, se envolvió en el material respirador y se colocó dentro de la bolsa para vacío, agregándole una manguera y sellando uniformemente la bolsa para evitar fugas, se le aplicó vacío a 28 in Hg y por último se estranguló la manguera con unas pinzas manteniendo el vacío y de esta manera dejar curar la pieza a temperatura ambiente.

4.2 Tercer propuesta de molde

Manteniendo el diseño de prótesis planteado desde la primera propuesta se modificó el molde para que este sea escalable, debido a que se tuvo un primer prototipo exitoso se prosiguió a llevar a cabo el tercer diseño de molde (ver Figura 4.15).

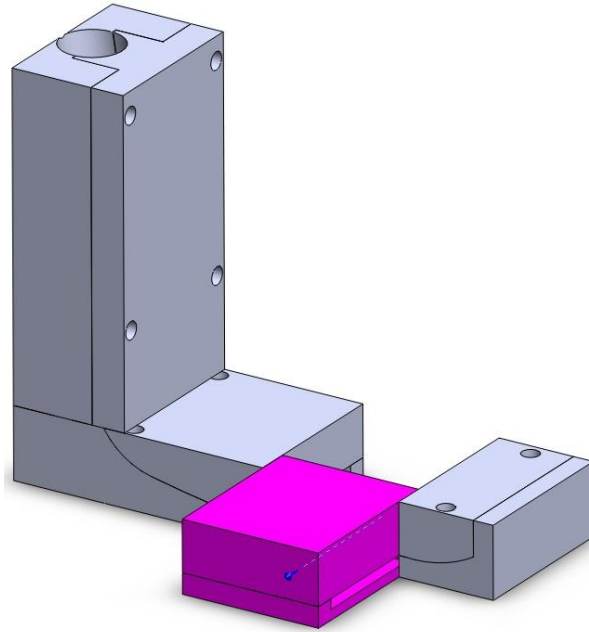


Figura 4.15 Propuesta de Molde escalable

La intención de este molde es que sea escalable, esto es, que mediante el intercambio de ciertas piezas se pueda modificar la medida del molde para que la prótesis cumpla con ciertas medidas y sea más adecuada para el paciente. En la Figura 4.16 se muestra el molde Rev. 3 diseñado con la idea mencionada anteriormente, donde las partes azules son las intercambiables para cambiar la dimensión ya sea de la parte tubular o del largo de la prótesis, el diseño se realizó considerando ser maquinado en aluminio 6061, debido a la facilidad con la cual se puede maquinar, su costo, sus propiedades mecánicas, etc. En este también se añadió la manera con la cual se ensamblaran, esto es tendrá sujeciones por medio de tornillos $\frac{1}{4}$ -20 y 8-32, así como pernos que funcionaran de guía de $\frac{1}{4}$ de diámetro.

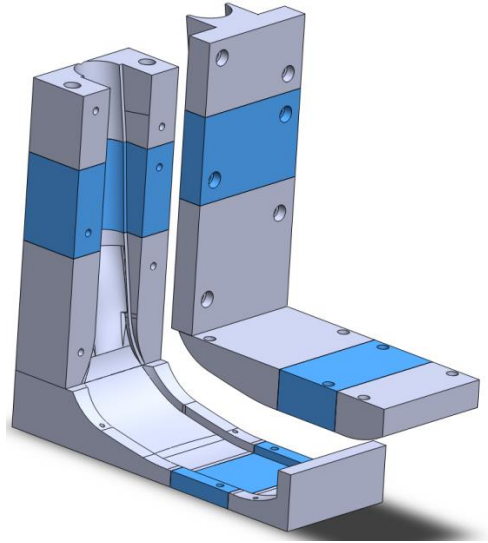


Figura 4.16 Molde superior Rev. 3

Con este diseño se continuó con la parte inferior como se muestra en la Figura 4.17 donde se muestran con azul las piezas que pueden ser reemplazadas para que igualando la dimensión de la parte superior del molde se obtenga una prótesis transtibial con la longitud adecuada al pie del paciente.

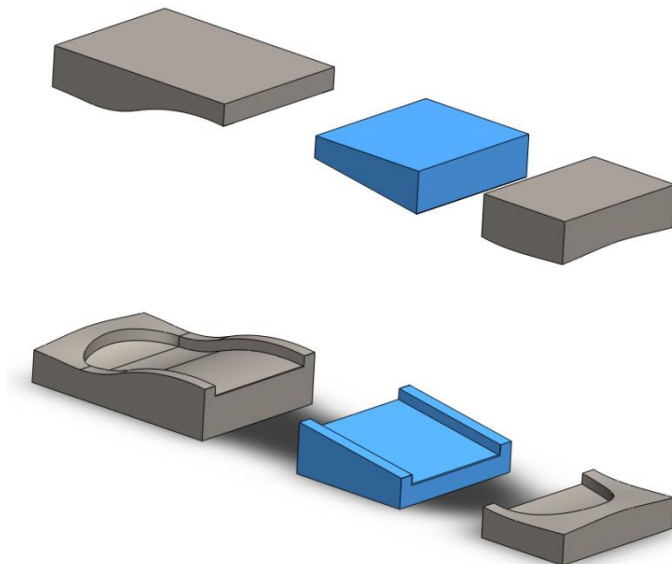


Figura 4.17 Molde inferior Rev. 3

En las siguientes figuras; se muestra los planos de los ensambles del molde superior (Figura 4.18) y molde inferior (Figura 4.19), el molde superior ensamblado tiene una medida de 9.41 pulgadas en su largo y 9.58 pulgadas en su alto, el molde tiene una medida de 3.75 pulgadas en el ancho de todos sus componentes. El molde superior tiene 12 componentes y el molde inferior 6 componentes.

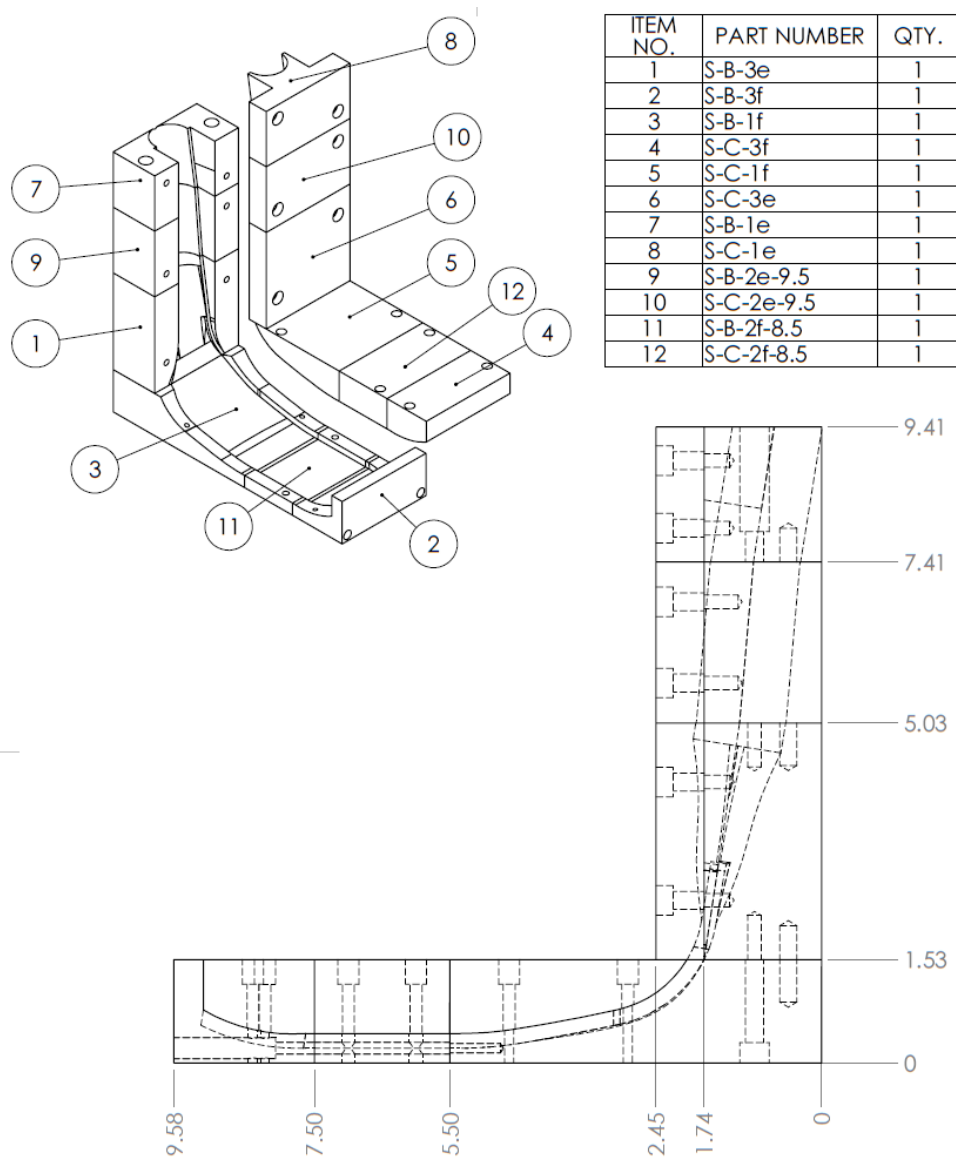
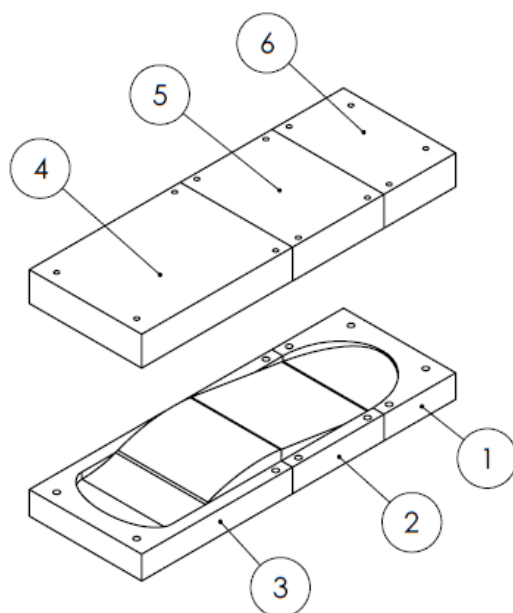


Figura 4.18 Dibujo de molde superior con dimensiones y componentes Rev. 3



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	I-C-3	1
2	I-C-2-9.5	1
3	I-C-1	1
4	I-B-3	1
5	I-B-2-9.5	1
6	I-B-1	1

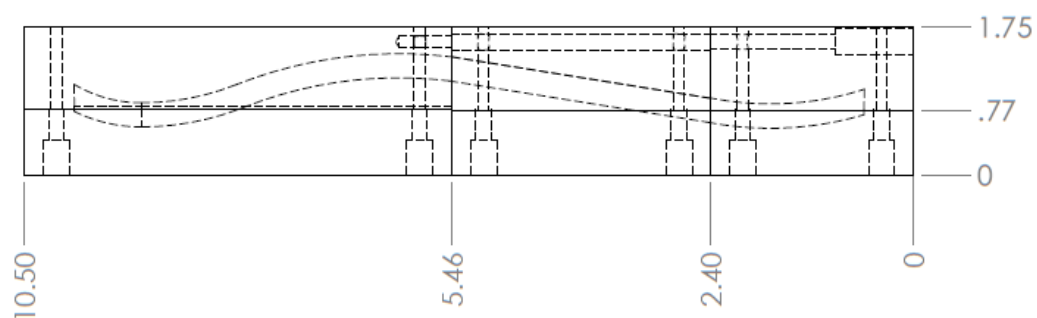


Figura 4.19 Dibujo de molde inferior con dimensiones y componentes Rev. 3

4.2.1 Fabricación del molde

Al igual que la segunda propuesta de molde se utilizó un programa CAM para generar las rutas y el código G necesario para la fabricación de esta propuesta de molde en aluminio partiendo del diseño CAD. En esta ocasión las condiciones y velocidades utilizadas fueron distintas a las anteriores, ya que en el aluminio las velocidades de corte varían. Las velocidades se basan en el SFM del material (visto en el Apéndice B) el fabricante de la herramienta nos indica que la madera se programará usando SFM de 980 a 1300 pies/minuto y el aluminio de hasta 1000 pies/minuto.

Para esta parte se utilizó el software MasterCAM en el cuál se indicaron los pies por minuto del material (SFM) para programar sus revoluciones por minuto y velocidad de avance de corte. Si observamos la Figura 4.20 observamos que para esa operación se utilizó un SFM de 750 pies/minuto sin superar los 1000 que nos indicaba el fabricante de la herramienta, se utilizó 750 ya que el cortador estaba un poco desgastado y no había necesidad de ser tan agresivos en el desbaste de material.

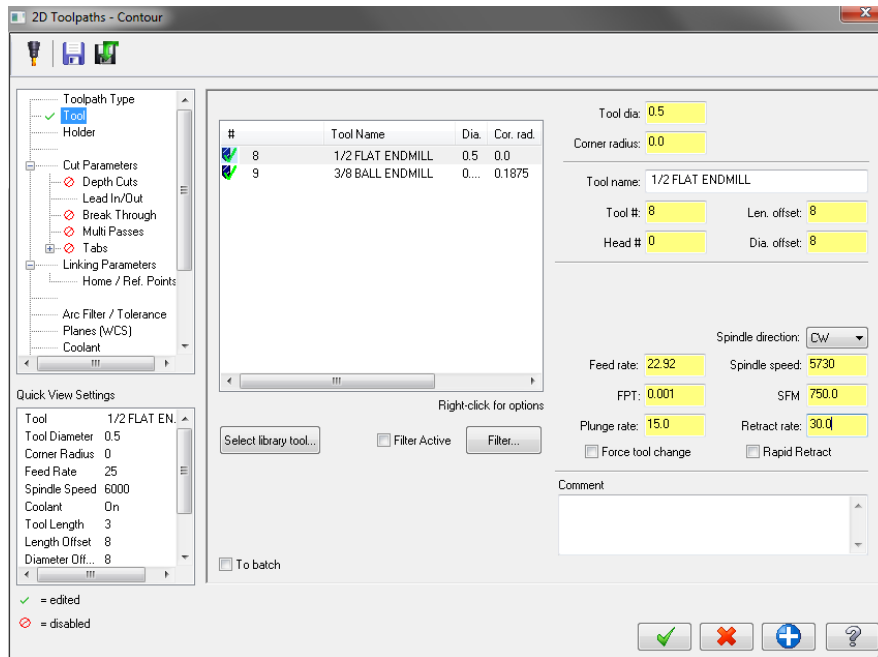


Figura 4.20 Ventana de MasterCAM para configurar operaciones de maquinado

Una vez realizadas todas las operaciones se generaron las rutas del maquinado para revisar y simular la pieza asegurándose de que saldrá bien, el software nos arroja un tiempo estimado de fabricación de la pieza el cuál era de 25 minutos.

