

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

ECITEC

VALLE DE LAS PALMAS

INGENIERÍA MECÁNICA



Análisis de la comparación de laminados de material compuesto de fibra de carbono con resinas termoestables para la manufactura de prótesis transibial

T E S I S

Que para obtener el grado de LICENCIATURA EN INGENIERÍA
MECÁNICA

PRESENTA:

Anabel Nava Gastelum

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. Miriam Siqueiros Hernández

Tijuana B.C

Noviembre 2017

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios y a la vida, por brindarme la oportunidad de aprender y conocer el mundo de la investigación gracias a este trabajo de tesis. Que sin duda ha sido la mejor experiencia que he tenido en mi formación profesional.

A mi directora de tesis, la M.C Miriam Siqueiros Hernández, que sin ella jamás habría conocido el verdadero significado de responsabilidad y compromiso. Gracias por todo lo enseñado, la paciencia, horas extras y sabios consejos que me ha dado, no solo en la cuestión profesional, sino también en la personal.

Al maestro Benjamín González por sus enseñanzas durante la carrera, sobre todo en el campo de materiales. Gracias por brindar su tiempo extra en laboratorios y cubículos para la explicación de dudas y consejos para esta investigación.

A mis amigos Grecia, Iván, Dennisse e Isacc, por brindarme su apoyo incondicional durante todo este tiempo, por la motivación brindada y sobre todo por las metas que compartimos juntos.

A mi padre quien me ha motivado con sus actos, a superarme día con día para ser mejor persona.

A la Universidad Autónoma de Baja California, por crear profesionistas con valores e impulsar la motivación hacia el área de investigación.

DEDICATORIA

A mi madre por el gran ejemplo de persona, amiga, profesionista y mujer. Quien es la persona que más admiro en este mundo, este logro jamás lo hubiera conseguido sin su apoyo y amor incondicional.

RESUMEN

La industria ortopédica es uno de los sectores industriales con mayor crecimiento, hoy en día se ha implementado la utilización de materiales compuestos para alcanzar los requerimientos de desempeño que son demandados para un estilo de vida activo. En este trabajo se presenta primeramente un análisis comparativo de matrices poliméricas (epoxica y poliéster) para la aplicación de materiales compuestos, ambas matrices se sometieron a pruebas de tensión, bajo la norma ASTM D638, los resultados presentados favorecen a la matriz poliéster en comparación con la resina epoxica que obtuvo un esfuerzo promedio a pesar que los datos presentados contradicen los datos teóricos citados, ambos resultados sirven para continuar con las metas del presente estudio.

De igual manera se analizaron los de materiales compuestos de fibra de carbono con resinas epóxica y poliéster, con la configuración de un laminado cuasi-isotrópico $[0/+45/-45]_s$ para ambos materiales, con el objetivo de determinar cuál es el material que cumple con las propiedades requeridas para la aplicación de prótesis transtibial. Se realizaron pruebas mecánicas de tensión en los materiales en base a la norma ASTM D3039. Estos ensayos estáticos son utilizados para conocer la resistencia a los esfuerzos principales que son aplicados en prótesis ortopédicas.

Se reportan las propiedades de los materiales utilizados, los cuales proveen información de la resistencia del laminado para la aplicación estándar de una prótesis transtibial. La oportunidad de materiales compuestos en la industria ortopédica requiere de estudios futuros para su amplia aplicación en el sector.

ABSTRAC

The orthopedic industry is one of the fastest growing industries, nowadays it has implemented the use of composite materials to meet the performance requirements that are demanded for active lifestyle. This paper first presents a comparative analysis of polymer matrices (epoxy and polyester) for the application of composite materials, both matrices were subjected to stress testing under ASTM D638, the results presented favored the polyester matrix compared to the epoxy resin had an average, although the data presented contradicts the theoretical data cited, both results served to continue the goals of the present study.

Similarly analyzed the composites of carbon fiber epoxy and polyester resins, with the configuration of quasi-isotropic laminate $[0 / + 45 / -45]_s$ for both materials, in order to determine the material that satisfies the properties required for the application of transtibial prosthesis. Mechanical stress tests were performed on materials based on ASTM D3039. These static tests are used to determine the resistance to the strain applied in orthopedic prosthesis.

The properties of the materials used are reported, which provide strength information of the laminate for the standard application of a prosthesis transtibial. The opportunity of composite materials in the orthopedic industry it requires further studies for its wide application in the sector.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	14
ÍNDICE DE GRÁFICAS	17
GLOSARIO	19
SIMBOLOGÍA	21
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVO	24
HIPÓTESIS	25
JUSTIFICACIÓN	26
METODOLOGÍA	27
METAS	28
ALCANCE	29
CAPÍTULO 1	30
ESTADO DEL ARTE	30
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS MATERIALES Y SU CLÁSIFICACIÓN	31
1.1.1 Materiales	31
1.1.2 Materiales en Industria Ortopédica	32
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE ACUERDO A SUS PROPIEADES	33
1.2.1 Metales y aleaciones	33
1.2.2 Cerámicos y vidrios	33
1.2.3 Semiconductores	33
1.2.4 Polímeros	33
1.2.4.1 Matrices termoestables	34
1.2.4.2 Matrices Termoplásticas	34
1.2.5 MATERIALES COMPUESTOS	35
1.2.5.1 Resina Epóxica	36
1.2.5.2 Resina Poliéster	38

1.2.5.3 Fibra de Carbono.....	40
1.3 PRINCIPALES MATERIALES UTILIZADOS EN PRÓTESIS.....	43
1.3.1 Ortopedia	44
1.3.2 Biomateriales Metálicos.....	44
1.3.3 Materiales cerámicos como biomateriales.....	44
1.3.4 MATERIALES COMPUESTOS EN PRÓTESIS.....	45
1.3.4.1 Fibras en materiales compuestos biocompatibles.....	46
1.3.4.2 Resinas y Polímeros Para Prótesis.....	46
1.4 PRÓTESIS	47
1.4.1 Antecedentes Históricos de Prótesis	48
1.4.2 Prótesis de miembro inferior.	50
1.4.2.1 Prótesis Transtibial.....	50
CAPÍTULO 2.....	53
MARCO TEÓRICO	53
2.1 INTRODUCCIÓN.....	54
2.2 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTO.....	55
2.2.1 Refuerzos en Materiales Compuestos	56
2.2.1.1 Fibras de vidrio.....	57
2.2.1.2 Fibras de carbono.....	58
2.2.1.3 Fibras orgánicas.....	58
2.2.2 Comparación de algunas propiedades mercancías de refuerzos en fibras más utilizados... 59	
2.2.3 Matrices	59
2.2.3.1 Resina poliéster.....	60
2.2.3.2 Resina epoxi	60
2.2.3.3 Resina vinilèster	60
2.2.4 Comparación de propiedades de Matrices termoestables.....	61
2.3 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES DE ACUERDO A SUS CARACTERÍSTICAS.....	61
2.3.1. Materiales Homogéneos.....	61
2.3.2 Materiales Heterogéneos.....	62
2.3.3 Materiales Anisotrópicos	62
2.3.4 Materiales Ortotrópicos.....	62
2.3.5 Materiales Isotrópicos.....	63

2.4 TIPOS DE LAMINADOS.....	63
2.4.1 Laminado simétrico.....	64
2.4.2 Laminado Altimétrico.....	65
2.4.3 Laminado Balanceado.....	65
2.4.4 Laminado Cuasi-Isótropo.....	65
2.4.5 Laminado Ortotrópicos.....	66
2.5 PROCESOS DE MANUFACTURA DE MATERIALES COMPUESTOS.....	66
2.5.1 Método de contacto manual (Hand lay-up/Wet lay-up).....	66
2.5.2 Bobinado (Filament winding).....	67
2.5.3 Autoclave.....	68
2.5.4 Vaccum bag Wet lay-up.....	70
2.5.5 Pultrusión.....	70
2.5.6 RTM (Resin Transfer Moulding).....	71
2.6 MATERIALES COMPUESTOS EN LA INDUSTRIA ORTOPEDICA.....	72
2.6.1 Lamiados implementados para la fabricación de prótesis de miembro inferior.....	74
CAPÍTULO 3.....	77
Metodología y Desarrollo experimental.....	77
3.1 DIAGRAMA DE FLUJO.....	78
3.2 MATERIALES DE TRABAJO.....	80
3.2.1 Fibra de Carbono de tejido liso 3k.....	80
3.2.2. Resina epóxica ^[MR]	81
3.2.3. Resina poliéster 33004.....	82
3.3 NORMATIVIDAD.....	84
3.4 ESPECÍMENES DE RESINA EPÓXICA Y RESINA POLIÉSTER.....	85
3.4.1 Manufactura.....	85
3.4.2 Resina Epóxica.....	89
3.4.3 Resina Poliéster.....	91
3.5 ESPECÍMENES DE MATERIAL COMPUESTO.....	93
3.5.1 Manufactura.....	93
3.5.2 Configuración de la fibra de carbono como tejido de refuerzo.....	96
3.5.3. Fracción Volumétrica de fibra de carbono.....	96
3.5.4 Porcentaje volumétrico de material compuesto con resina epóxica.....	97