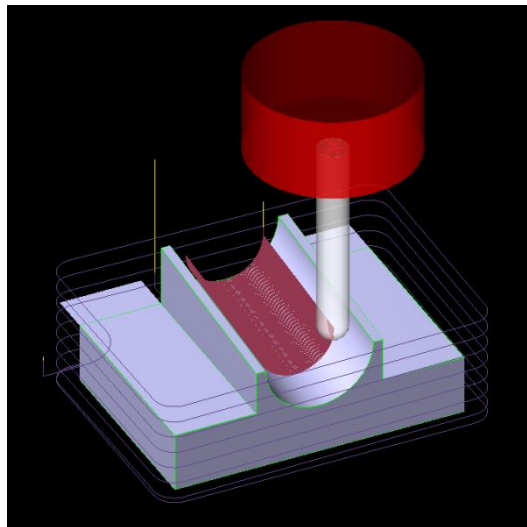


Figura 4.21 Ruta simulada en MasterCAM

Una vez que se revisó y simuló el programa de maquinado, el siguiente paso era generar el código de maquinado, para la fabricación del molde se utilizó una fresadora CNC marca

HAAS modelo VF-9 donde se fabricaron las piezas del molde, utilizando de materia prima una barra de aluminio 6061 de 4 x 2 pulgadas. (Ver Figura 4.22)

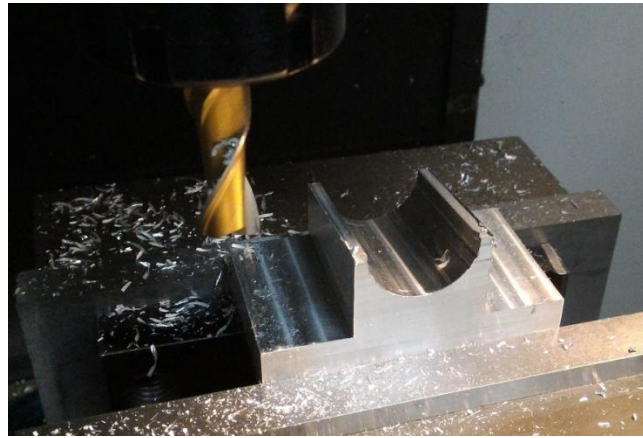


Figura 4.22 Maquinado de pieza de molde Rev. 3

Para el proceso de maquinado se utilizaron cortadores de diferentes medidas, tanto cortadores planos y de bola de carburo, así como algunas brocas de cobalto para los barrenos. Los cortadores planos contaban con un recubrimiento de Nitruro de titanio el cual le brinda mayor vida a la herramienta reduciendo el desgaste, ver Figura 4.23.



Figura 4.23 Cortadores utilizados para el maquinado del molde

Los cortadores de bola son utilizados para operaciones tridimensionales así como para dejar un radio en la orilla del maquinado de una cavidad, en este caso se utilizaron para ambos (Figura 4.24), por un lado dar la forma del interior de las cavidades y por otro dejar un radio en

la parte interna del molde. En este caso los cortadores de bola utilizados eran de carburo y no contaban con ningún recubrimiento, los utilizados fueron de 0.5", 0.250" y 0.1875".



Figura 4.24 Cortadores de bola utilizados para fabricación del molde

Una vez terminadas todas las piezas del molde se utilizaron tornillos para unir y fijar el molde completo como se ve en la Figura 4.25 (parte superior) y en la Figura 4.26 (parte inferior), ya ensamblado se lijaron algunas impurezas y se dejó un mejor acabado en las superficies que estarán en contacto con el compuesto.

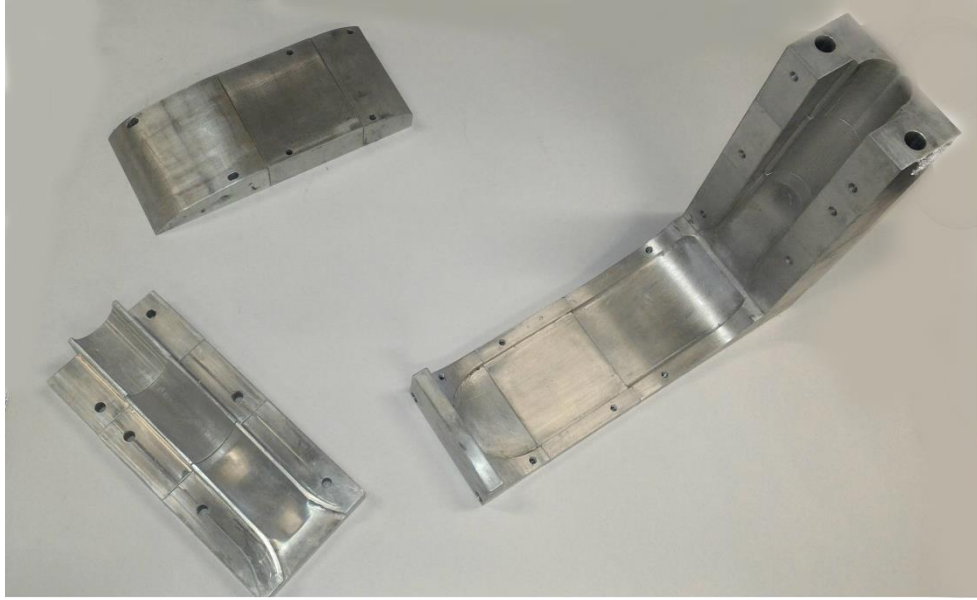


Figura 4.25 Molde superior terminado



Figura 4.26 Molde inferior terminado

4.2.2 Prueba de molde

El primer paso para llevar a prueba el molde y realizar un compuesto es recortar todo el material a la medida necesaria (ver Figura 4.27) en el caso de la bolsa de vacío se deben considerar las medidas del molde y con estas medidas cortar la cinta adhesiva doble cara, también se debe cortar el material de respiración/sangrado. En el caso de la fibra de carbono se cortó con la configuración vista en la Figura 4.28, de tal forma que sea un laminado simétrico balanceado con las orientaciones mostradas.



Figura 4.27 Fibra de carbono cortada previo a la fabricación del compuesto

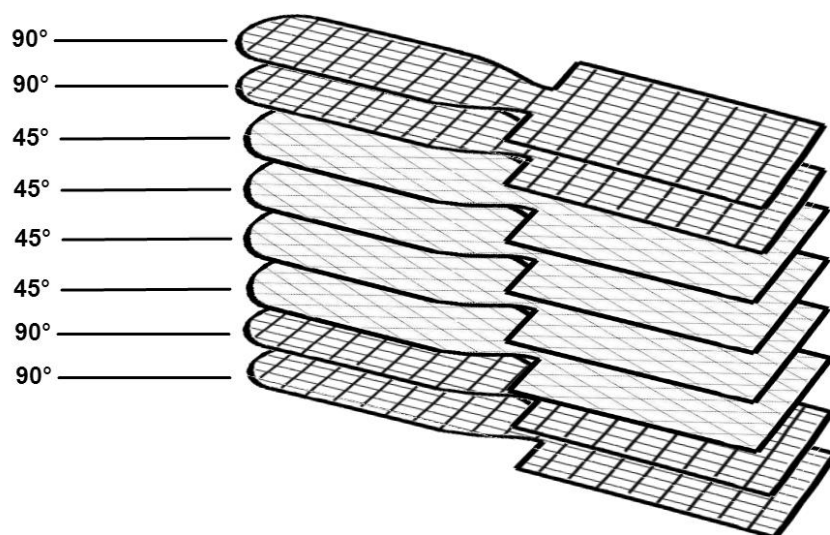


Figura 4.28 Orientación de las fibras de carbono y su geometría de corte

Se utiliza una cera como agente desmoldante, de la cual se tienen que aplicar varias capas dejando un par de minutos entre la aplicación de cada capa para que se adhieran correctamente, al haber aplicado 4-5 capas y ver que la capa de cera sea uniforme en la superficie que dará forma al compuesto como se observa en Figura 4.29.



Figura 4.29 Aplicación de cera al molde en etapa de preparación del molde

Previo a la aplicación de resina epoxi y capas de fibra de carbono se llevó a cabo la mezcla de resina epoxi y el catalizador, donde primero se vertió la resina epoxi en una proporción de 90-10, calculados para este compuesto fueron 128 gramos de resina epoxi y 13 gramos de catalizador, los cuales se precisaron usando una báscula digital como se observa en la Figura 4.30.

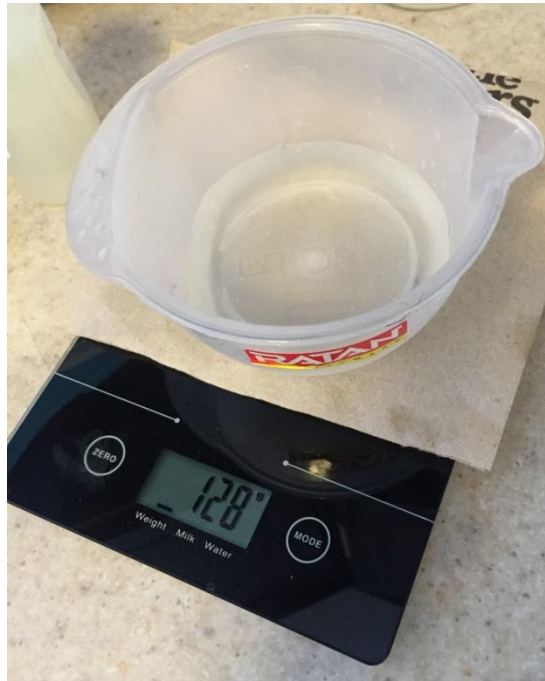


Figura 4.30 Báscula digital para medir mezcla de resina epoxi y catalizador

Para esta prueba se llevó a cabo utilizando la técnica de impregnación manual, en la cual se fueron colocando las fibras y una capa de resina epoxi encima de cada capa de fibra de carbono visto en la Figura 4.31 .



Figura 4.31 Aplicación de resina epoxi después de colocar fibra de carbono

Una vez terminada esta aplicación de resina, se continúa con la parte tubular de la prótesis transtibial, en donde se utiliza un corazón y se le va envolviendo para tener una parte tubular del compuesto. Hecho esto, se cierra el molde comenzando con la parte superior y apretando los tornillos de tal forma que se cierre el molde. Como se observa en la Figura 4.32 se va cerrando el molde, una vez acomodadas las contrapartes se cierra usando una llave Allen hasta que este quede bien alineado y sellado.



Figura 4.32 (Izq.) Colocando contrapartes en molde. (Der.) Cerrando molde con tornillos

Ya finalizado esto, se mete el molde a la bolsa de vacío envuelto por el material para respiración/sangrado y la bolsa de vacío debe de ser sellada completamente y se debe de conectar la manguera a la bomba de vacío, estrangulándola una vez visto que el nivel de vacío se detiene y de haber estado sellada la bolsa correctamente, debe de mantener el vacío como se observa el molde superior en la Figura 4.33.y el molde inferior en la Figura 4.34.



Figura 4.33 Molde superior cerrado, sellado y estrangulado al vacío previo a etapa de curado



Figura 4.34 Molde inferior cerrado, sellado y estrangulado al vacío previo a etapa de curado

Ya que se tiene el molde al vacío, se deja curar a temperatura ambiente durante 24 horas, al cumplir este tiempo se abre la bolsa, posteriormente se va desatornillando el molde. Aquí es importante retirar las contrapartes del molde lentamente para no dañar el compuesto o en caso de que se haya adherido no hay que forzarlo como se puede ver en la Figura 4.35. En caso de que haya adherencia entre resina-molde se utiliza alguna espátula para separar el compuesto del molde.

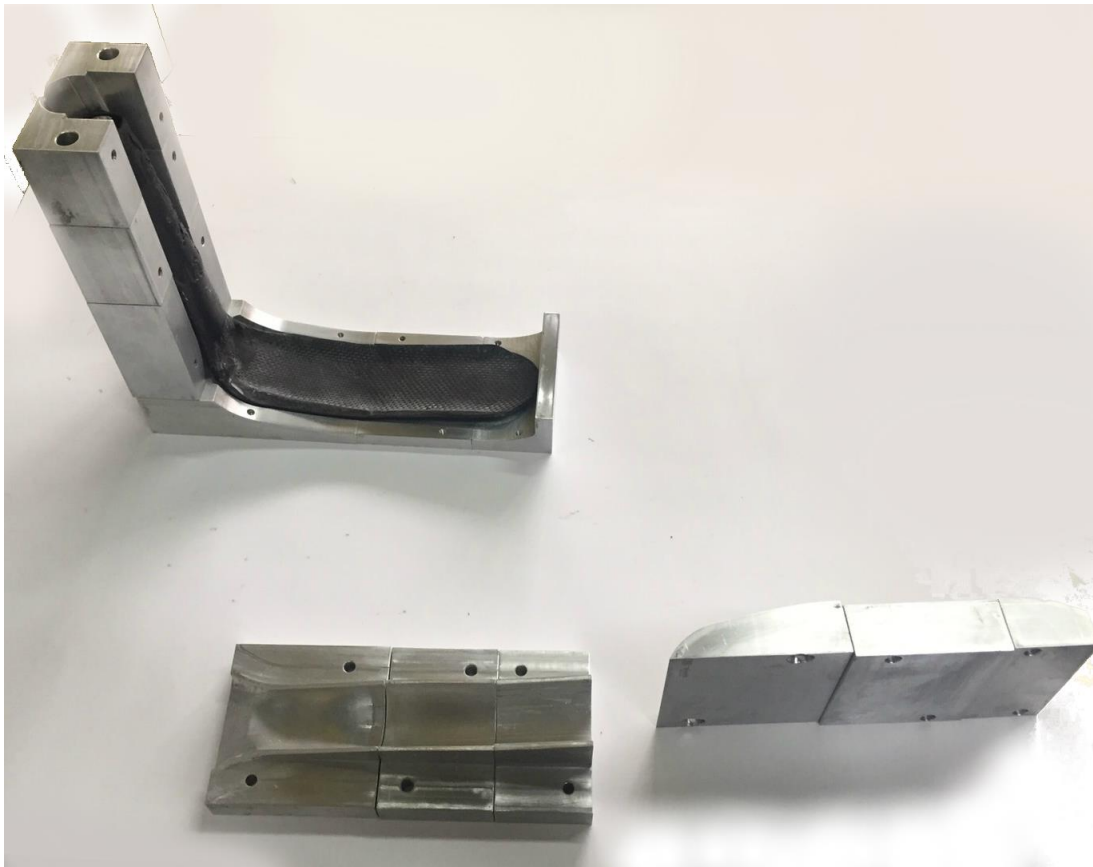


Figura 4.35 Molde superior con las contrapartes retiradas al momento de desmoldeo

4.3 Sumario

En este capítulo (Desarrollo) se abordó todo el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo del proyecto, comenzando por el diseño de la prótesis transtibial con la ayuda de la estudiante de Doctorado M. C. Miriam Siqueiros Hernández, con ello se determinó una primera y segunda propuesta de molde para fabricar el compuesto (prótesis transtibial), dicha segunda propuesta se mecanizó en madera para realizar un prototipo y ver la viabilidad del proyecto.

Se propuso un tercer diseño mejorando varios factores del previo, este se diseñó y maquinó en aluminio con la idea de un molde escalable, por último se realizó la prueba de dicho molde de aluminio para estandarizar el proceso de fabricación del compuesto y obtener los mejores resultados.

Capítulo V

Resultados



5 Resultados

En este capítulo se explica la idea del molde para prótesis transtibial de material compuesto y sus partes intercambiables para facilitar y economizar la fabricación de estas prótesis, también se desglosan los costos involucrados de la fabricación de los moldes y de la fabricación del compuesto con el fin de obtener un precio por prótesis, la idea del molde intercambiable aplica para cierto rango de personas debido a la limitación en dimensiones, en este caso son solo dos dimensiones que pueden ser alargadas o acortadas según sea el caso del paciente.

También analiza el caso térmico del molde en la etapa de curado del compuesto, en específico en la superficie de contacto entre el molde y el compuesto (parte interna), con esto sabremos si los espesores utilizados en el molde son los ideales considerando el tiempo de maquinado y dimensiones de desbaste del aluminio. Así mismo se realizaron cálculos de vacío para el volumen que se está manejando por prótesis para evitar que haya un sobre vaciado de resina o que no se llegue al punto necesario provocando que las propiedades mecánicas de la prótesis se vean afectadas.

5.1 Molde progresivo y costos

En la última propuesta de diseño que se planteó el molde para la prótesis transtibial tanto superior como inferior cuentan con partes intercambiables, es por ello que nos referimos a los moldes como progresivos ya que pueden crecer o disminuir según sean las características del paciente. En esta parte se explicará esta idea y se analizarán los costos del proyecto.

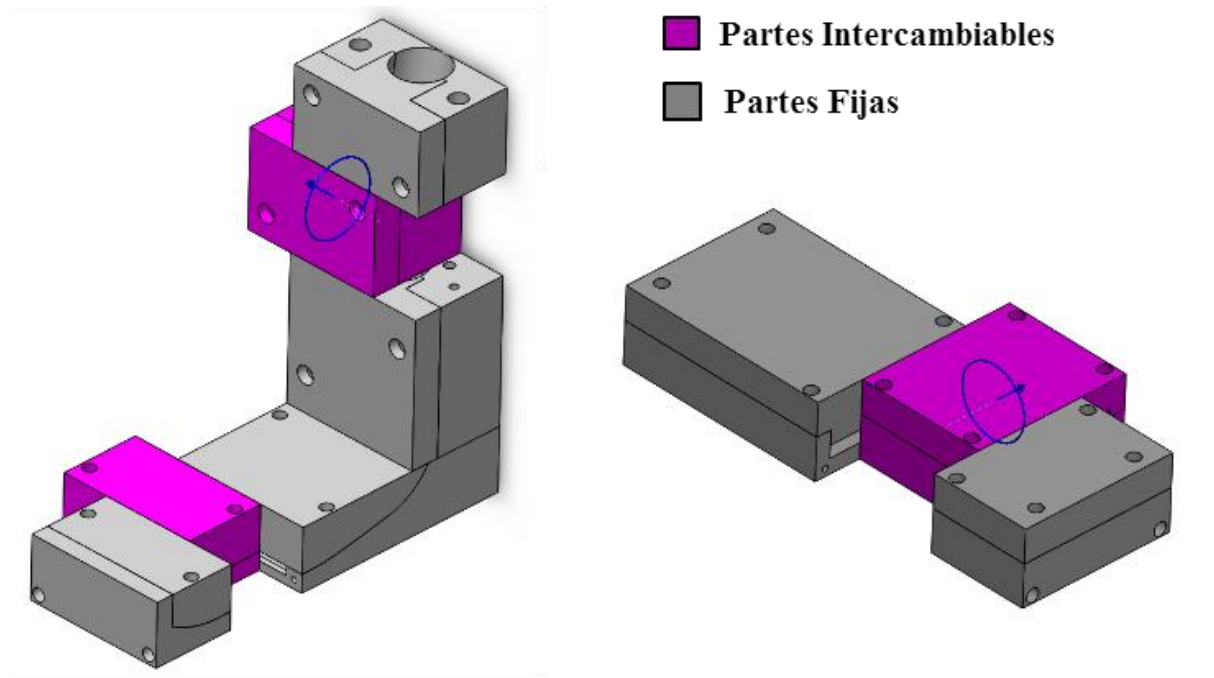


Figura 5.1 Molde progresivo, superior (izq.) e inferior (der.)

Como se observa en la Figura 5.1 se muestran los moldes con las piezas que serán intercambiables marcadas con color rosa, con la intención de que la fabricación de prótesis transtibial sea estándar, que entre uno y otro paciente en lugar de fabricar un molde nuevo según las dimensiones necesarias para dicho paciente sólo se tenga que fabricar ciertos componentes con la intención de alargar o acortar las secciones medias de la prótesis. Por lo tanto analizaremos los costos en dos instancias: costo inicial en cierto rango de dimensión y el costo para un 2do paciente donde solo habrá que fabricar los componentes intercambiables para adecuarlos a las dimensiones del nuevo paciente.

Para el caso de un 2do paciente habría que cambiar 6 componentes de un total de 18 componentes que suman ambos moldes, explicándolo en volumen tenemos que ambos moldes suman un total de 163.74 pulgadas cúbicas y las partes intercambiables suman 43.32 pulgadas cúbicas, siendo el 26.5% del molde. En términos de tiempo; si maquinar todo el molde nos toma 8 horas en la máquina CNC, las partes intercambiables nos toman 2 horas.

En la Figura 5.2 se muestra el molde superior seccionado donde se indican las dimensiones fijas del molde y cuáles son las dimensiones variables asumiendo que la amputación del 2do paciente fue más abajo o arriba en comparación de la del primer paciente, así como se puede tener un alargamiento de la prótesis para brindar mayor estabilidad al paciente.

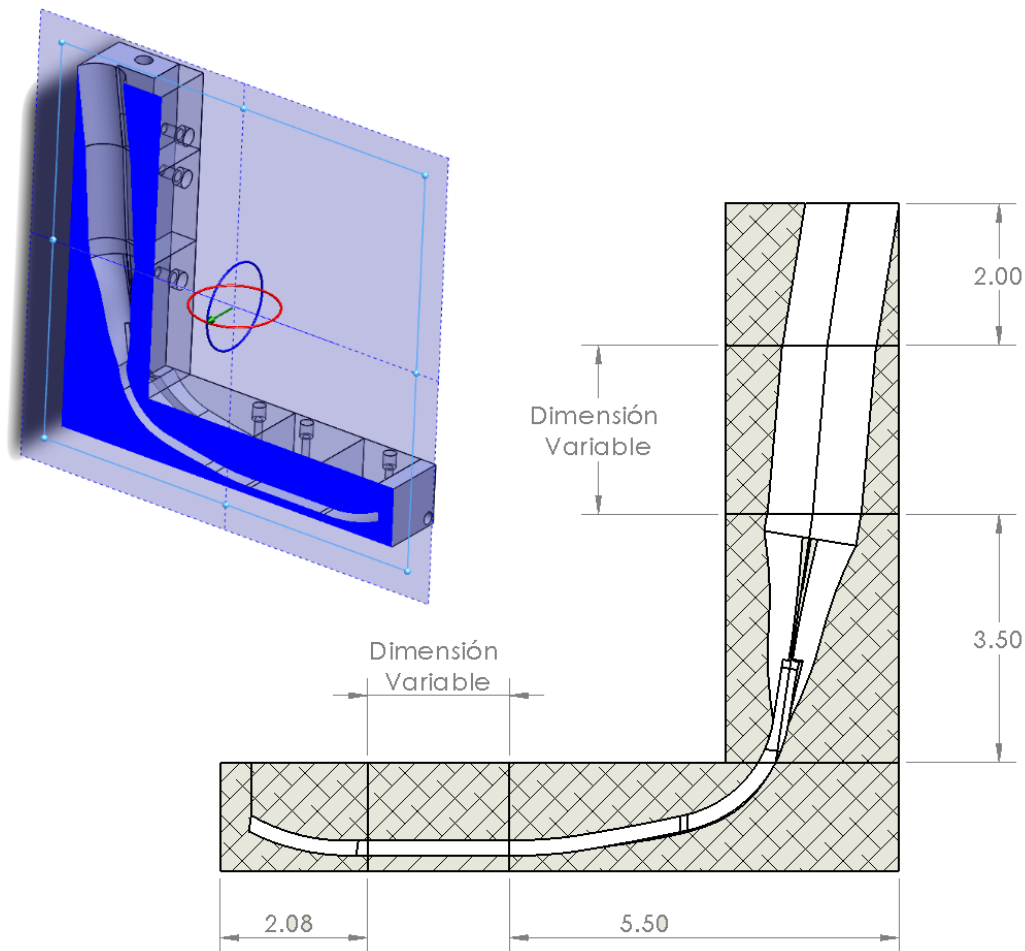


Figura 5.2 Molde superior seccionado explicando la dimensión variable

En el caso de la Figura 5.3 se muestra la dimensión variable; la cual será relativa a la parte superior con el fin de poder ensamblar ambas partes y que sean compatibles.

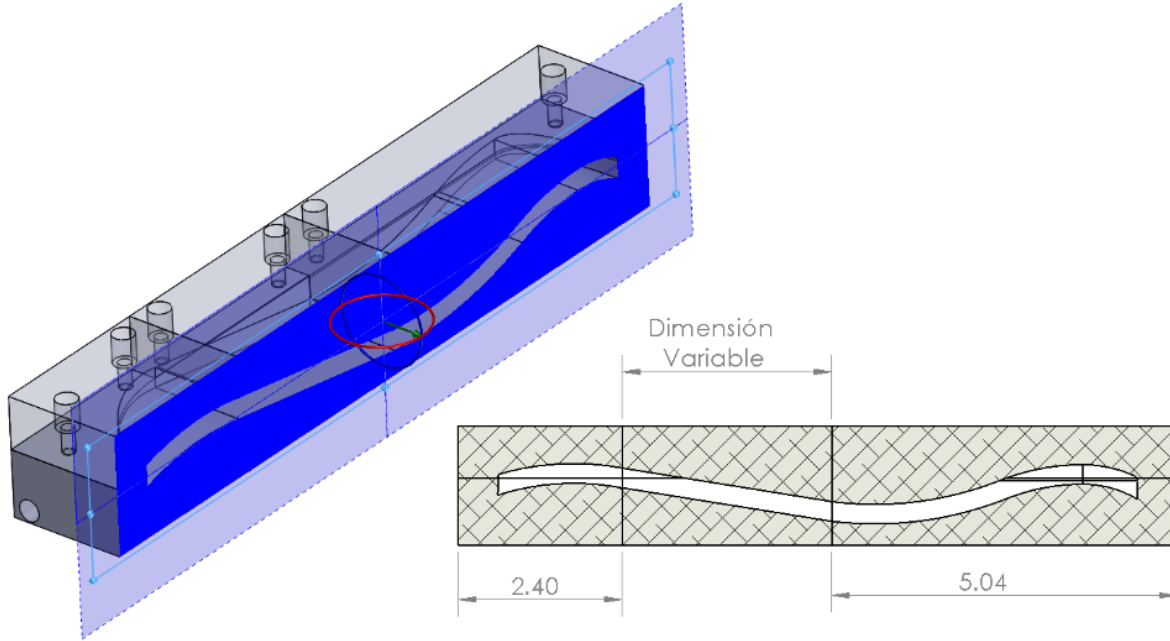


Figura 5.3 Molde inferior seccionado explicando dimensión variable

5.1.1 Costo inicial de moldes

Como costo inicial nos referimos a los costos de la fabricación del molde desde cero, partiendo de la compra de la materia prima y la manufactura de los 18 componentes totales para la fabricación de la prótesis transtibial de material compuesto,

A continuación se muestra en la Tabla 5.1 los costos desglosados de la fabricación de moldes partiendo desde cero, considerando la compra de materia prima y herramientas para llevar a cabo el maquinado del molde.

Tabla 5.1 Costo de materiales para fabricación de moldes (pesos)

Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Costo Total
Aluminio 6061 4"x2"	3	pies	\$ 1,750.00

Cortador plano Ø 1/2"	1	pieza	\$ 214.00
Cortador bola Ø 1/2"	1	pieza	\$ 292.00
Cortador bola Ø 3/8"	1	pieza	\$ 132.00
Cortador bola Ø 3/16"	1	pieza	\$ 165.00
			\$ 2,553.00

Posterior al tener la materia prima los gastos que le acompañan son los que involucran al proceso de manufactura de los moldes, para ello se puede observar en la Tabla 5.2. Tomando en cuenta que con estas dos tablas tenemos como resultado los moldes tanto superior como inferior terminados para realizar una prótesis transtibial de material compuesto. Como registro de tiempos tomamos de referencia los dados por el software de maquinado MasterCAM la cual cuenta con esta información una vez programadas las rutas, avances y velocidades; cómo visto en la Figura 5.4. Estos tiempos corresponden a tres componentes de los moldes aleatorios.