3.5.5 Porcentaje volumétrico de material compuesto con resina poliéster.....	98
3.5.6 Fabricación de probetas para pruebas tensión.....	99
3.6 DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES	102
3.6.1. Sierra de corte.....	102
3.6.2 Maquina universal de ensayos SHIMADZU	103
3.7 PRUEBAS DE TENSIÓN	105
3.7.1 Probetas de resina epóxica.	106
3.7.2 Probetas de resina poliéster.	109
3.7.3 Probetas de material compuesto con resina epóxica	113
3.7.4 Probetas de material compuesto con resina poliéster	115
CAPÍTULO 4.....	118
Análisis y discusión de Resultados.....	118
4.1 Resultados de pruebas de Tensión	119
4.1.1 Resistencia a la tracción (σ).....	119
4.1.2 Deformación a la ruptura (ϵ) y porcentaje de elongación (n).....	119
4.1.3 Módulo de Young (E).....	120
4.2 Probetas Tipo 1 de Matriz Polimérica	120
4.2.1 Resina Epóxica.....	120
4.2.1.1 Esfuerzo Máximo.....	120
4.2.1.2 Elongación	121
4.2.1.4 Módulo de elasticidad.....	122
4.2.1.5 Curva de esfuerzo-deformación.....	122
4.2.2 Resina Poliéster	123
4.2.2.1 Esfuerzo Máximo.....	123
4.2.2.2 Elongación	124
4.2.2.4 Módulo de elasticidad.....	124
4.2.2.5 Curva de esfuerzo-deformación.....	125
4.3 Probetas de Material Compuesto	1266
4.3.1 Fibra de Carbono y Resina Epóxica	1266
4.3.1.1 Esfuerzo Máximo.....	126
4.3.1.2 Elongación	127
4.3.1.4 Módulo de elasticidad.....	1277

4.3.1.5 Curva de esfuerzo-deformación.....	128
4.3.2 Fibra de Carbono y Resina Poliéster	129
4.3.2.1 Esfuerzo Máximo.....	129
4.3.2.2 Elongación	130
4.3.2.4 Módulo de elasticidad.....	130
4.3.2.5 Curva de esfuerzo-deformación.....	131
4.4 Comparación de Resultados.....	131
4.4.1 Matrices Poliméricas	131
4.4.2 Material Compuesto y matrices.....	134
4.4.2.1 Laminado de fibra de carbón-matriz epóxica.....	134
4.4.2.2 Laminado de fibra de carbón-matriz poliéster y resina poliéster	136
4.4.3 Materiales Compuestos	139
CONCLUSIONES	143
TRABAJOS FUTUROS	145
ANEXOS	146
Anexo 1- Ficha técnica de proveedor de resina epóxica.....	146
BIBLIOGRAFÍA	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Resistencia representativas de diversas categorías de materiales.	35
Figura 1.2: Resina epóxica y catalizador.	37
Figura 1.3: Fibra de carbono impregnada de resina epoxi.....	38
Figura 1.4: Resina Poliéster	39
Figura 1.5: Fibra de carbono.....	41
Figura 1.6: Ejemplos de exoprótesis de fibra de carbono para diferentes niveles de amputación.....	48
Figura 1.7: Prótesis de James Potts del año 1800.....	49
Figura 1.8: Partes principales de prótesis transtibial de fibra de carbono.	51
Figura 1.9: Prótesis trastibiales de fibra de carbono del corredor olímpico Oscar Pisturios....	52
Figura 2.1: Propiedades mecánica de la matriz del refuerzo, y del material compuesto obtenido a partir de la combinación de ambos	54
Figura 2.2: Tres planos de simetría de un material ortotrópico.	63
Figura 2.3: Plano medio en un laminado simétrico	64
Figura 2.4: Laminado ortótropo.....	65
Figura 2.5: Configuración de laminado cuasi-isótropo $[0^\circ, 90^\circ, y \pm 45^\circ]$ s	66
Figura 2.6: Proceso de Manufactura Wet Lay-up.....	67
Figura 2.7: Impregnación por bobinado.	68
Figura 2.8: Autoclave para astilleros navales para materiales compuestos.....	69
Figura 2.9: Esquema de funcionamiento de autoclave.	69
Figura 2.10: Materiales auxiliares para el proceso de wet lay-up al vacío.....	70
Figura 2.11: Proceso de pultrusión.	71
Figura 2.12: Cargas de compresión y tensión sometidas a prótesis de miembro inferior	72

Figura 2.13: Modelo en CAD para prótesis de fibra de carbono.....	75
Figura 3.1: Probetas tipo I normalizadas bajo ASTM D638-03.....	86
Figura 3.2: Plano de probeta tipo I establecida por ASTM D638-03.....	87
Figura 3.3: Probetas tipo I en isométrico normalizadas bajo ASTM D638-03.....	87
Figura 3.4: Vaciado de silicón en molde negativo de aluminio con geometría de probetas tipo 1 ASTM D638.	88
Figura 3.5: Moldes de silicón para probetas tipo I.	88
Figura 3.6: Mezcla vertida en moldes de silicón para probetas Tipo I.....	89
Figura 3.7: Rectificado de especímenes de resina epóxica con lijas a diferentes grados de orientación.	90
Figura 3.8: Probetas Tipo I de resina epóxica.	90
Figura 3.9: Resina Poliéster vertida en molde de silicón para probetas tipo I.....	91
Figura 3.10: Especímenes de Resina Poliéster antes de Rectificado.	92
Figura 3.11: Proceso de rectificado de probetas de resina poliéster.....	92
Figura 3.12: Especímenes de resina poliéster rectificados.	93
Figura 3.13: Plano de probeta establecida por ASTM D3039.....	94
Figura 3.14: Probeta de material compuesto en isométrico.....	95
Figura 3.15: Manufactura al vacío de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica para pruebas de tensión.....	100
Figura 3.16: A) Acabado superficial de material compuesto con resina poliéster, B) Acabado superficial de material compuesto con resina epóxica.....	100
Figura 3.17: Probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica para pruebas de tensión.	101
Figura 3.18: Probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina poliéster para pruebas de tensión.....	102
Figura 3.19: Sierra de corte utilizada para material compuesto	103

Figura 3.20: Maquina de ensayos SHIMADZU AG-IC.....	104
Figura 3.21: Software utilizado para pruebas de tensión.....	104
Figura 3.22: Probeta de material compuesto sometida a prueba de tensión.	105
Figura 3.23: Mordazas de sujeción para pruebas de tensión.	106
Figura 3.24: Mala sujeción en área de mordaza superior en probeta 2, debido a superficie cóncava.....	112
Figura 3.25: Presentación de fallas por ensayo de tensión.	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Tejidos más comunes en fibra de carbono.....	42
Tabla 2.1 Propiedades comparativas de algunas fibras de refuerzo de plásticos.	59
Tabla 2.2 Propiedades de las resinas poliéster y epoxi.....	61
Tabla 2.3 Procedimientos para el proceso de manufactura RTM.....	71
Tabla 2.4: Esfuerzos de tensión y compresión de fibras utilizadas en la industria ortopédica.	73
Tabla 2.5: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en fabricación de prótesis.....	74
Tabla 2.6: Resultados de pruebas de tensión a lamiendo de fibra de carbono y resina epóxica.	74
Tabla 3.1 Compatibilidad de resinas para el tipo de fibra	81
Tabla 3.2 Propiedades de fibra de carbono 3k.....	81
Tabla 3.3 Propiedades de resina epóxica.	82
Tabla 3.4 Propiedades de resina poliéster.....	83
Tabla 3.5 Normas ASTM aplicadas para pruebas de tensión.....	84
Tabla 3.6 Medidas de probetas estipuladas por ASTM D638-03.....	86
Tabla 3.7 Masa en gramos para la mezcla de resina y catalizador.	89
Tabla 3.8. Medidas promediadas de probetas Tipo I de resina epóxica.	91
Tabla 3.9. Masa utilizada para preparación de resina poliéster para probetas D638.....	91
Tabla 3.10. Medidas promediadas de probetas Tipo I de resina poliéster.....	93
Tabla 3.11. Medidas de probetas estipuladas por ASTM D3039	94
Tabla 3.12. Arreglo de mezcla de matrices poliméricas termoestables para los laminados material compuesto.	95
Tabla 3.13. Fracción Volumétrica de una lámina de fibra de carbono.	97
Tabla 3.14. Medidas promediadas de probetas de material compuesto para pruebas de tensión ASTM D3039.	101