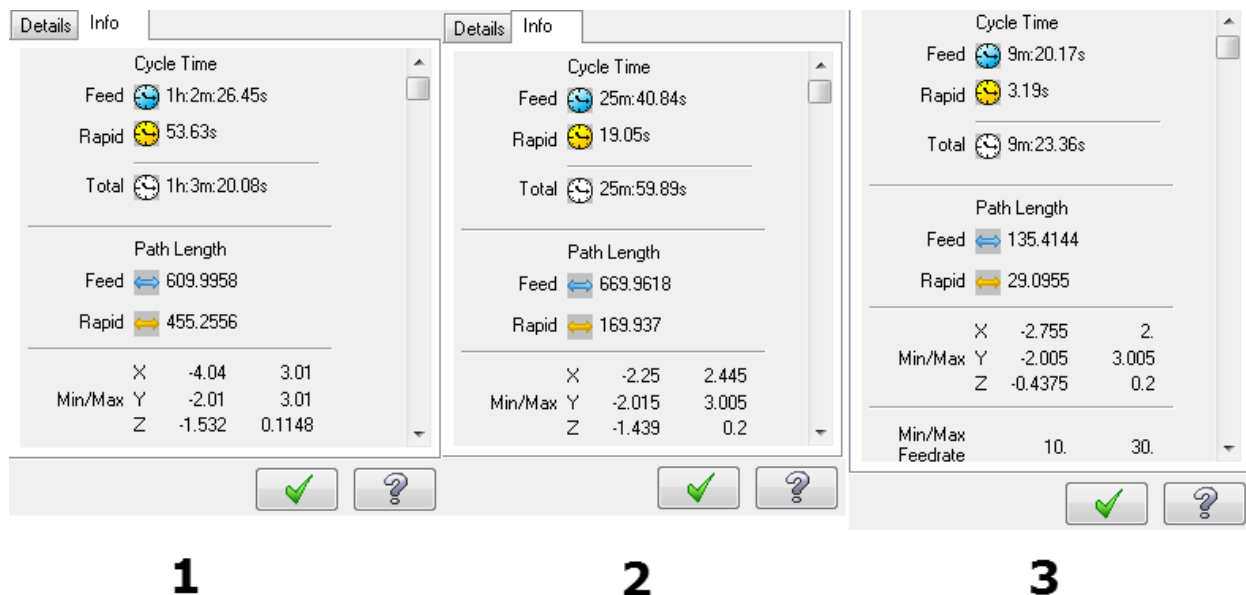


Figura 5.4 Tiempos de maquinado de tres componentes diferentes

Tabla 5.2 Costos de proceso de manufactura de moldes (pesos)

Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Costo Total
Tiempo de maquinado	8.15	horas	3260
Tiempo de recurso humano	16	horas	960
			\$4,220.00

5.1.2 Costo del molde de un 2do paciente

Al referirnos al costo de molde para un 2do paciente nos referimos a lo que involucra la manufactura de los componentes intercambiables para una 2da persona con medidas diferentes a las del primer paciente, este costo aplicaría de igual forma para un 3er, 4to, 5to paciente, etc.

Como podemos observar en la Tabla 5.3 se muestra el costo que involucra para la fabricación de las piezas intercambiables del molde para un 2do paciente, donde sólo se considera el costo de la materia prima, tiempo máquina y horas hombre.

Tabla 5.3 Costo de manufactura de molde para un 2do paciente

Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Costo Total
Aluminio 6061 4"x2"	1.5	pies	\$ 875.00
Tiempo de maquinado	2.45	horas	\$ 980.00
Tiempo de recurso humano	3	horas	\$ 180.00
			\$2,035.00

5.1.3 Costo de fabricación del compuesto

Con los moldes terminados podemos continuar con la fabricación del compuesto, esto es, usar los moldes para obtener las piezas para la prótesis transtibial de material compuesto. Donde se consideran los materiales utilizados en la impregnación y curado, como se muestra en la Tabla 5.4 el costo aproximado por prótesis es de \$513 pesos, esto sólo considerando el material utilizado por prótesis en la fabricación del compuesto y sin considerar el costo de la persona entrenada u ortopedista que podrían fabricar la prótesis.

Tabla 5.4 Costo de material para compuesto por prótesis

Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Costo Total
Fibra de carbono 3k (50" ancho)	1	pie	\$ 263.73
Resina epoxi	150	mililitros	\$ 68.58
Catalizador	15	mililitros	\$ 4.95
Bolsa de vacío (59" ancho)	1	pie	\$ 38.50
Agente desmoldante	150	mililitros	\$ 16.18
Peel ply (60" ancho)	1	pie	\$ 33.00
Film perforado (60" ancho)	1	pie	\$ 33.00
Material de respiración y sangrado	0.5	onzas	\$ 16.50
Manguera 4mm	1	metro	\$ 11.40
Cinta selladora	6	rollo	\$ 27.72
			\$513.55

5.1.4 Costo total de prótesis según el número de pacientes

Esta es la parte importante donde ya podemos calcular el costo de cada prótesis transtibial fabricada utilizando los moldes planteados en este trabajo por paciente, donde el costo de fabricación de cada prótesis estará calculado como se ve en la siguiente formula:

$$C_p = \left(\frac{C_I + C_M}{N_{Px}} \right) + C_C + C_{2px} \dots\dots\dots (22)$$

Dónde:

- C_p es el costo de la prótesis por cliente
- C_I es el costo inicial de los moldes (considerando materia prima)
- C_M es el costo del proceso de manufactura de moldes
- N_{Px} es el número de pacientes
- C_C es el costo de la fabricación del compuesto
- C_{2px} es el costo de la fabricación del molde para un nuevo paciente

Con ellos obtuvimos los resultados de la Tabla 5.5, con dicha información se generó la gráfica de la Figura 5.5 donde se muestra como el costo disminuye notablemente entre mayor sea el número de pacientes.

Tabla 5.5 Costo de prótesis por paciente

Paciente #	Costo
1	\$9,321.55
2	\$5,935.05
3	\$4,806.22
4	\$4,241.80
5	\$3,903.15
6	\$3,677.38
7	\$3,516.12
8	\$3,395.18
9	\$3,301.11

10	\$3,225.85
11	\$3,164.28
12	\$3,112.97

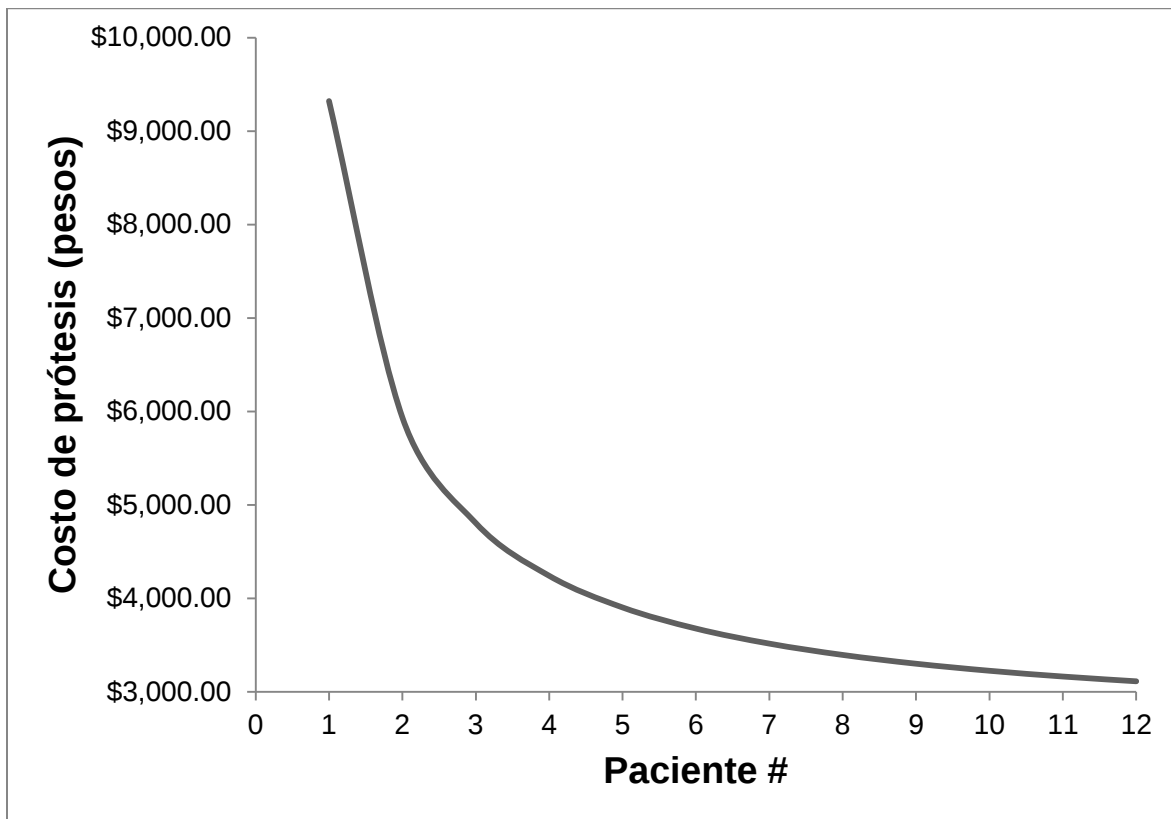


Figura 5.5 Gráfica de costo de prótesis por paciente

5.2 Ensamble de prótesis transtibial de material compuesto

Una vez que se tienen las partes de la prótesis (superior e inferior) se planea utilizar remaches especiales de aluminio con recubrimiento anodizado para evitar la corrosión galvánica que se pueda generar por el contacto de la fibra con el metal. Como se muestra en la Figura 5.6 la parte inferior y superior de material compuesto empalman en su sección plana y es aquí donde se planea insertar los remaches.

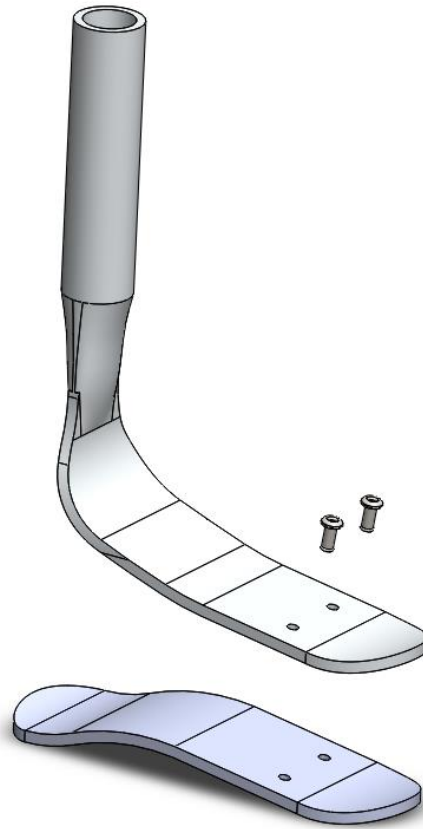


Figura 5.6 Ensamble prótesis transtibial (vista explotada)

5.3 Análisis térmico en etapa de curado

Utilizando el método de elemento finito (MEF) se analizara el molde planteado para evaluar la etapa de curado del compuesto mediante el análisis térmico de este cuando es curado a temperatura ambiente y cuando es curado con horno. El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo de sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

El proceso de resolución consiste en calcular el campo de temperaturas en todo el sólido (problema térmico) y estas temperaturas serán las cargas de entrada del problema. En lo que respecta al problema térmico, la variable de interés es la distribución de temperaturas en el proceso de curado del compuesto, los resultados del análisis térmico son las temperaturas para cada instante de tiempo, tratándose por tanto de un análisis térmico transitorio. En el proceso de enfriamiento se produce evacuación de calor mediante convección, radiación y conducción.

Por medio de conducción, la cual ocurre cuando hay un diferencial de temperatura a lo largo del elemento, el calor fluye de la región caliente a la región fría, esta energía dependerá del diferencial, del área transversal del material del componente y la conductividad térmica del componente, todo en dirección normal a la energía y es inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria.

El análisis térmico será transitorio ya que nos interesa la distribución de temperaturas a lo largo de la etapa de curado (tiempo) en el área de contacto del molde con el compuesto. En este estudio los valores de entrada para materiales con propiedades isotrópicas serán los observados en Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Propiedades térmicas en materiales isotrópicos

Símbolo	Descripción	Aplicación
ρ	Densidad de masa	Transitorio
c	Calor específico	Transitorio
k	Conductividad térmica	Estático y transitorio

Un procedimiento para simplificar la solución es considerar que el sólido pueda variar su temperatura, pero que todo su interior se encuentre a la misma temperatura, debido a que su resistencia interna sea nula o despreciable, por ser sustancias muy conductoras, como los metales, o el caso de recipientes conteniendo líquidos con convección que homogenice su

temperatura. Se supone que el flujo de calor transmitido por su superficie es aportado por el calor acumulado, y que dicho flujo está limitado por una resistencia superficial $1/h$, generalmente proporcionada por la convección de un fluido que lo rodea a temperatura constante T_{∞} .

Para comprobar que la resistencia interna es despreciable, se recurre a un coeficiente adimensional llamado número de Biot “**Bi**”, que relaciona la resistencia superficial con la resistencia interna y debe de ser menor a la unidad, en este caso si sabemos que $Bi < 0.1$ el error será inferior al 5%, aunque es deseable que **Bi** sea lo menor posible.

$$Bi = \frac{h L}{\gamma} \dots\dots\dots (23)$$

Dónde:

L representa la longitud característica del cuerpo, definida generalmente como el volumen del cuerpo dividido por su superficie externa total (m)

h representa el coeficiente de transferencia de calor en la superficie (W/m²K)

γ representa la conductividad térmica del material (W/m K)

La transferencia de calor por conducción a través de una pared o de algún material es proporcional al diferencial de temperatura entre las paredes explicado en la siguiente formula y visto en la Figura 5.7.

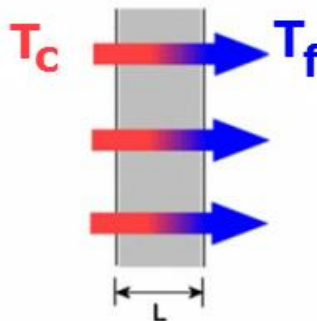


Figura 5.7 Transferencia de calor a través de una pared

$$Q = \frac{K A (T_c - T_f)}{L} \dots \dots \dots (24)$$

Dónde:

- K representa coeficiente de transferencia de calor (W/m² K)
- A representa el área de la pared (m²)
- L representa el espesor de la pared (m)
- T_c representa la temperatura mayor (K)
- T_f representa la temperatura menor (K)

5.4 Condiciones de frontera en curado del compuesto

Para llevar a cabo el análisis térmico con el método de elemento finito utilizando software (Solidworks Simulation) tenemos que establecer las condiciones en las cuales se evaluará el modelo, en este caso el molde superior para fabricar la prótesis transtibial será el que se evalué en primera instancia, considerando que la impregnación de la resina epoxi se hizo a mano queremos saber la temperatura de la superficie de contacto del molde con el compuesto con respecto al tiempo y el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura del horno, considerando que el curado se llevará a cabo en un horno de resistencia eléctrica.

Se analizarán los nodos que se muestran en la Figura 5.8 para evaluar la temperatura en dichos puntos durante el análisis térmico, esto siendo en la parte interna del molde donde estará en contacto el molde y el compuesto durante la etapa de curado.

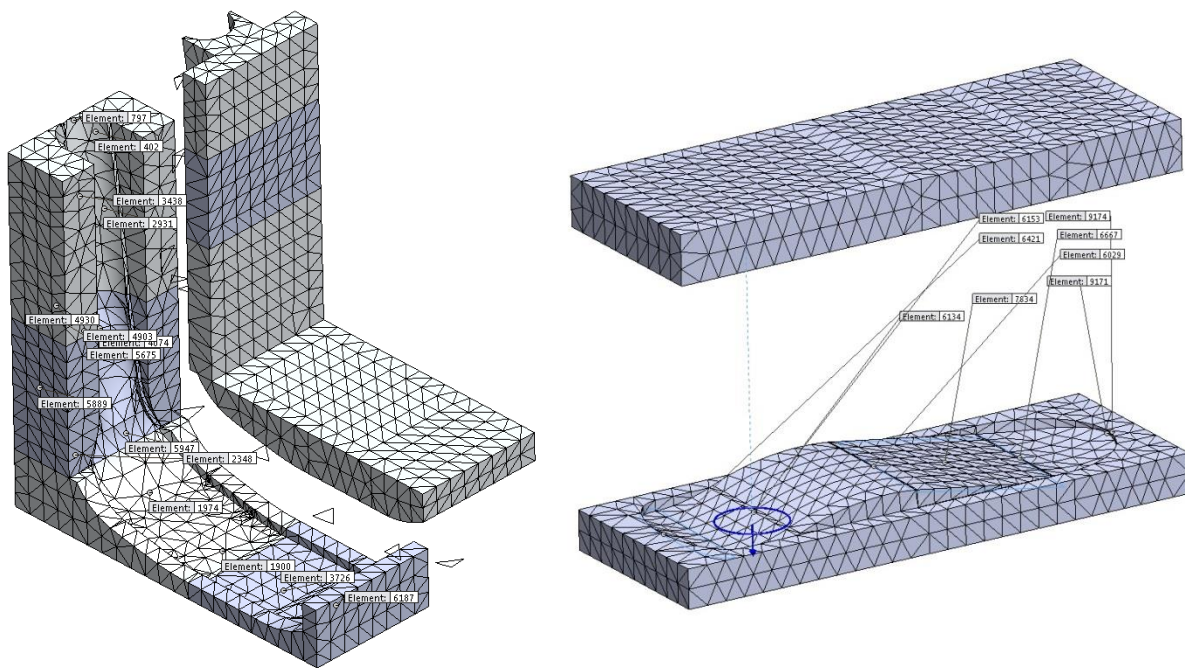


Figura 5.8 Nodos en malla para evaluar temperaturas en análisis térmico

Se introducirá el molde sometido a vacío cuando el horno se encuentre a 80 °C, considerando que el coeficiente de transferencia de calor del aire dentro del horno es de $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y que la temperatura inicial del molde es de 23 °C (temperatura ambiente). En la Figura 5.9 se muestra el resultado del análisis.

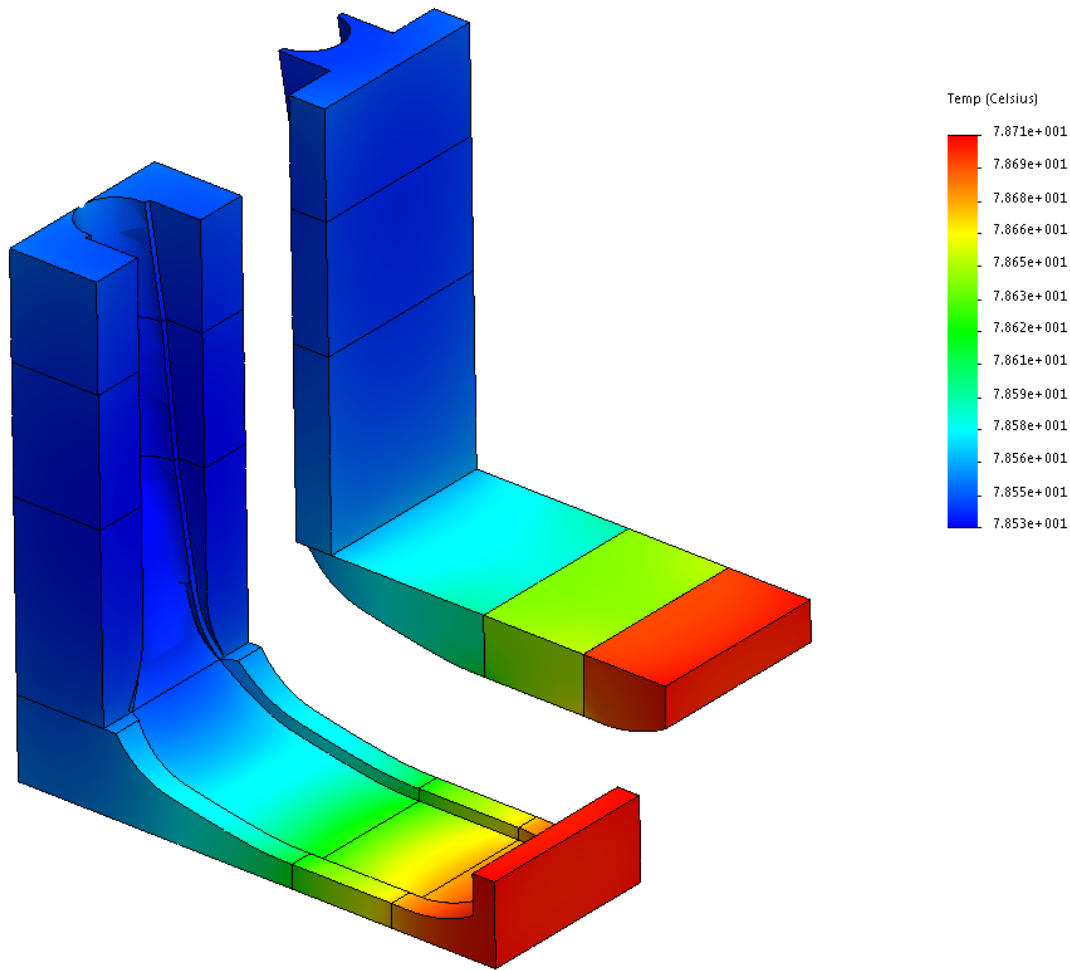


Figura 5.9 Análisis térmico en molde superior sometido a 80 °C por 2 horas

A continuación en la Figura 5.10 se muestra la simulación de la parte inferior del molde para la prótesis transtibial en su etapa de curado dentro de un horno a 80 °C durante dos horas, podemos notar al igual que en la Figura 5.9; la temperatura es casi uniforme en todo el molde después de estar en el horno, ambos casos alcanzan los 78 °C mostrando con colores las partes del molde que alcanzan mayor temperatura y habrá que evaluar con respecto al tiempo para saber si dos horas es suficiente o si 80 °C es muy poco.

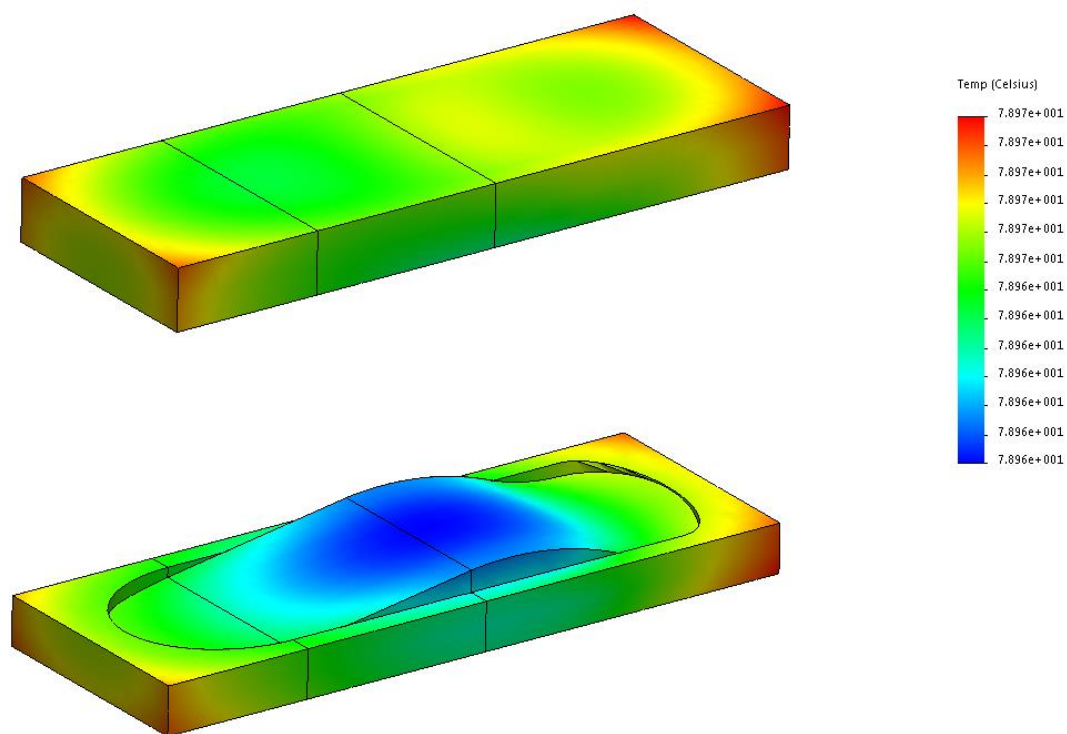


Figura 5.10 Análisis térmico en molde inferior sometido a 80 °C por 2 horas

En la Figura 5.11 y Figura 5.12 se puede observar como la temperatura en los nodos se va elevando conforme avanza el tiempo en el molde superior e inferior.

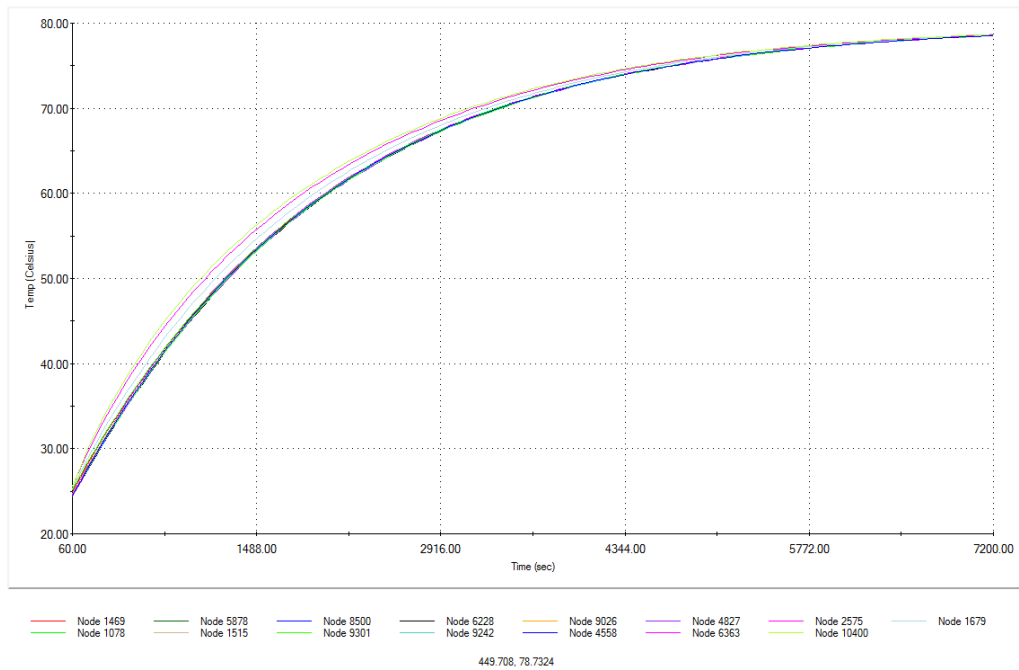


Figura 5.11 Temperatura en nodos en el transcurso de 120 minutos en molde superior

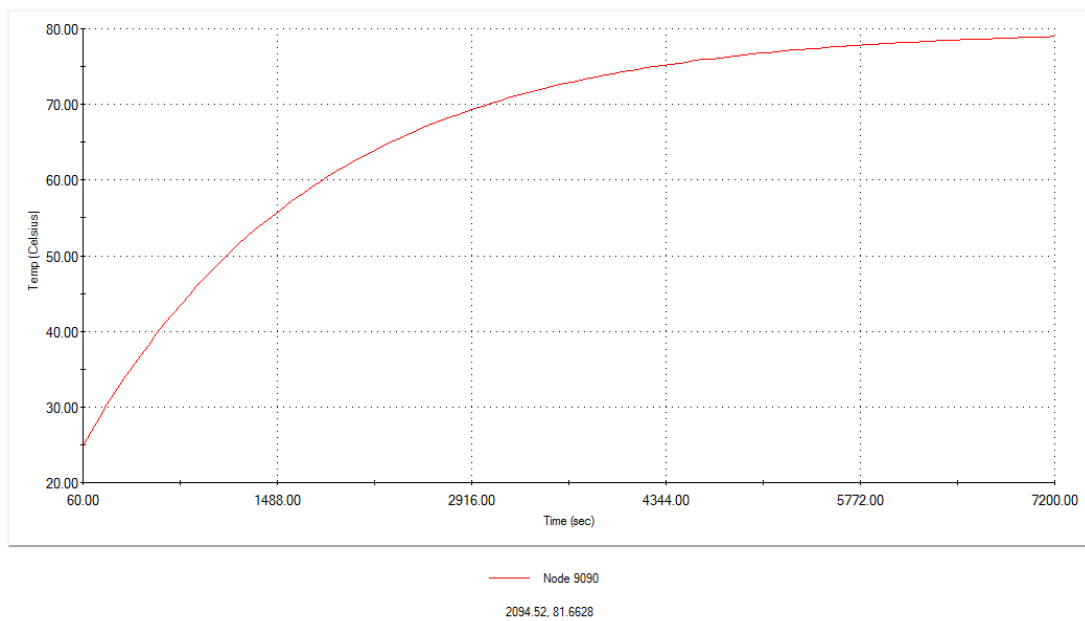


Figura 5.12 Nodo con temperatura máxima en el transcurso de 120 minutos en molde inferior

5.5 Tiempo de vacío

Es importante tener en cuenta el tiempo requerido al moldear para llegar al nivel de vacío deseado, ya que si te tarda más de lo requerido se puede dañar el sistema de vacío o en caso de que el tiempo sea menor al requerido puede faltar compactación en la pieza. Ya sea con una bomba de vacío grande o pequeña ambas pueden llegar al mismo nivel de vacío pero dependerá de la capacidad de esta para determinar el tiempo, se utilizó la siguiente fórmula para determinar el tiempo requerido:

$$t = \frac{V n}{4 q} \dots \dots \dots (25)$$

Dónde:

t : tiempo (minutos)

V : volumen (pies cúbicos)

n : constante de aplicación (pulgadas de mercurio)

q : capacidad de flujo (pies cúbicos por minuto)

En nuestro caso buscamos un porcentaje de vacío optimo (que sea cercano a 25 in Hg), para el valor de la constante de aplicación se manejan: “1” para vacío hasta 15 in Hg, “2” para vacío de 15 in Hg a 22.5 in Hg y “3” para vacío de 22.5 in Hg a 26 in Hg. [51]

5.5.1 Tiempo de vacío en molde superior

Para nuestro sistema de moldeo de la parte superior de la prótesis transtibial tenemos que el volumen de moldeo es de 0.1446 pies cúbicos y una capacidad de flujo de 1.1 pies cúbicos por minuto a 25.5 in Hg.

$$t = \frac{V n}{4 q} \dots \dots \dots (26)$$

$$t = \frac{(0.1446) (3)}{4 (1.1)} = 0.0985 \text{ minutos} \dots \dots \dots (27)$$

Esta información es considerando que todos los componentes del sistema funcionan de manera óptima, por lo tanto habrá que tener un rango de tolerancia en cuanto al tiempo de vacío considerando hasta un 25% para compensar ineficiencias del sistema y fugas. Teniendo como resultado que el tiempo al que habrá que someter el molde a vacío será de 7 segundos.