Tabla 3.15. Medidas promediadas de probetas de material compuesto para pruebas de tensión ASTM D3039.	102
Tabla 3.16. Especificaciones de cortador utilizado para material compuesto.	103
Tabla 3.17. Especificaciones de la maquina universal de ensayos	105
Tabla 3.18. Fallas por ensayo tensión en probetas de resina epóxica.	107
Tabla 3.19. Fallas por ensayo tensión en probetas de resina poliéster.	110
Tabla 3.20. Fallas por ensayo de tensión presentadas en probetas.	113
Tabla 3.21. Fallas por ensayo de tensión presentadas en probetas.	116
Tabla 4.1. Esfuerzos máximos de ensayos a tensión calculados en probetas tipo I de resina epóxica.	121
Tabla 4.2. Elongación unitaria y porcentaje de deformación de probetas tipo I de resina epóxica.	121
Tabla 4.3. Modulo de Young obtenido de probetas tipo I de resina epóxica.	122
Tabla 4.4. Esfuerzos máximos de ensayos a tensión calculados en probetas tipo I de resina poliéster.	124
Tabla 4.5. Elongación unitaria y porcentaje de deformación de probetas tipo I de resina poliéster.	124
Tabla 4.6. Módulo de Young obtenido de probetas tipo I de resina poliéster.	125
Tabla 4.7. Módulo de Young obtenido de probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica.	127
Tabla 4.8. Elongación unitaria y porcentaje de deformación de probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica.	127
Tabla 4.9. Módulo de Young obtenido de probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica.	128
Tabla 4.10. Módulo de Young obtenido de probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina poliéster.	129

Tabla 4.11. Elongación unitaria y porcentaje de deformación de probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster.	130
Tabla 4.12. Módulo de Young obtenido de probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina poliéster.	130
Tabla 4.13. Comparación de propiedades de mecánicas de matrices poliméricas termoestables	132
Tabla 4.14. Comparación de propiedades mecánicas de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica con respecto a matriz epóxica.	134
Tabla 4.15. Comparación de propiedades de mecánicas de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster con respecto a matriz poliéster.	137
Tabla 4.16. Comparación de propiedades de mecánicas laminados de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica con respecto a fibra de carbono y resina poliéster.	140

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1: Evaluación de los porcentajes de fracción volumétrica de compuesto de fibra de carbono y resina epóxica.....	98
Gráfica 3.2: Evaluación de los porcentajes de fracción volumétrica de compuesto de fibra de carbono y resina Poliéster.....	99
Gráfica 4.1: Curva esfuerzo-deformación de probetas tipo I de resina epóxica.....	123
Gráfica 4.2: Curva esfuerzo-deformación de probetas tipo I de resina poliéster.....	126
Gráfica 4.3: Curva esfuerzo-deformación de probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica.....	129
Gráfica 4.4: Curva esfuerzo-deformación de probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster.....	131
Gráfica 4.5: Comparación de esfuerzos en MPa de resinas.....	132
Gráfica 4.6: Comparación de porcentajes de deformación en matrices.....	133
Gráfica 4.7: Comparación de módulos de elasticidad de matrices poliméricas.....	133
Gráfica 4.8: Comparación del esfuerzo de laminado de fibra de carbono con resina epóxica y esfuerzo de matriz epóxica.....	135
Gráfica 4.9: Comparación del porcentaje de deformación de laminado de fibra de carbono con resina epóxica y porcentaje deformación de matriz.....	135
Gráfica 4.10: Comparación del módulo de elasticidad de laminado de fibra de carbono con resina epóxica y módulo de elasticidad de matriz epóxica.....	136
Gráfica 4.11: Comparación del esfuerzo de laminado de fibra de carbono con resina poliéster y esfuerzo de matriz poliéster.....	137
Gráfica 4.12: Comparación del porcentaje de deformación de laminado de fibra de carbono con resina poliéster y porcentaje de deformación de matriz poliéster.....	138
Gráfica 4.13: Comparación del módulo de elasticidad de laminado de fibra de carbono con resina poliéster y módulo de elasticidad de matriz poliéster.....	139

Gráfica 4.14: Comparación del esfuerzo de laminados de fibra de carbono con resina epóxica y fibra de carbono y resina poliéster.....140

Gráfica 4.15: Comparación del porcentaje de deformación de laminados de fibra de carbono con resina epóxica y de fibra de carbono con resina poliéster.....141

Gráfica 4.16: Comparación de los módulos de elasticidad de laminados de fibra de carbono con resina epóxica y fibra de carbono con resina poliéster.....142

GLOSARIO

CFRP: plásticos reforzados con fibra de carbono.

PAN: policacrilonitrilo, polímero utilizado en la fabricación de fibras sintéticas.

ASTM: American Society for Testing and Material, normas internacionales.

Resistencia: estudio de fuerzas internas en los cuerpos, ocasionadas por fuerzas externas.

Rigidez: Capacidad de resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la aplicación de fuerzas que actúan sobre su superficie.

Ductilidad: propiedad de aleaciones metálicas para deformarse plásticamente sin romperse, permite obtener alambres o hilos.

Porosidad: fracciones de espacios vacíos en un material, capacidad de un material de absorber líquidos o gases.

Dureza: oposición a deformaciones permanentes en un material.

Fragilidad: capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación plástica.

Compresión: resultante de esfuerzo sobre un cuerpo que reduce el volumen.

Tensión: fuerza interna aplicada, actúa sobre una superficie o área.

Resistividad: resistencia del paso de corriente eléctrica en un material.

Corrosión: deterioro de un material por agentes químicos en el entorno.

Viscosidad: medida de resistencia a las deformaciones producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción.

Adhesividad: propiedad de la materia para unir dos superficies.

Abrasión: acción mecánica de rozamiento y descase que provoca la erosión de un material.

Amorfo: sin forma o estructura definida.

Urdimbre: hilos longitudinales que se mantienen en tensión en un telar.

Tramas: hilo trasversal que es tejido en la urdimbre para formar la tela.

Anisotropía: clasificación de un material en donde sus propiedades varían según la dirección en la cual son examinadas.

Ortotrópico: clasificación de un material en donde sus propiedades mecánicas son únicas e independientes en tres ejes perpendiculares entre sí.

Isotropía: clasificación de un material cuando sus propiedades no dependen de la dirección entre ellas. Todas sus propiedades son las mismas en cualquier dirección.

Epiclorhidrina: líquido incoloro de olor fuerte, insoluble en agua, compuesto altamente reactivo con ácidos o bases fuertes. Es un elemento básico para la fabricación de plásticos.

Bipedestación: capacidad de andar o caminar sobre las dos extremidades inferiores del cuerpo.

Muñón: extremo cicatrizado de un miembro amputado.

SIMBOLOGÍA

m	Masa
ρ	Densidad
V_f	Volumen del tejido de fibra de carbono
V_m	Volumen de matriz epóxica
V_c	Volumen del material compuesto
σ	Esfuerzo
F	Fuerza
A	Área
ε	Elongación
n	Porcentaje de elongación
l_i	Longitud inicial
l_f	Longitud final
E	Módulo de elasticidad
dP	Fuerza aplicada
dL	Variación de la longitud en la probeta
L	Longitud inicial de la probeta
b	Ancho de la probeta
d	Espesor de la probeta

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interface directa y reconocible que los separa. Son heterogéneos pero sus propiedades no son las mismas en todo su volumen. Existe algunos materiales compuestos que son naturales como el hueso y la madera, pero en la actualidad la mayoría de los materiales compuestos que son utilizados son diseñados y fabricados por el hombre. ^[1]

Los materiales surgen de la necesidad de obtener materiales con propiedades combinadas que difícilmente se encuentran en los cerámicos, plásticos o metales. Un ejemplo cotidiano del uso de los materiales compuestos es en la industria del transporte ya que es necesaria la utilización de materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto, a la corrosión y al desgaste. De esta manera nace la necesidad de diseñar materiales compuestos ya que estas propiedades rara vez se dan juntas. ^[1]

La utilización de los materiales compuestos (también llamados composites) está en rápido crecimiento implantándose en una gran variedad de sectores gracias a sus magníficas propiedades mecánicas, así como su baja densidad. Los materiales reforzados con fibras son quizá los más empleados. La producción de fibras utilizadas en estos materiales, proporciona una idea de las composiciones más extendidas. Éstas son las siguientes por rango:

1. Fibras de vidrio
2. Fibras de Carbono
3. Fibras de Aramida
4. Otras fibras

El sector que utiliza una mayor proporción de materiales compuestos es el sector del transportes con un 29 % (coches, trenes, aviones), su gran utilización en este sector se debe a que reducen el consumo de combustible ya que disminuyen el peso de las estructuras, tienen excelente propiedades mecánicas así como su baja densidad. Otros sectores en los que estos materiales son de uso común son en el sector de la construcción con 18%, ya que cada vez se tiene al montaje de estructuras de piezas de materiales compuestos. Los composites también son utilizados en el sector de la industria petroquímica con un 16% y el sector eléctrico con un 14%.

Existen otros tres campos en donde se utilizan los materiales compuestos en menor medida y en continuo crecimiento: bienes de consumo con un 8%, Deporte u ocio con un 8% y el militar con un 8%.^[2]

Existe un alto porcentaje de materiales compuestos que poseen elevadas propiedades mecánicas con la ventaja de un menor peso que el de los materiales convencionales como acero, aluminio, hormigón, etc. Existe una gran variedad de materiales compuestos pero los más utilizados y desarrollados a nivel industrial son los que están formados por matrices orgánicas como las epóxica, vinilester, poliéster, etcétera; y fibras de alta resistencia como las de vidrio, carbono, aramida, orgánicas etc.