5.5.2 Tiempo de vacío en molde inferior

En el caso del molde de la parte inferior de la prótesis transtibial el volumen es de 0.081 pies cúbicos y una capacidad de flujo de 1.1 pies cúbicos por minuto a 25.5 in Hg.

$$t = \frac{V n}{4 q} \dots \dots \dots (28)$$

$$t = \frac{(0.1446) (3)}{4 (1.1)} = 0.0552 \text{ minutos} \dots \dots \dots (29)$$

Teniendo como resultado que el tiempo al que habrá que someter el molde a vacío será de 4 segundos.

5.6 Prueba en prótesis transtibial

Se realizó una prueba de elemento finito a la prótesis aplicando la fuerza en diferentes direcciones para obtener una lectura y saber dónde se concentra mayor esfuerzo en la fase de marcha, así como la parte donde se registró mayor concentración de esfuerzo en las pruebas por elemento finito (ver Figura 5.13).

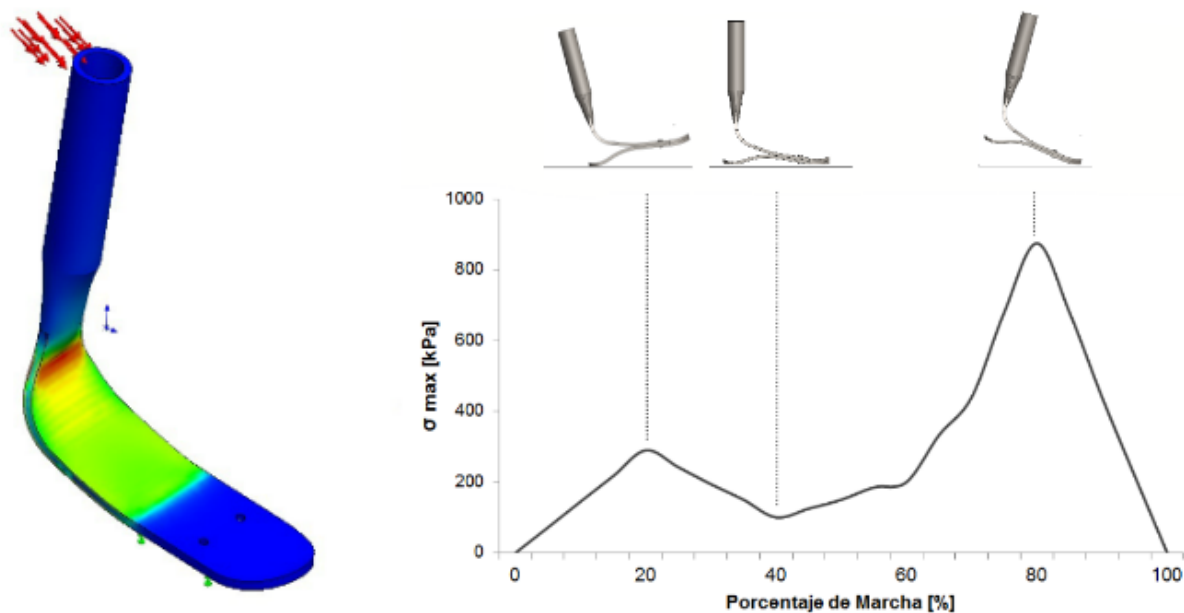


Figura 5.13 Análisis estructural a prótesis (izq.) y grafica de concentración de esfuerzo según porcentaje de marcha (der.)

La norma ISO 10328 especifica procedimientos para pruebas estáticas en prótesis de miembros inferiores, Esta norma aplica específicamente a prótesis de miembro inferior desarticuladas, sea transfemoral o transtibial.

Se le realizó una prueba en conjunto con el Departamento de Mecatrónica Campus Guadalajara del Tecnológico de Monterrey y con la estudiante de doctorado M. C. Miriam Siqueiros Hernández donde se menciona la prueba realizada en su trabajo de tesis “Diseño de una prótesis de pie para su fabricación en material compuesto y validación estructural por medio

de una metodología sistematizada”, se utilizó una máquina “Series 647 hydraulic wedge grips” de la compañía MTS, basándose en la norma mencionada anteriormente para obtener los valores de carga máxima a compresión, como se puede observar en la Figura 5.14 se colocó una sujeción para montaje en la máquina compresión.



Figura 5.14 Prótesis transtibial con montaje para prueba

La máquina para pruebas cuenta con un actuador hidráulico (ver Figura 5.15) el cual puede ser controlado para efectuar diversas pruebas mecánicas como tensión, compresión, fatiga, etc. En este caso se analizó la prótesis transtibial en compresión en la fase de apoyo donde la carga se aplica de manera axial y se considera que esta empotrado en la parte de los dedos.

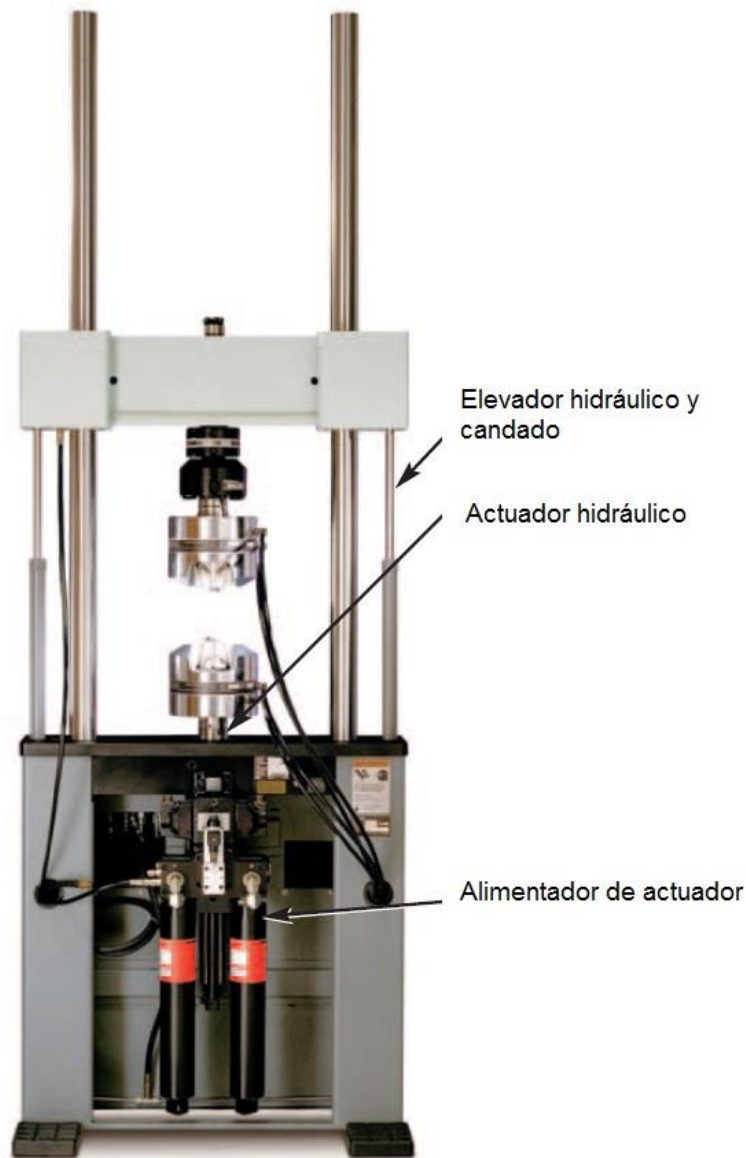


Figura 5.15 Máquina para pruebas mecánicas

Una vez montado en la máquina se configuró a una velocidad de 0.5 mm por segundo para llevar a cabo la prueba, la base se coloca a 30 grados para posteriormente comenzar (observar Figura 5.16), tomando los valores iniciales del trabajo realizado por [52] . En esta máquina la compresión se lleva a cabo mediante el movimiento del actuador inferior a una velocidad controlada con el fin de obtener una relación entre el desplazamiento y la carga soportada.



Figura 5.16 Prótesis montada en máquina para pruebas

La prueba nos arrojó los resultados vistos en la Figura 5.17, la prótesis transtibial probada tuvo una última lectura de 652 N teniendo un desplazamiento del actuador de 70 mm antes de fallar.

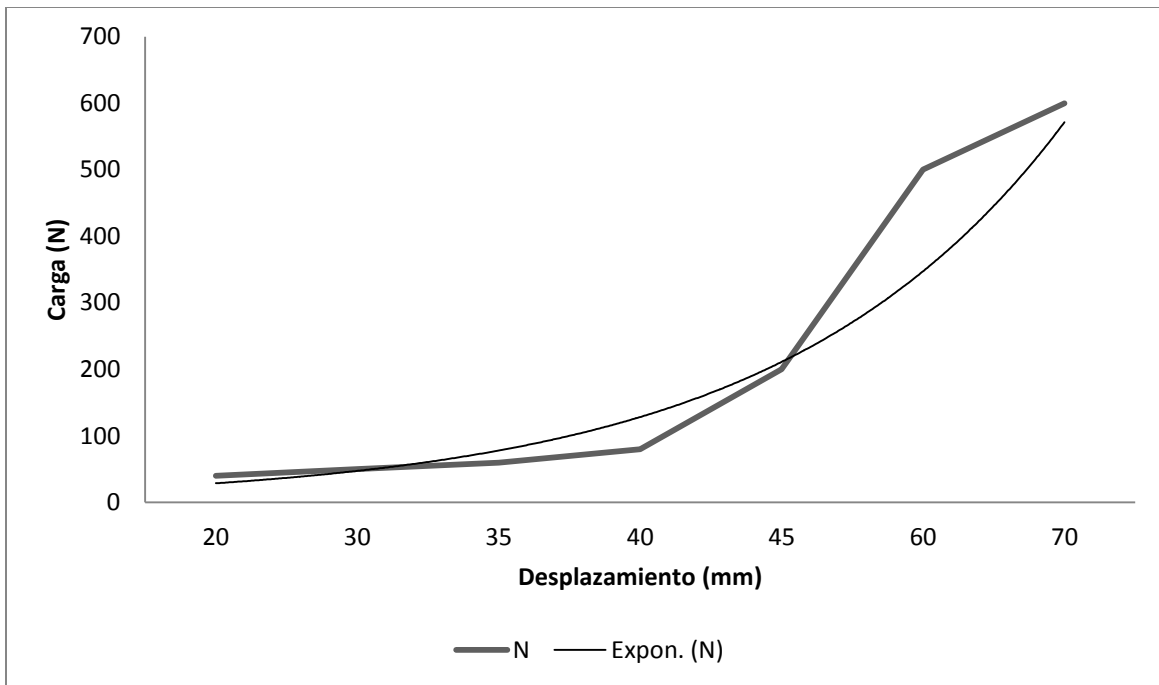


Figura 5.17 Gráfica de Carga/Desplazamiento en prótesis transtibial

6 Conclusiones

En este trabajo se planteó un diseño de prótesis transtibial para ser fabricado de material compuesto, con el cual se diseñó y fabricó un molde progresivo con el fin de obtener una prótesis transtibial de bajo costo. Se comenzó planteando un molde fácil de fabricar y de usar, con el avance del proyecto se llegó al punto de decidir dividir el molde en muchos componentes de tal manera que este molde pudiera ser utilizado para cierto rango de pacientes donde entre mayor sea el número de pacientes menor será el costo de fabricación por prótesis.

Este proyecto se comenzó haciendo pruebas en molde de madera y utilizando resina polimérica con fibra de carbono y fibra de vidrio, con esto nos dimos cuenta de que manera iba a funcionar el moldeo del compuesto y el proceso necesario para obtener la pieza final. El cuál comenzaba con el corte y preparación del material, posteriormente la impregnación de material y cierre del molde y por último se le aplicaba vacío para completar la parte del moldeo de la pieza y este se dejaba curar a temperatura. Con el paso de las pruebas y avance de la investigación se eligió que la matriz fuera resina epoxi por su alta rigidez y propiedades cuando se cura correctamente y fibra de carbono como refuerzo por sus altas propiedades mecánicas y bajo peso.

Aun así se necesitan realizar pruebas de tensión, compresión y fatiga en la prótesis transtibial para evaluar la unión de la parte superior e inferior y con ello definir el proceso exacto para la fabricación de la prótesis. Se comenzó con 8 capas para componer un laminado simétrico balanceado, se confirmó que el volumen calculado no es el deseado y requiere de un mayor número de capas y resina, manteniendo la proporción planteada (90-10).