Los materiales compuestos de fibra de vidrio en matriz polimérica se emplean en la industria del transporte, química, construcción y deporte, debido a sus bajas densidades, buen comportamiento mecánico, estabilidad química, prolongada vida útil, bajo costo de fabricación, instalación y mantenimiento. De forma general, estos materiales son muy utilizados en la fabricación de tuberías para la industria petrolera, así como en el transporte y almacenaje de combustible y agua.

Los materiales compuestos de fibra de carbono en matriz polimérica, tienen actualmente un amplio campo de aplicaciones, en la industria aeronáutica, aeroespacial, del transporte y militar.^[3]

Teniendo en cuenta que día a día nace la necesidad de optimizar el diseño de materiales compuestos, se puede afirmar que es necesario conocer el funcionamiento de las propiedades mecánicas de los materiales que se van a construir, ya sea para la aplicación en diferentes sectores industriales. En este trabajo se desea conocer el comportamiento de las propiedades mecánicas para la aplicación de manufactura de prótesis transtibial.

OBJETIVO

Fabricar bajo el mismo método de manufactura dos materiales compuestos de fibra de carbono con resina epóxica, y fibra de carbono con resina poliéster; utilizando la misma orientación de fibras para implementar un laminado cuasi-isotrópico. Con el fin de aplicar pruebas de tensión a ambos materiales compuestos y de este modo conocer las propiedades mecánicas e implementarlas en la manufactura de una prótesis transtibial, en base a la industria ortopédica

HIPÓTESIS

Para la aplicación de los materiales compuestos, es necesario conocer sus características principales y comparar sus propiedades mecánicas; con el fin de obtener de una manera más clara y analítica los resultados y encontrar así las oportunidades de aplicación en la industria ortopédica. En este trabajo, la comparación de los laminados de fibra de carbono con diferentes matrices, puede dar gran variación de esfuerzos máximos. Pero al utilizarse el mismo material como refuerzo y la misma orientación en las láminas de fibra de carbono, estos materiales pueden aplicarse para el mismo fin, el cual es la implementación de los materiales compuesto para la manufactura de una prótesis transtibial.

JUSTIFICACIÓN

Los materiales compuestos tienen excelentes propiedades mecánicas, debido a su gran demanda que ha surgido en los últimos años, han tenido mayor porcentaje de productividad en su implementación en diferentes sectores industriales. Debido a esta demanda de utilización de composites, se tiene la necesidad de crear nuevos materiales especialmente de fibras de carbono con matrices poliméricas termoestables por su baja densidad y excelentes propiedades.

El principal objetivo es manufacturar bajo el método de aplicación de vacío (*VACCUM BAG WET LAY-UP*) laminados con misma configuración de fibra, pero aplicando distintas resinas; con el fin de encontrar la variación de esfuerzos máximos y otras propiedades mecánicas. De este modo encontrar el material compuesto más favorable para cumplir con las necesidades requeridas en la manufactura de una prótesis transibial.

Para la fabricación de los materiales compuestos se tomaron en cuenta las especificaciones establecidas en la norma ASTM D3039, así mismo para la comparación de las resinas poliméricas sin refuerzos de fibra de carbono, se llevó a cabo la norma ASTM D638 para la manufactura de las probetas tipo I. Con el fin de obtener propiedades mecánicas de los materiales y así compararlas con los análisis establecidos en el presente trabajo.

METODOLOGÍA

Caracterizar mecánicamente un material significa obtener valores cuantificables mediante pruebas mecánicas, que puedan dar una idea de su comportamiento bajo la aplicación de cierto tipo de carga. Para cumplir con cierto objetivo planteado del presente trabajo, es necesario determinar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos y compáralas para obtener el resultado más óptimo de acuerdo a la aplicación ortopédica.

Para ello es necesario conocer, antes que nada, la definición del material compuesto, el comportamiento mecánico en general de éste e identificar las propiedades principales de los composites al cual se está enfocando el trabajo; Primeramente, se propone un estudio bibliográfico con respecto a las generalidades que presentan los materiales compuestos, haciendo énfasis en la fibra de carbono y matrices termoestables utilizadas, para después enfocar la continuidad del estudio bibliográfico en los materiales utilizados en la industria ortopédica, particularmente en prótesis transtibiales, de esta manera conocer las propiedades mecánicas de los materiales compuestos en base a pruebas de tracción y así aplicarlos en la manufactura de una prótesis transtibial de acuerdo a las necesidades de la industria ortopédica.

METAS

- 1) Búsqueda y estudio bibliográfico de los materiales compuestos, tipos de fibras y matrices.
- 2) Búsqueda y estudio bibliográfico de la industria ortopédica: historia, prótesis transtibial, materiales compuestos utilizados y propiedades mecánicas requeridas.
- 3) Diseño y manufactura de los especímenes en base a la norma ASTM D3039 para la realización de pruebas mecánicas de tensión.
- 4) Diseño y manufactura de los especímenes en base a la norma D638 para resinas poliméricas.
- 5) Aplicar procesos de manufactura para la rectificación de probetas D638.
- 6) Realización de pruebas de tensión en base a las normas ASTM.
- 7) Análisis de resultados.
- 8) Conclusiones.
- 9) Publicación de artículo
- 10) Presentación oral en congreso.

ALCANCE

Con el presente estudio se busca encontrar y conocer el material compuesto más óptimo que se adapte a las propiedades requeridas que se necesitan para la manufactura de una prótesis transtibial, utilizando la misma configuración de fibras de carbono, pero aplicando diferentes matrices termoestables.

Esta investigación no se encarga del diseño de la prótesis, solo de encontrar las propiedades adecuadas del material con ayuda de pruebas mecánicas, las cuales son mencionadas en el objetivo. Con la finalidad de proponer el material compuesto más óptimo de la presente investigación.

CAPÍTULO 1
ESTADO DEL ARTE

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS MATERIALES Y SU CLÁSIFICACIÓN

1.1.1 Materiales

La ciencia e ingeniería de los materiales es un campo interdisciplinario que se ocupa de inventar nuevos materiales y mejorar los que ya son conocidos. Uno de los aspectos más fascinantes de la ciencia de los materiales es la investigación de la estructura de un material. Los materiales se clasifican en varios grupos principales: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores y materiales compuestos. El comportamiento de los materiales de cada uno de este grupo se determina por su estructura. ^[4]

Históricamente el desarrollo y la evolución de las sociedades han ido de la mano por sus capacidades para producir materiales que satisfagan las necesidades humanas. Las primeras civilizaciones en utilizar materiales son las de la edad de piedra, edad del cobre, edad de bronce y edad de hierro. Estas civilizaciones tuvieron una disponibilidad bastante más reducida de diferentes materiales, Inicialmente disponían de materiales naturales o seminaturales como piedras, madera, arcilla, pieles, etc. En los últimos 200 años los científicos llegaron a comprender la relación entre elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. ^[1]

Los compuestos más antiguos son los naturales, tales como la madera, la cual está compuesta de fibras de celulosa en una matriz de lignina. El hombre ha fabricado compuestos que se remontan desde tiempos antiguos donde se utilizaba paja reforzada con arcilla para la construcción de ladrillos o cerámicas.

La historia de la humanidad ha estado ligada estrechamente al tipo de materiales que cada sociedad ha desarrollado. No existen fechas exactas, pero se conocen históricamente etapas donde existieron avances en la sociedad humana. ^[5]

- La edad de piedra se refiere entonces al periodo en el que un grupo humano en particular empleaba este material junto con otros de origen natural como la madera o el hueso de manera predominante. Los aztecas en esta edad lograron importantes avances culturales ya que lograron importantes avances culturales por la gran variedad de materiales provenientes de rocas o materiales pétreos con los que contaban.
- La edad de bronce, o mejor conocida como la “edad de los metales”, en esta época se crearon tecnologías metalúrgicas complejas para la adquisición de metales y

aleaciones. La aleación más famosa es la del bronce ya que hace referencias históricas en algunas culturas, y para la revolución industrial, la aleación que marco la historia de este periodo fue la del acero.

- Las eras más reciente se conocen como “era de los polímeros”, debido a que el uso de los mismos se debe a avances químicos. Los polímeros pueden tener cualquier propiedad física, por ende, su utilización aumento bastante en las sociedades modernas.

Actualmente se crean materiales compuestos, o composites; los cuales son formados por la unión de dos o más materiales.

1.1.2 Materiales en Industria Ortopédica

En la ciencia de la medicina existe el campo de la ortopedia, en donde su empleo abarca una gran variedad de aplicaciones para implantes y prótesis.

Los materiales tienen una gran importancia dentro de los campos aplicables dentro de la ortopedia, ya que respecto a su aplicación o necesidad se utilizan materiales de acuerdo a sus propiedades y especificaciones; en ocasiones se deben de combinar materiales cerámicos, metálicos, polímeros y compuestos.

Se sabe que por necesidad y supervivencia el hombre primitivo tuvo que haber utilizado férulas o prótesis para satisfacer huesos fracturados o esguinces. No fue hasta en el antiguo egipcio en donde se encontraron férulas en momias, las cuales eran fabricadas por bambú, caña, madera o corteza de árboles. ^[6] La primera prótesis fue encontrada en una momia egipcia, donde está, estaba sujeta al antebrazo, el registro data del año 2000 a. C ^[7]. Los materiales ortésicos fueron evolucionando a través de la historia, manejando primeramente materiales como hierro, bronce, madera, cuero y polímeros naturales.

Gracias al avance de la ingeniería en ciencias de los materiales, la aplicación de los materiales compuestos en la industria ortopédica ha evolucionado significativamente, a pesar que su aplicación es reciente con unos 35 años aproximadamente. Su principal aplicación está orientada hacia la fijación de fracturas, cemento óseo, remplazo de cartílagos, tendones y ligamentos, etc., en uno de los campos en donde ha tenido más éxito de aplicación es en la fabricación de piernas artificiales y prótesis transtibiales. ^[8]

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE ACUERDO A SUS PROPIEADES

Los materiales se clasifican en grupos diferentes, mismos que poseen distintas estructuras y propiedades tanto físicas como químicas ^[9], estas clasificaciones de materiales ayudan a extender un amplio margen de aplicación para la ciencia de materiales en distintas áreas de manufacturas, los grupos se mencionan a continuación a partir del punto 1.2.1.

1.2.1 Metales y aleaciones

Incluyen aceros, aluminio, magnesio, zinc, hierro colado, titanio, cobre y níquel. En general, los metales tienen buena conductividad eléctrica y térmica. Los metales y aleaciones tienen una resistencia relativamente alta, gran rigidez, ductilidad o formabilidad y buena resistencia a los choques térmicos. Tienen utilidad en aplicaciones estructurales. Aunque también se utilizan las aleaciones para mejorar propiedades de ciertos metales.

1.2.2 Cerámicos y vidrios

Los cerámicos se pueden definir como materiales cristalinos inorgánicos. Son los materiales catalogados como más naturales. La arena de playa y las rocas son ejemplos de cerámicos naturales. Los cerámicos avanzados se usan para recubrimientos, para proteger sustratos metálicos en motores de turbinas, en productos como pinturas, plásticos, losetas para transbordadores espaciales. Las cerámicas tradicionales se usan para fabricar ladrillos, vajillas, artículos sanitarios y abrasivos, Estos materiales presentan porosidad, no son buenos conductores de calor y deben calentarse a muy altas temperaturas para llegar a su punto de fusión, son resistentes y duros, pero también son frágiles, tienen excelente resistencia a la compresión.

1.2.3 Semiconductores

Son materiales a base de silicio, germanio y arseniuro de galio, los cuales se utilizan en computadoras y en electrónica. La conductividad eléctrica de los materiales semiconductores es intermedia entre la de los aisladores cerámicos y los conductores metálicos. Estos materiales han activado la era de la información.

1.2.4 Polímeros

Los polímeros son materiales orgánicos comunes. Se producen con un proceso llamada polimerización. Muchos polímeros tienen resistividad eléctrica muy buena, proporciona

aislamiento térmico, buena relación de resistencia al peso, resistencia a la corrosión. Los polímeros termoplásticos tienen muy buena ductilidad y formabilidad, los polímeros termofijos son más resistentes, pero son más frágiles.

1.2.4.1 Matrices termoestables

Las resinas termoestables son aquellas que sufren una serie de reacciones químicas, llamadas *curado* o *reticulación*, dando lugar a un producto rígido, heterogéneo, insoluble e infusible. Este tipo de resinas son de alta rigidez y de baja densidades. Cuando el curado se completa, se produce un aumento de peso molecular de forma significativa. Las resinas termoestables son normalmente isotrópicas, pero llegan a perder propiedades de rigidez respecto a la temperatura de distorsión térmica, la cual define un límite superior para su uso en componentes estructurales.

1.2.4.2 Matrices Termoplásticas

Las resinas termoplásticas están constituidas por moléculas lineales unidas por enlaces sencillos. Tiene una temperatura por encima de la cual empieza a fluir y al enfriarlos por debajo de esa temperatura vuelven a su estado sólido. El proceso de los termoplásticos consta de una fase de calentamiento para ablandar el material y realizar el moldeo, y posteriormente cuenta con una fase de enfriamiento para solidificarlo una vez que ha sido moldeado en su forma apropiada.

Cuentan con buena resistencia química, absorción de humedad, buenas propiedades mecánicas, mayor producción debido a la menor duración en el ciclo de moldeo, las piezas moldeadas son fáciles de reparar, son resinas reciclables, y a diferencia de las termoestables las termoplásticas pueden almacenarse en ambientes más accesibles ya que no deben de ser controladas las condiciones de temperatura y humedad.

Como desventajas presentan requerimiento de temperatura y presiones elevadas para su moldeo, la impregnación en fibras es complicada, y por ello los materiales compuestos con matrices termoplásticas no cuentan con buenas propiedades mecánicas. De las matrices termoplásticas más utilizadas se encuentran el polipropileno, polietileno tereftalato, policarbonato, entre otras.^[10]

1.2.5 MATERIALES COMPUESTOS

Materiales que se forman a partir de dos o más materiales, con la finalidad de obtener propiedades que no posee un solo material. El concreto, la madera terciada y los plásticos reforzados con fibras de vidrio son ejemplos de materiales compuestos. Con materiales compuestos se pueden obtener materiales ligeros, resistentes, dúctiles, resistentes a altas temperaturas, o también se pueden fabricar herramientas de corte duras, resistentes al choque. Los vehículos aéreos y aeroespaciales dependen de materiales compuestos, como por ejemplo polímeros reforzados con fibra de carbono.

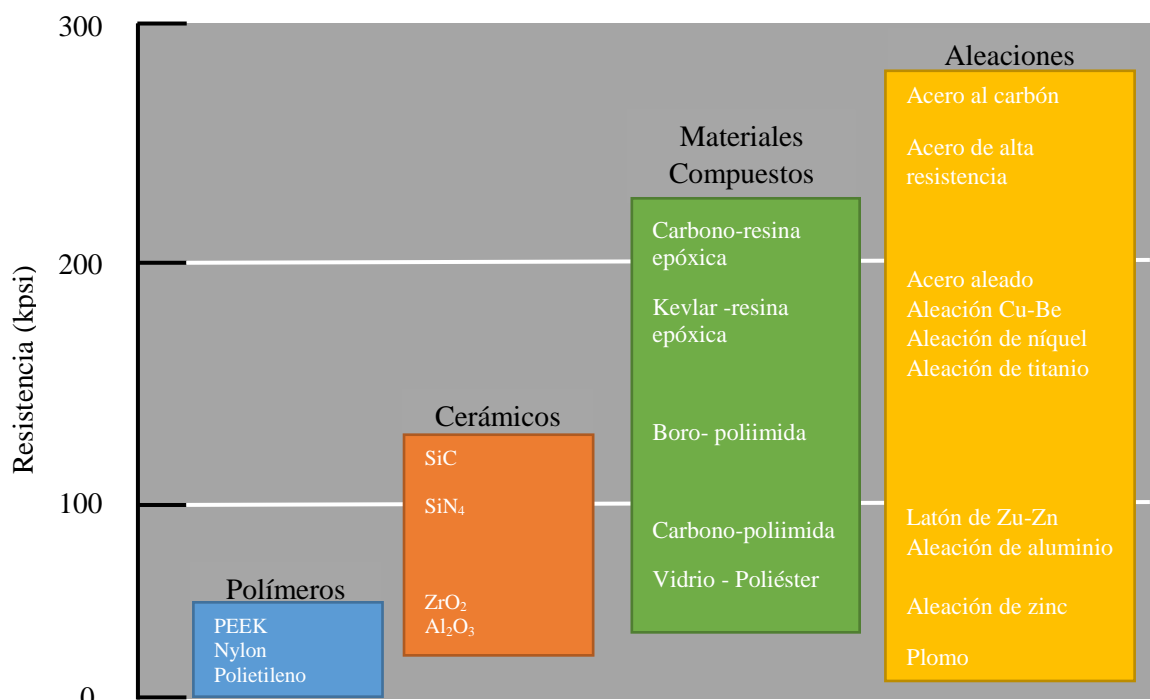


Figura 1.1: Resistencia representativas de diversas categorías de materiales. ^[4]

Como se ha mencionado, existen materiales compuestos que se componen solo por dos fases o elementos; principalmente se encuentra la matriz la cual es caracterizada como un medio continuo y el refuerzo el cual es el elemento más fuerte y resistente, este es denominado como medio discontinuo. Las propiedades de un material compuesto dependen de las propiedades de los materiales que lo conforman, de la distribución, orientación e interacción de los componentes.

Los materiales compuestos de matriz polimérica se dividen en compuestos termoestables y termoplásticos.