En la prueba realizada sobre el material nos pudimos dar cuenta que para soportar las cargas requeridas por la ISO 10238 se necesita mayor volumen, se requiere mayor rigidez en la prótesis y de la misma manera incrementar el área donde se lleva a cabo la fractura (punto donde se concentra mayor esfuerzo).

Se enfatizó dentro del desarrollo de este trabajo en el mecanizado y los programas requeridos para la fabricación de moldes, estos programas facilitan tanto el diseño de los moldes como la simulación de mecanizado y pruebas en los mismos y/o en el producto final.

Se logró obtener un producto final de bajo costo debido a la reducción obtenida por el costo o inversión del molde entre el número de pacientes y la reutilización de un 66% del molde inicial. Con esto se generó una nueva interrogante que interesaría a las clínicas ortopédicas, donde habría que calcular el costo de la inversión para tener el equipo necesario para fabricar prótesis de materiales compuestos dentro de las instalaciones de la misma.

Sería necesario que la clínica tenga un cierto número de moldes para cubrir las distintas variaciones entre los pacientes, sea peso, medidas de amputación de miembro inferior, etc. Así como también una persona entrenada para estar moldeando las prótesis y tener un tiempo de respuesta para el paciente mínimo comparado con el que se maneja en el caso de comprarla a una empresa transnacional ya que aunque sean productos de catálogo deben de ser adaptados a cada paciente.

Para llevar este producto a un proceso de fabricación estandarizado habría que utilizar recubrimientos sobre los moldes para facilitar el desmoldeo de las prótesis y alargar la vida de los moldes, protegiéndolos del desgaste.

6.1 Trabajo a futuro

La técnica de molde progresivo resulta ser buena idea para lograr reducir el costo de la prótesis transtibial de material compuesto, pero con el resultado del trabajo de la estudiante de doctorado M. C. Miriam Siqueiros Hernández, sabremos si habrá reconfigurar el laminado de las fibras con el propósito de reforzar sin modificar el molde o si habrá que retomar la idea del molde progresivo y modificarlo de tal manera que se refuerce la parte con mayor concentración de esfuerzo que tenderá a la ruptura en ese punto.

Otro punto importante para llegar a obtener una prótesis 100% funcional será la unión de la parte superior e inferior de material compuesto, habrá que realizar las pruebas anteriormente mencionadas de igual manera a la unión, se planteó utilizar remaches especiales debido al costo y facilidad de unión, pero habrá que ser evaluado contra el usar algún adhesivo epoxi o algún otro método de sujeción.

Sera necesario continuar con las pruebas mecánicas en la prótesis con el fin de definir el volumen requerido (cantidad de capas y de resina epoxi) para mejorar la resistencia de la prótesis transtibial.

Capítulo VII

Bibliografía



7 Bibliografía

- [1] B. Valadez, "En 2013, 75 mil amputaciones por pie diabético en México," *Milenio*, Jan. 2014.
- [2] O.M.S., 2005. www.who.int. [Online].
<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr61/en/>
- [3] H., Dr. Morales, E. Dr. Arboleya, "Epidemiología del pie diabético: base de datos de la CONAMED," *CONAMED Vol. 13*, 2008.
- [4] A.N.M.M., "Acta de la Sesión del 4 de marzo del 2015 Academia Nacional de Medicina," *Los amputados, un reto para el estado*, p. 9, Mar. 2015.
- [5] INEGI. (2010) Censo de Poblacion y Vivienda, Estados Unidos Mexicanos con discapacidad. [Online]. <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/discapacidad>
- [6] D. Krupa. (2010) Protesis 101, Range of Motion Project (ROMP). [Online].
www.rompglobal.org
- [7] R. Mark, *Biomechanics for life*. Estados Unidos: Springer, 2011.
- [8] J., Rodriguez, R. Sánchez, "DiabetesL Consecuencia Fatal," *El Universal*, p. 20, 2007.
- [9] R. Heck, *General Principles of Amputations*. Estados Unidos: Campbell's Operative Orthopaedics, 2007.
- [10] A. Valencia, Diseño desarrollo de una prótesis Flex-Foot, 2009.
- [11] K. Norton, "Un breve recorrido por la historia de la protésica," *inMotion*, p. 5, 2007.
- [12] Thorn Silver, "Generic, geometric finite element analysis of the transtibial residual limb and prosthetic socket," *Journal Of Rehabilitation Research & Development*, pp. 34(2), 171, 1997.
- [13] G.F. Kogler and D.G. Barth T. A. Current, "Static structural testing of transtibial composite sockets," *Prosthetics and orhotics international*, pp. 23, 113-122, 1999.
- [14] J.,Taya, M. Hanl, "Experimental and numerical predictions of the ultimate strenght of a low-cost composite transtibial prosthesis," *Journal of Rehabilitation Reseach and Development Vol. 37*, pp. 405-413, 2000.

- [15] A., Brian, J. Hafner, "Transtibial energy-storage-and-return prosthetic devices: A review of energy concepts and a proposed nomenclature," *Journal of Rehabilitation Research and Development* Vol. 39, pp. 1-11, 2002.
- [16] R., Current, T. Graebner, "Relative strength of pylon-to-socket attachment systems used in transtibial composite sockets," *Journal of Prosthetics and orthotics (JPO)* vol. 19 number 3, pp. 67-74, 2007.
- [17] D., Mangiante, B., Vergani, L., Colombo, C. Bonacini, "Design of a new prosthetic foot which complies with ISO 10328 and allows high performance," *ETDCM9- Seminar on experimental techniques and design in composite materials*, 2009.
- [18] E., Hoskins, R., Fosnight, T. Sutton, "Using elevated vacuum to improve functional outcomes: a case report," *Journal of Prosthetics and Orthotics (JPO)* Vol. 23 Number 4, pp. 184-189, 2011.
- [19] N., Buchta, A., Long, B., Weindel, S. Galuska, "Analysis, testing and design of low-cost prosthetic foot (University of Arkansas)," *RESNA 2016 Conference*, 2012.
- [20] R., Ibrahim, R., Tahir, P. Che Me, "Natural based biocomposite material for prosthetic socket fabrication," *Alam Cipta* Vol. 5 (1), pp. 27-34, June 2012.
- [21] F., Khan, F. Ghaith, "Nonlinear finite element modeling of prosthetic lower limbs," *Proc. of Int. Conf. on Advances in Robotic, Mechanical Engineering and Design*, 2012.
- [22] A., Alvarez, M., Sanchez, F.M. Hernandez, "Protocolo para el análisis funcional de prótesis para pacientes con amputación parcial de pie," *Revista Mexicana de Ingenieria Biomedica* vol. 34 No. 1, pp. 97-107, 2013.
- [23] A., Dumbleton, T., Murray, D., McHugh, B. Buis, "Measuring the daily stepping activity of people with transtibial amputation using the ActivPal™ Active Monitor," *Journal of Prosthetics and Orthotics* Vol. 26 Number 1, pp. 43-47, 2014.
- [24] M. Lezama, Prótesis y sus características , 2012.
- [25] E. Burgees, *La amputación por debajo de la rodilla*. Universidad de New York: Estudios Protésicos y Ortésicos, 1969, vol. VIII.
- [26] A., Valencia, L. Franco. (2011, Marzo) Prótesis Pasiva de Rodilla.
- [27] Prosthetic Concepts. (s.f.) Below Knee (transtibial) Prosthesis. [Online].

- <http://www.prostheticconcepts.ca/belowknee.pdf>
- [28] R., Fulay, P., Wright W. Askeland, *Ciencia e ingenieria de materiales*. Mexico: CENGAGE Learning 6ta edicion, 2011.
- [29] Gore Tex, "Que es el Kevlar?," pp. 35,78, Junio 2007.
- [30] C. Ocampo, Determinacion experimental de las propiedades en corte de una lamina fabricada en material compuesto, 2009.
- [31] E., Black, J., Kohser, R. DeGarmo, *Materiales y procesos de fabricacion*. Barcelona: Editorial Reverte, Segunda edicion, 1994.
- [32] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico: Editorial McGraw Hill, Tercera edicion, 2007.
- [33] D. Escudero, "Materiales Compuestos," España, 2001.
- [34] M., Costello, W. Blank, *Materiales Compuestos Fibrosos.*, 2011.
- [35] NetComposites. Woven Fabrics. [Online]. <http://www.netcomposites.com>
- [36] Franco Stupenengo, *Materiales y materias primas*. Argentina: Encuentro, 2012.
- [37] W., Rethwisch, D. Callister, *Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales*. Mexico: Limusa-Wiley, 2009.
- [38] P., Miravete, A., Jimenez, L. Antequera, *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 1991.
- [39] A. Besednjak, "Capitulo VI, Moldeo por vacio," *Universidad Politecnica de Catalunya*, pp. 3-6, 2009.
- [40] A. Besednjak, *Materiales Compuestos. Procesos de fabricacion de embarcaciones*. Barcelona: Edicions UPC, 2005.
- [41] Gougeon Brothers Inc.. (2005) www.westsystem.com.
- [42] A. Besednjak, "Los Moldes," *De publicaciones academicas Universidad de Catalunya Base de Datos*, s.f.
- [43] F. Sandoval. (2008) Materiales para construcción de moldes.
- [44] V. Ryan. (2009) CNC - Stages in CNC work. [Online]. www.technologystudent.com
- [45] Procut Industrial. (2015) Catálogo de productos. [Online]. www.procutindustrial.com

- [46] CustomPartNet. (2015) CustomPartNet.com. [Online]. <http://www.custompartnet.com/>
- [47] PROFECO. (2015) Normas oficiales mexicanas competencia de la procuraduría federal del consumidor.
- [48] ISO. (2015) About ISO. [Online]. <http://www.iso.org/>
- [49] Össur. (2015) Products. [Online]. <http://www.ossur.com/prosthetic-solutions/products/feet>
- [50] Endolite. (2015) Products. [Online]. <http://www.endolite.com/products/type/feet>
- [51] Hydraulics & pneumatics. (2012, Enero) Fundamentals of Vacuum. [Online]. <http://hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/Vacuum/Article/False/6460/TechZone-Vacuum?page=4>
- [52] L., Marchesin, E., Verni, G. Vergani, "Optimization Studies of Transtibial Prostheses: Numerical models and Experimental Tests," *Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano*, 2012.
- [53] M. Colin, Diseno de protesis para parte inferior de pierna, 2001.
- [54] M. Wegener, *Tecnologia de los composites*. Barcelona: Editorial Hanser, 1992.

Capítulo VIII

Apéndices



8 Apéndices

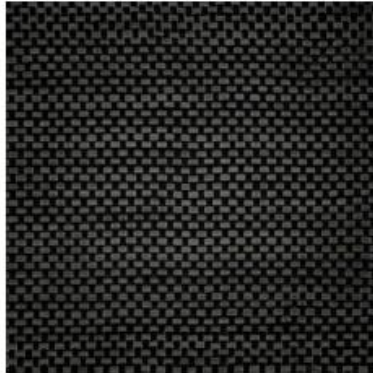
Apéndice A

Fibre Glast Developments Corporation

800.214.8579

www.fibreglast.com

Product Data Sheet



3K, Plain Weave Carbon Fiber

Part # - 530

5.7 oz/sq yd, 50" Wide, .012" Thick, 12.5 x 12.5 Plain Weave

This plain weave carbon fiber is the most commonly used type for lightweight aerodynamic parts. Only three layers are typically necessary to produce non-structural pieces. It wets out quickly and handles easily.

Product Properties

Warp Raw Material	3K –Multifilament Continuous Tow
Filling Raw Material	3K –Multifilament Continuous Tow
Weave Pattern	Plain
Fabric Areal Weight	5.4-5.9 oz/yds ²
Warp Ends/ Inch	12.5 ± 1.0
Pick / Inch	12.5 ± 1.0
Nominal Thickness	.012 inches
Fabric Width	50 ± .25/-0 inches
Roll Length	100yds
Tensile Strength	610-635 KSI
Tensile Modulus	33-34.9 MSI
Elongation	1.4-1.95%

DESCRIPTION

Graphite fibers contain up to 95% carbon and yield the highest tensile strength in the FRP industry. These fibers woven together form graphite fabric. These fabrics offer higher strength and stiffness-to-weight ratios than any other commonly available reinforcements. This fabric is suitable for use in racing, aircraft, competition marine, and light industrial applications. To maximize the fiber properties we recommend using only epoxy or vinyl ester resin, although polyesters will bond to the fabrics. This plain weave carbon fiber is the most commonly used type for lightweight aerodynamic parts.

Resin Compatibility:

530, Carbon Fiber Fabric, is compatible with Polyester, Vinyl Ester, and Epoxy Resins.