Los materiales compuestos de matriz polimérica se pueden definir como materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a agentes químicos. Por sus características particulares pueden ser moldeados con diferentes geometrías.

1.2.5.1 Resina Epóxica

Los primeros intentos comerciales para preparar resinas de epíclorhidrina se hicieron en 1927 en los Estados Unidos. El crédito para la primera síntesis de resinas epoxi basadas en bisfenol-A es compartida por Pierre Castan de Suiza y S.O. Greenlee de los Estados Unidos en 1936.^[13]

Una resina epoxi o poliepóxido es un polímero termoestable (la resina) que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor. Las resinas epoxi están constituidas comúnmente de dos componentes que se mezclan previamente antes de ser usados; al mezclarse reaccionan causando la solidificación de la resina, su curado se realiza a temperatura ambiente, durante ese curado o secado se forman enlaces cruzados lo que hace que su peso molecular sea elevado.^[11]

Las resinas epoxi se usan tanto en la construcción de moldes como de piezas maestras, laminados, extrusiones y otros procesos en la producción industrial. Los resultados son más baratos, resistentes y rápidos de producir que los que están hechos de madera, metal, etc. Los compuestos de fibras y epóxidos, aunque son más caros que los de resinas de poliéster o de éster de vinilo, pero producen piezas más resistentes.



Figura 1.2: Resina epóxica y catalizador. ^[12]

El estado físico de la resina epóxica puede ser cualquiera, desde un líquido de viscosidad baja a un sólido de alto punto de fusión; forma una gama de materiales con combinaciones de propiedades únicas, que ofrecen una aportación considerable a todas las industrias más importantes, entre las que se encuentran: ^[13]

- Los aviones y la ingeniería aeroespacial
- Automoción
- Construcción e ingeniería a gran escala
- Sector químico
- Electricidad
- Electrónica
- Alimentación y bebidas
- Navegación
- Ocio
- Ingeniería ligera



Figura 1.3: Fibra de carbono impregnada de resina epoxi. ^[14]

Las resinas epóxicas al tener un amplio campo de aplicación cuenta con una gran variedad de propiedades tanto mecánicas, físicas y químicas, las cuales son muy favorables por su gran versatilidad y utilización

- Mínima contracción durante el proceso de curado, ya que habitualmente el proceso no implica la separación de productos secundarios volátiles.
- Adhesividad: por su estructura rica en grupos polares hidroxilos y éteres, las resinas epoxi son excelentes adhesivos, sin necesidad de tiempos de exposición largos ni de grandes presiones.
- Excelentes propiedades mecánicas: superior a las de cualquier otro recubrimiento. Su bajo índice de contracción disminuye la posibilidad de tensiones.
- Alto poder de aislante eléctrico.
- Gran resistencia química, el cual es influenciado por el agente de curado (catalizador).
- Gran versatilidad: siendo los plásticos termoestables más versátiles, ya que pueden alterarse sus propiedades sin más que variar cualquiera de las modificaciones y los agentes de curado. ^[13]

1.2.5.2 Resina Poliéster

La resina poliéster se presenta como un polímero termoestable, es empleada en la manufactura de materiales compuestos. La resina poliéster es líquida a temperatura ambiente, y puede ser llevada a un estado sólido con la adición de un catalizador.

En las resinas poliéster se pueden encontrar las del tipo orto-ftálicas las cuales son pre-aceleradas de uso general para ambiente no agresivos y las iso-ftálica, que son no pre-aceleradas, las cuales cuentan con un desempeño mecánico, resistente al agua y a agentes químicos.

El curado, que es la transformación de líquido a sólido viene acompañado de una reacción exotérmica (desprende calor). Este cambio de estado no se presenta de momento inmediato, es una reacción que ocurre a medida que transcurre el tiempo, generándose de forma gradual, pasando de líquido a gelatinoso y finalmente ha estado sólido. En las resinas poliéster el catalizador es llamado MEK (metil-etil-cetona) peróxido.^[15]



Figura 1.4: Resina Poliéster^[16]

Se utiliza como matriz termoestable para la construcción de equipos, tuberías anticorrosivas y fabricación de pinturas.

Las propiedades generales de este polímero termoestable son las siguientes:

- Excelente estabilidad dimensional.
- Buena resistencia a ambientes químicamente agresivos.
- Buenas propiedades mecánicas.
- Excelentes propiedades eléctricas.

- Resistentes al agua y rayos UV. ^[17]

La caducidad aproximada de la resina de poliéster es de 6 meses. Si se ha abierto el envase la vida del producto disminuye. Para su conservación se debe evitar la humedad, la alta temperatura y la luz. ^[18]

1.2.5.3 Fibra de Carbono

Para conseguir en un material compuesto una mejor resistencia a la fatiga y una mejor rigidez en relación resistencia-peso se utilizan las fibras como refuerzo. En un material compuesto la matriz transmite la fuerza hacia las fibras, las cuales soportan la mayor parte de fuerza aplicada. Para ello se debe de llevar a cabo una selección apropiada del tipo, cantidad y orientación de la fibra o refuerzo a utilizar.

La presentación o configuración de las fibras (fibras cortas, largas, tejidos y otros) son las responsables de conferir propiedades mecánicas importantes al material (elevada resistencia a la tracción específica y elevado módulo específico). Además, características como: ligereza, resistencia térmica, compatibilidad con las resinas, dureza, rigidez y adaptabilidad al proceso de fabricación.

El carbono forma parte de toda la química orgánica y de 20 millones de moléculas conocidas, de las cuales el 79% las clasificamos como orgánicas. El átomo de carbono tiene 6 electrones, con la particularidad de que puede formar 4 enlaces covalentes con otros átomos, con lo cual adquiere una geometría de tetraedro, que nos recuerda al diamante.

El carbono se puede combinar con muchos elementos como: N, S, O, Cl, Br y P que son estables termodinámicamente, y con otros átomos de carbono con uniones muy fuertes (el diamante) y puede formar cadenas de carbonos de gran longitud

En 1958, Roger Bacon creó fibras de alto rendimiento de carbono en el Centro Técnico de la Union Carbide Parma, ahora GrafTech International Holdings, Inc., que se encuentra en las afueras de Cleveland, Ohio. ^[20] Estas fibras se fabricaban mediante el calentamiento de filamentos de rayón hasta carbonizarlos. Este proceso resultó ser ineficiente, ya que las fibras resultantes contenían sólo un 20% de carbono y tenían malas propiedades de fuerza y de rigidez.

En la década de 1960, un proceso desarrollado por Akio Shindo de la Agencia de Ciencia Industrial Avanzada y Tecnología de Japón, con poliacrilonitrilo (PAN) como materia prima. Este había producido una fibra de carbono que contiene alrededor del 55% de carbono. El alto potencial de la fibra de carbono fue aprovechado en 1963 en un proceso desarrollado en el Establecimiento Real de aeronaves en Hampshire, Reino Unido. El proceso fue patentado por el Ministerio de Defensa del Reino Unido y luego autorizada a tres empresas británicas: Rolls-Royce, Morganita y Courtaulds. Estas empresas fueron capaces de establecer instalaciones de producción industrial de fibra de carbono. Rolls-Royce se aprovechó de las propiedades del nuevo material para entrar en el mercado americano con motores para aviones.

Durante la década de 1970, los trabajos experimentales para encontrar materias primas alternativas llevaron a la introducción de fibras de carbono a partir de una brea de petróleo derivadas de la transformación del petróleo. Estas fibras contenían alrededor de 85% de carbono y tenía una excelente resistencia a la flexión. ^[20]

La fibra de carbono es un material formado por fibras de 50-10 micras de diámetro, compuesto principalmente de átomos de carbono. Los átomos de carbono están unidos entre sí en cristales que son más o menos alineados en paralelo al eje longitudinal de la fibra. La alineación de cristal da a la fibra de alta resistencia en función del volumen (lo hace fuerte para su tamaño). Varios miles de fibras de carbono están trenzados para formar un hilo, que puede ser utilizado por sí mismo o tejido en una tela.

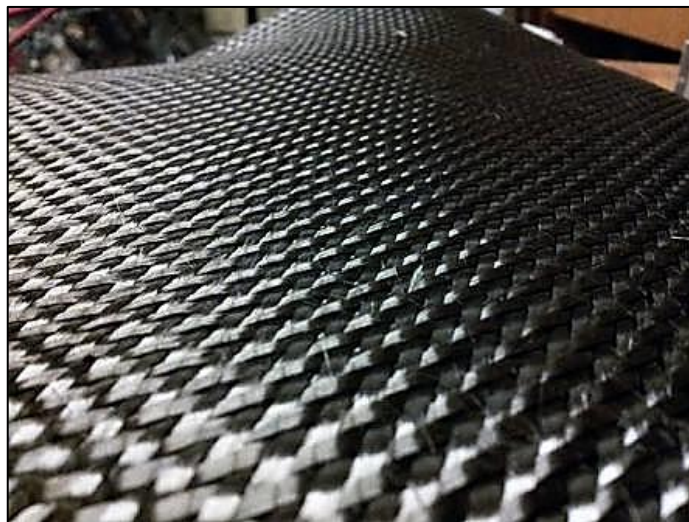


Figura 1.5: Fibra de carbono. ^[19]

Las fibras de carbono generalmente se combinan con otros materiales para formar un compuesto. Cuando se combina con una resina plástica es moldeada para formar un plástico reforzado con fibra de carbono.

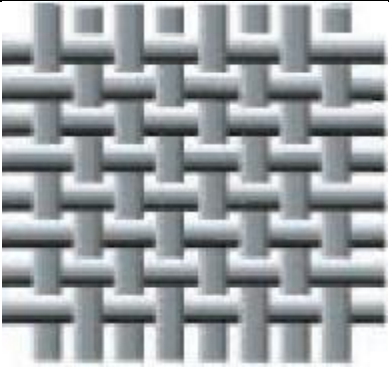
Las principales propiedades de la fibra de carbono son:

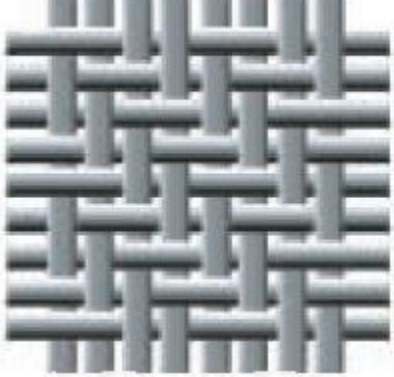
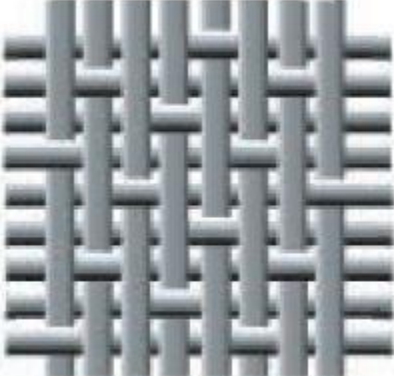
- Elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Baja densidad, en comparación con otros materiales, como por ejemplo el acero.
- Resistencia a agentes externos.
- Gran capacidad de aislamiento térmico.
- Resistencia a las variaciones de temperatura, conservando su forma (solo si se utiliza matriz termoestable). Para estas variaciones se requiere de un equipo especializado como el horno de autoclave.
- Elevado precio de producción.

Las fibras de carbono presentan una combinación de características que compensan sus precios y las convierten (para determinadas aplicaciones) en una alternativa valiosa.

La fibra de carbono está compuesta por muchos hilos de carbono en forma de hebra. Existen muchas clases de FC con propiedades diversas, adaptadas a muchas aplicaciones. La tabla 1.1 muestra las características e imágenes de los tejidos más comunes en fibra de carbono:

Tabla 1.1. Tejidos más comunes en fibra de carbono. ^[10]

Imagen	Descripción
	<p>Tejido plano o plain, un tejido plano es aquel en el que cada hilado longitudinal y transversal pasa por encima de un hilo y por debajo del próximo. Esta construcción proporciona una tela reforzada que es ampliamente usada en aplicaciones generales y garantiza laminados de buen espesor. Este tipo de tela es muy estable, por lo que difícilmente se distorsiona.</p>

	<p>Tejido cruzado o twill: en un tejido cruzado el número de hilados longitudinales que pueden pasar sobre los transversales (y recíprocamente) pueden variarse, dando distintas construcciones de tejidos cruzados. Estos se marcan más fácilmente que los tejidos planos y son fácilmente humedecidos para que se adhieran a la resina.</p>
	<p>Tejido satinado o satín: en las telas del tejido satinado el entrelazado es similar al del cruzado, aunque el número de hilados longitudinales y transversales que pasan recíprocamente por encima y por debajo, antes del entrelazado, es mayor. Por lo tanto, un lado del tejido se construye principalmente con fibras longitudinales, y el otro lado, con transversales. Tiene un excelente acabado superficial, similar al satén, de allí su nombre.</p>

Las fibras de carbono tienen muchas aplicaciones en la industria aeronáutica y automovilística, al igual que en barcos y en bicicletas, donde sus propiedades mecánicas y ligereza son muy importantes.

En los últimos años se ha estado haciendo muy común en otros artículos de consumo como patines en línea, raqueta de tenis, edificios, ordenadores portátiles, cañas de pesca e incluso joyería. [21]

1.3 PRINCIPALES MATERIALES UTILIZADOS EN PRÓTESIS.

Un biomaterial es un material utilizado para crear un dispositivo médico, el cual tiene como objetivo principal, la interacción con los sistemas biológicos, es un material que puede ser sintético el cual es empleado para reemplazar partes de un sistema vivo. No cualquier material puede ser empleado como biomaterial, ya que para ello se debe tener la característica de biocompatibilidad, ya que esta es la habilidad de un material para ser aceptado por el cuerpo del paciente.

La principal aplicación de los biomateriales es en el sistema óseo, en donde se utiliza para remplace de articulación, placas para fijación de fracturas, cemento de huesos, reparación de defectos, ligamentos y tendones artificiales e implantes dentales. [22]

1.3.1 Ortopedia

La ortopedia es una de las áreas más sobresaliente en la aplicación e implantes ortopédicos de biomateriales. Lamentablemente existen enfermedades que afectan la estructura y funcionamiento de articulaciones de cadera, rodilla, hombro, codo, etc., las cuales original dolor e inmovilidad al paciente. Existe desarrollo de prótesis de remplazo en donde se utilizan materiales como aleaciones de titanio, acero inoxidable, balto-cromo, cerámicos, materiales compuestos y polietileno de peso molecular alto. [22]

1.3.2 Biomateriales Metálicos

Los materiales metálicos son necesarios, ya que se emplean como componentes estructurales, con el fin de reemplazar partes de cuerpo humano. En la actualidad las aplicaciones clínicas requieren materiales con mejores propiedades mecánicas y resistencias a la corrosión en el organismo humano por ello las aleaciones metálicas son buenos candidatos, además estos materiales pueden ser maleables para darles aplicación a una gran variedad de formas técnicas. En la ortopedia, como ya se mencionó, los metales y aleación se utilizan para fijaciones de fracturas y como sustitutos de articulaciones. Aunque existen muchos materiales metálicos, no todos pueden ser implementados como biomateriales, ya que estos deben ser tolerados por el organismo, por lo cual es fundamental conocer la cantidad de metal que es liberado en los tejidos vivos, ya que debe de ser muy baja.

Los materiales metálicos más utilizados en la actualidad para la fabricación de implantes y prótesis son acero inoxidable, aleaciones cobalto y cromo y el titanio puro o aleado con otros metales. [22]

1.3.3 Materiales cerámicos como biomateriales.

Las cerámicas con aplicaciones médicas constituyen un interesante campo de investigación y desarrollo para la fabricación y/o fijación de implantes. Las cerámicas se introdujeron como biomaterial en la década del 70 cuando comenzaban a detectarse fracasos en algunos de ellos utilizados hasta ese momento, como eran el acero

inoxidable, las aleaciones base cobalto y el acrílico (polimetilmetacrilato). Los fracasos se debían, entre otras razones, a la encapsulación de estos materiales (recubrimiento por un tejido fibroso), lo que hizo dirigir la mirada hacia las cerámicas en un intento de buscar una buena oseointegración. Sin embargo, la fragilidad de las cerámicas restringió en gran medida su campo de aplicación, seleccionándolas únicamente para aplicaciones que no necesitaran elevadas prestaciones mecánicas, a excepción de la alúmina y la zirconia, que se emplearon y emplean en articulaciones de cadera. Las cerámicas permiten recambiar muchas piezas del cuerpo humano, aunque sus aplicaciones hoy en día están centradas en la fabricación de dispositivos que no deban soportar cargas, como es el caso de la cirugía del oído medio, en el relleno de defectos óseos tanto en cirugía bucal como en cirugía ortopédica y en el recubrimiento de implantes dentales y articulaciones metálicas; pero su futuro como biomaterial es mucho más ambicioso ya que presentan determinadas propiedades que son difíciles de imitar con otros materiales.

Las cerámicas inertes más frecuentemente empleadas son la alúmina (Al_2O_3), la zirconia (ZrO_2) y nitruro de silicio (Si_3N_4). Estos tres materiales tienen la característica de que presentan una alta resistencia a la compresión, una excelente resistencia al desgaste y una inercia química casi total. ^[22]

1.3.4 MATERIALES COMPUESTOS EN PRÓTESIS

En los últimos años el estudio de la aplicación de los materiales compuestos ha ido incrementando en la industria ortopédica para la aplicación de prótesis. En la actualidad existen polímeros termoplásticos que son muy utilizados por su precio accesible en el mercado y por su proceso de manufacturas no complejo, como en el caso del polietileno y el polipropileno; sin embargo, estos materiales tradicionales no brindan buenas propiedades mecánicas en base a sus resistencias y su peso. En la mayoría de los casos, cuando el material falla, el paciente debe de recurrir a realizarse nuevamente el elemento protésico. ^[23]

En la aplicación de nuevos materiales compuestos que se utilizan en la construcción de elementos de ortesis y prótesis se debe de tomar en cuenta la recuperación del paciente, para la selección correcta de estos materiales debe de intervenir la durabilidad y las propiedades mecánicas del elemento construido.