General Properties for Carbon Fiber Fabrics:

- Lightweight
- High Modulus
- Fire Resistant
- Dimensionally Stable
- Fatigue Resistant

Information present herein has been compiled from sources considered to be dependable and is accurate and reliable to the best of our knowledge and belief but is not guaranteed to be so. Nothing herein is to be construed as recommending any practice or any product violation of any patent or in violation of any law or regulation. It is the user's responsibility to determine for himself the suitability of any material for a specific purpose and to adopt such safety precautions as may be necessary. We make no warranty as to the results to be obtained in using any material and, since conditions of use are not under our control, we must necessarily disclaim all liability with respect to the use of any material supplied by us.
©Copyright 2010 Fibre Glast Developments Corporation

Fibre Glast Developments Corporation
385 Carr Drive
Brookville, Ohio 45309
Phone – 800.214.8579
Fax – 937.833.6555
www.fibreglast.com



PDCT-PDS-00095-C-09/10-C-G

Page 1 of 1

		Units
SFM	Cutting Speed	Feet / mn
D	Tool Diameter	Inches
R	Tool Radius	Inches
IPM	Inches per minute / Feed Rate	Inches / mn
RPM	Revolutions per minute	RPM
Z	Number- Flutes /Teeth	
Ae	Maximum depth of cut	Inches

BELIN PRECISION TOOLS

INCH FORMULAS

Recommended cutting & feed rates for specific materials

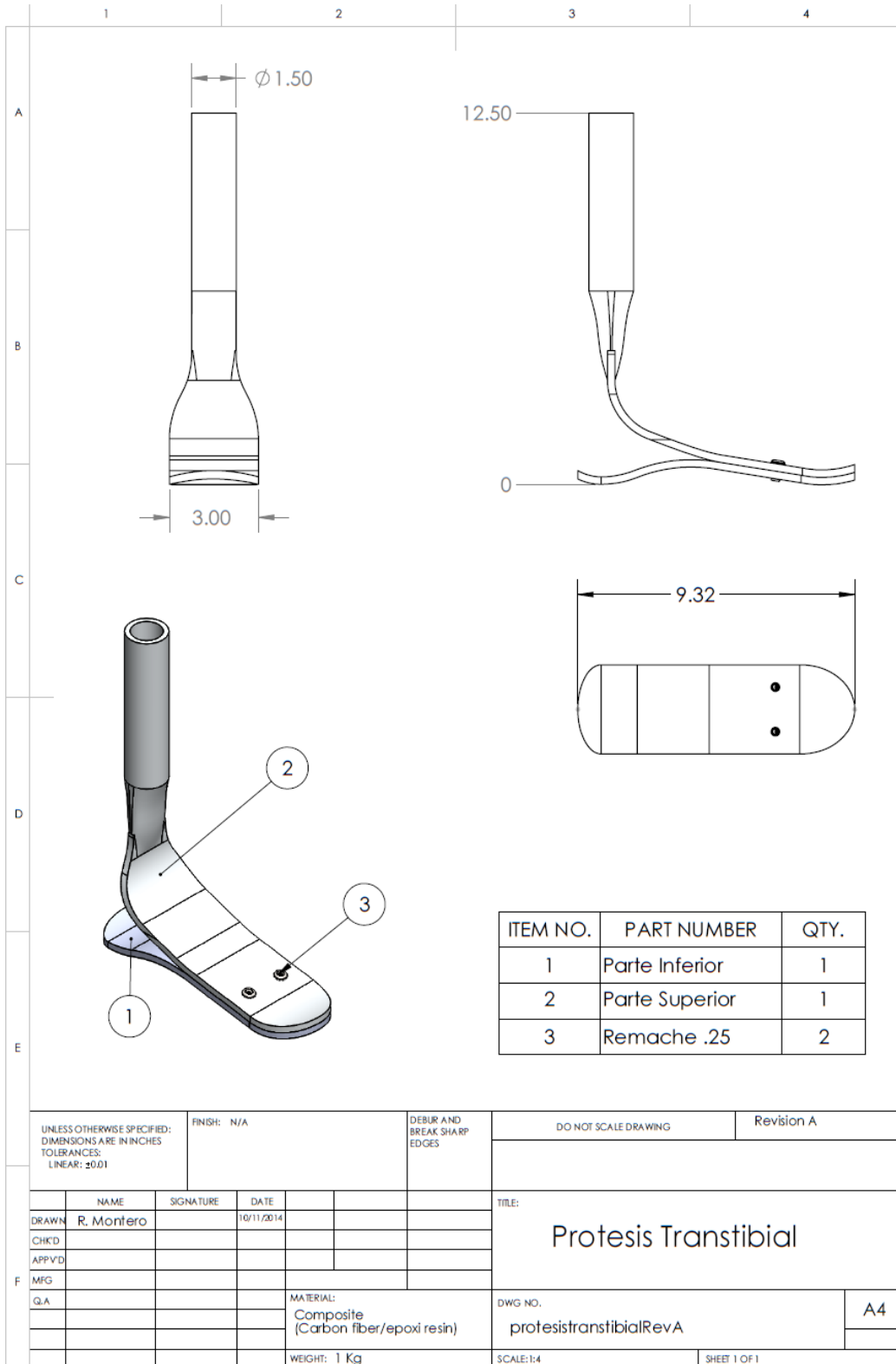
- Select [SFM] for specific material to rout/mill – **calculate** RPM and Feed Rates using Belin formula
- Plunge at 40-60% [hard materials 20-30%] of the calculated feed rate / avoid tool hitting table in plunge
- Best results are achieved with stable material /proper hold down / no vibration
- Machine rigidity / software / setup / minimal runout [side pressure] - gives best results and longer tool life
- Follow Max. Depth of Cut [Ae] - and - Lubrication/Coolant recommendations for best results
- The quality, efficiency and performance of Belin tools depend on numerous interdependent factors

Materials	SFM	IPM (Feed rate per minute) by Cutting Edge Diameters - inches			Ae- Max depth of cut each pass 	Lubricant/Coolant	Recommended		
		Up to 1/8"	3/16" to 3/8"	3/8" to 1"					
Aluminum Pure	> 1000	.0004xDxZxRPM x25.4 R	.0008xDxZxRPM x25.4 D	.001xDxZxRPM x25.4 D	Ae	Petrol or RGV Swarf soft, sticky	176000 22000	176000 00199	176000 00203
Aluminum Alloy	> 1000	.0004xDxZxRPM x25.4 R	.0008xDxZxRPM x25.4 D	.001xDxZxRPM x25.4 D	Ae	Cutting oil emulsion Drier swarf	33000		
Brass	490 < > 1000	.0004xDxZxRPM x25.4 R	.0008xDxZxRPM x25.4 D	.001xDxZxRPM x25.4 D	Ae	Cutting oil emulsion	176000 22000	102000 176000	102000 176000
Bronze- Zinc	330 < > 500	.0004xDxZxRPM x25.4 R	.0008xDxZxRPM x25.4 D	.001xDxZxRPM x25.4 D	Ae	Cutting oil emulsion	33000 99203	15000	16000
Materials	SFM	Up to 1/8"	3/16" to 3/8"	3/8" to 1"					
Plastics - Bakelite	160 < > 330	.0012xDxZxRPM x25.4 1.5xR	.0016xDxZxRPM x25.4 1.5xD	.0018xDxZxRPM x25.4 1.5xD	Ae	Air	12000 13000	13000 91361	13000 91361
Plastics - PVC	330 < > 700	.0012xDxZxRPM x25.4 1.5xR	.0016xDxZxRPM x25.4 1.5xD	.0018xDxZxRPM x25.4 1.5xD	Ae	Air	91361 94106	94106	94106
Plastics - Acetate Plexiglas - Nylon	980 < > 1600	.0012xDxZxRPM x25.4 1.5xR	.0016xDxZxRPM x25.4 1.5xD	.0018xDxZxRPM x25.4 1.5xD	Ae	Air Vaporised water	94106 99058	00196	00192
Materials	SFM	Up to 1/8"	3/16" to 3/8"	3/8" to 1"					
Wood	980 < > 1300	.0004xDxZxRPM x25.4 1.5xR	.0008xDxZxRPM x25.4 1.5xD	.001xDxZxRPM x25.4 1.5xD	Ae	Air		43000	
Materials	SFM	Up to 1/8"	3/16" to 3/8"	3/8" to 1"					
Stainless steel	300	.00013xDxZxRPMx25.4 R	.00018xDxZxRPM x25.4 R	.00018xDxZxRPMx25.4 R	Ae	Cutting oil emulsion	102000 16000	102000 15000	102000 16000

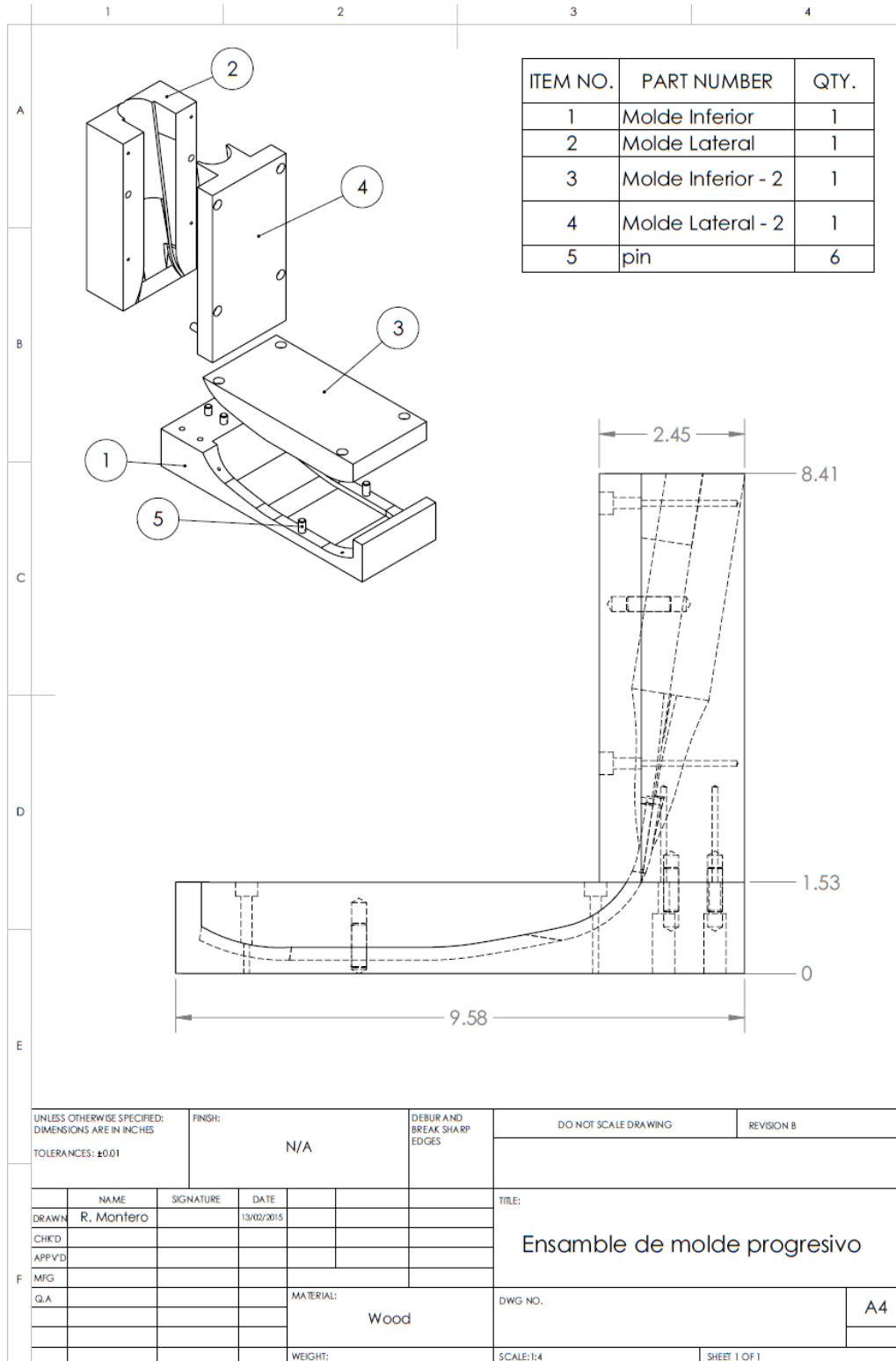
Formulas: $RPM = \frac{SFM}{0.2618 \times D}$ $SFM = 0.262 \times D \times RPM$

For other tool profiles refer to bottom of catalog page for cutting information.

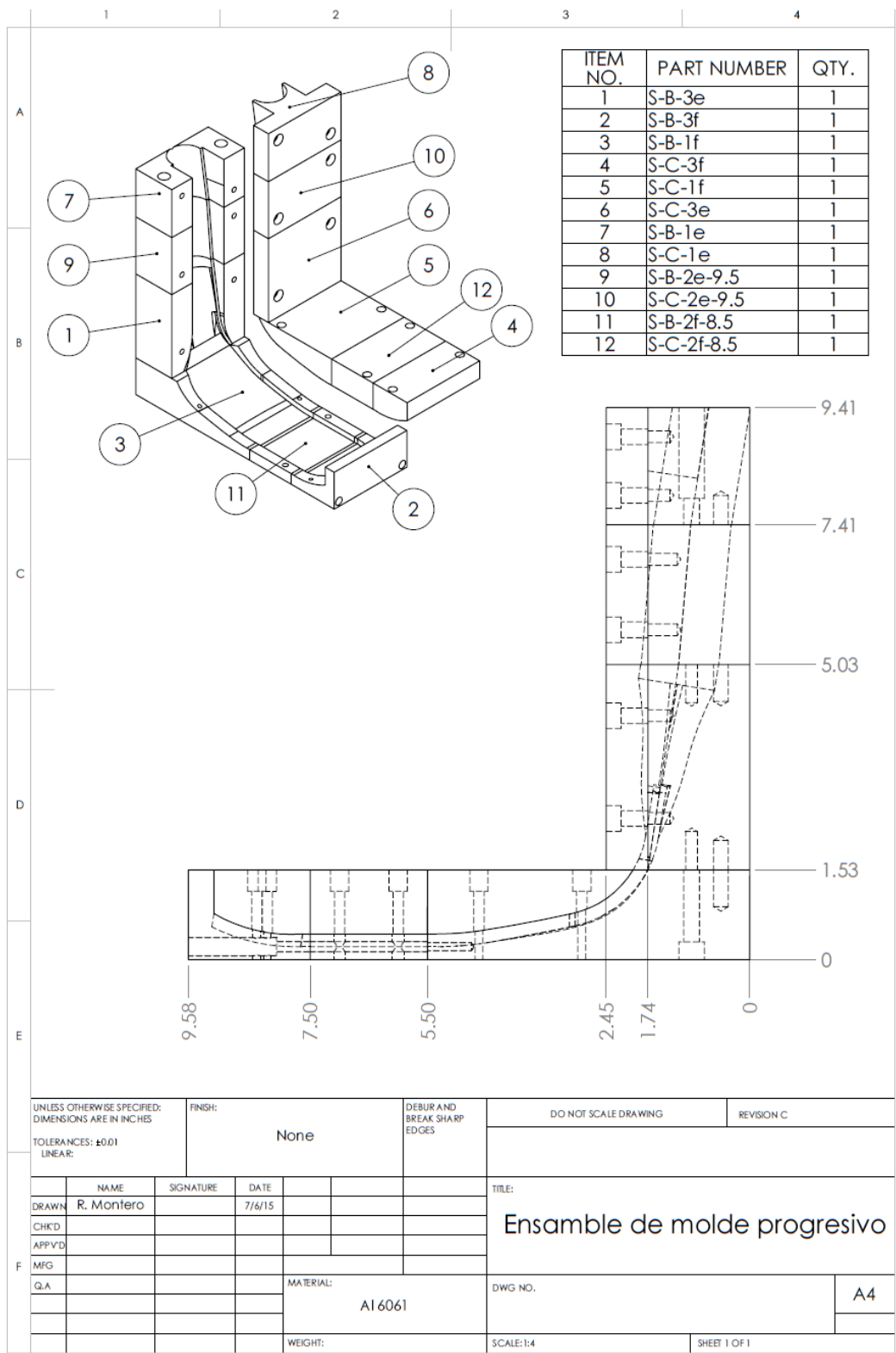
Apéndice C



Apéndice D



Apéndice E



Apéndice F