La principal utilización de materiales compuestos para la industria ortopédica resalta en la incrementación de resistencia a la fractura, fatiga y falla; ya que los principales esfuerzos a los que son sometidos los elementos protésicos son a cargas de tensión y compresión. Los requerimientos de un material compuesto para su utilización en la ortopedia deben de ser ligero, resistente a tensión y compresión, flexible, torque, rigidez para resistir esfuerzos de flexión y cizallamiento, dureza para fracturas de impactos, capacidad para resistir esfuerzos en todos los planos, económico y fácil de aplicar y manufacturar. [23]

1.3.4.1 Fibras en materiales compuestos biocompatibles

Las fibras más comunes utilizada en la intrusaría ortopédica para la manufactura de materiales compuesto son: fibra de vidrio, Kevlar y fibra de carbono. Al utilizar cada material, las propiedades y características suelen ser completamente diferentes: [24]

- Fibra de vidrio: suele ser el refuerzo más común y económico, es el material más pesado en comparación con kevlar y carbono, la impregnación de resina es más fácil de obtener en varias formas. Su principal propiedad es durabilidad y flexibilidad.
- Kevlar: es el refuerzo más ligero y más caro dentro de las fibras para materiales compuestos, provee una excelente resistencia a la fractura por impacto, ya que puede absorber grandes cargas de torque y de esfuerzos. Una de sus desventajas se muestra cuando se encuentra bajo cargas, ya que no es lo suficientemente buena para mantenerla forma de la estructura deseada. Es cinco veces más débil bajo esfuerzos de tensión y compresión. Es muy buen resistente a agentes químicos pero su saturación con resina suele ser difícil de controlar.
- Fibra de carbono: el compuesto más útil para la aplicación de aparatos ortopédicos es el carbón. Es casi tan ligero como el Kevlar. Las fibras de carbono son muy rígidas y son capaces de mantener su forma bajo esfuerzos de tensión y compresión.

1.3.4.2 Resinas y Polímeros Para Prótesis

En la industria ortopédica se utilizan principalmente los materiales termoplásticos como el polietileno o propileno de los cuales su principal materia prima es un polímero plástico. En cambio, los materiales compuestos es el resultado de la combinación de resinas junto con los refuerzos de fibras mencionadas en el apartado 1.8.1.

Hoy en día surgen investigaciones utilizando resinas termoestables como las resinas epóxica y poliéster las cuales cuentan con bajo módulo de elasticidad y baja densidad, por ello la resistencia del material compuesto manufacturado está dominada principalmente por la fibra empleada.

1.4 PRÓTESIS

La prótesis se considera como un aparato externo al cuerpo del paciente, con el objetivo de reemplazar o sustituir, ya sea parcialmente o completamente un miembro que esté ausente o deficiente. Las prótesis han sido utilizadas por los humanos a lo largo de la historia, existen varios tipos, para diferentes funciones y aplicación, pero siempre con el mismo alcance que es, que el paciente encuentre la satisfacción, protección y bienestar. Una de las desventajas de la fibra de carbono es el compromiso estructural ya que la rigidez crea fragilidad y una resistencia pobre al impacto.

Los principales tipos de prótesis son los siguientes ^[25]

- Endoprótesis: son aquellas prótesis que se implantan mediante cirugía, se anclan al hueso y sirven para sustituir articulaciones dañadas, ya sea por traumatismo o por artrosis.
- Exoprotesis: dispositivos que sustituyen total o parcialmente un miembro del cuerpo humano por amputación, su implementación no requiere medios quirúrgicos.

Las prótesis de extremidades inferiores se clasifican respecto al tiempo de uso, diseño y a la forma de fabricación. Existen tres tipos de prótesis: ^[26]

- Inmediata: se coloca en la misma sala de operaciones cuando se lleva a cabo la amputación.
- Temporera: Se utiliza para facilitar la rehabilitación y evitar el edema del muñón.
- Definitiva: se construye entre 3 a 9 meses después de la amputación, ya que se estabilice la circunferencia del muñón.



Figura 1.6: Ejemplos de exoprótesis de fibra de carbono para diferentes niveles de amputación.

1.4.1 Antecedentes Históricos de Prótesis

La implementación de prótesis para cubrir las necesidades del hombre ha surgido desde la época de las antiguas pirámides hasta la primera guerra mundial, ya que este es un campo en donde el hombre tiene como su objetivo mejorar día con día. Como se mencionó en el apartado 1.1 los egipcios fueron los primeros pioneros de la tecnología protésica, ya que elaboraban sus prótesis con fibras; la primera prótesis fue encontrada en una momia la cual tenía el primer dedo de pie protésico y se cree que pudo haber sido funcional.

La primera pierna artificial se desenterró en Capua, Italia en el año 1858, esta prótesis data del año 300 a. C., estaba elaborada con hierro y bronce, y tenía un núcleo de madera, aparentemente pertenecía a un amputado por debajo de la rodilla, lo cual hoy en día se considera como una prótesis transtibial.

En la edad media hubo pocos avances en el campo de la protésica, ya que la mayoría de las prótesis fabricadas eran utilizadas para esconder deformidades o heridas producidas en el campo de batalla. Los comerciantes, sobre todo los armeros diseñaban y creaban extremidades artificiales, pero sobre todo los relojeros eran quienes particularmente agregaban funciones internas complicadas con resortes y engranes.

En la era del renacimiento, la cual data de 1400 a 1800 las prótesis se elaboraban principalmente de hierro, acero, cobre y madera,

En 1696, Pieter Verduyn desarrollo la primera prótesis por debajo de la rodilla sin mecanismo de boqueo, lo cual se considera la base de los actuales dispositivos de articulación. En 1800 James Potts diseño una prótesis elevadora con una pierna de madera con encaje, una articulación de rodilla de acero y un pie articulado controlado por tendones de cuerda de tripa de gato, desde la rodilla hasta el tobillo.



Figura 1.7: Prótesis de James Potts del año 1800

En 1858 Douglas Bly invento y patento la pierna anatómica Doctor Bly, la cual es considerada como el invento más completo y exitoso desarrollado en el área de extremidades artificiales.

En 1863, Dubois Parmlee invento una prótesis avanzada con un encaje de succión, una rodilla policéntrica y un pie multiarticulado. Cinco años más tarde se sugiriera el uso del aluminio en lugar de acero para las extremidades artificiales para que fueran más livianas y funcionales.

En 1912 se creó el dispositivo más liviano por el aviador ingles Marcel Deseoutter, el cual perdió su pierna en un accidente de avión y elaboro la primera prótesis de aluminio con la ayuda de su hermano, quien era ingeniero.

Para los tiempos modernos, lamentablemente el desarrollo de la guerra civil estadounidense, aumentaba la cantidad de amputados, lo cual obligo a los estadounidenses a ingresar al campo de la protésica. No fue hasta después de la segunda guerra mundial, donde los veteranos estaban insatisfechos por la falta de tecnología de sus dispositivos, y por ello exigían mejoras.

El gobierno de Estados Unidos cerro un trato con compañías militares para mejorar la función protésica en lugar de armas. Este acuerdo llevo el camino para desarrollar y producir prótesis modernas. Los dispositivos actuales son mucho más livianos, se elaboran con plástico, aluminio y materiales compuestos que proporcionan a los amputados dispositivos más funcionales y hechos a la medida del paciente. [27]

1.4.2 Prótesis de miembro inferior.

Una prótesis de miembro inferior es utilizada para remplazar toda o gran parte de la pierna o pie. Estas prótesis son incorporadas una vez que las heridas del muñón están completamente sanas. Su objetivo principal es realizar apoyo durante la bipedestación y a la contribución dinámica para llevar a cabo actividades de marcha y carrera. Como objetivos secundarios, se pretende que este tipo de prótesis tenga una buena resistencia a impactos y a fuerzas del peso corporal, así como lograr una estabilidad del miembro, conseguir progreso con del centro de gravedad de marcha y una correcta alineación de los miembros inferiores. Una amputación del miembro inferior provoca la pérdida de todos los mecanismos empleados para realizar el ciclo de marcha, tales como la capacidad de frenado, capacidad de impulso y propulsión.

Las funciones principales que debe ofrecer las prótesis del miembro inferior son: [28]

- Capacidad de apoyo estático y dinámico.
- Flexión de la prótesis durante la fase de oscilación.
- Suplir la función de articulaciones perdidas.
- Capacidad de control de movimiento.
- Capacidad de amortiguamiento.
- Restablecer equilibrio y simetría,

1.4.2.1 Prótesis Transtibial

La prótesis transtibial es considerada como prótesis de miembro inferior, el objetivo principal de estas prótesis es realizar apoyo durante la bipedestación y contribuir en fuerzas dinámicas para llevar a cabo la marcha o carrera del paciente; además pretenden conseguir una correcta amortiguación de impactos y fuerzas del peso corporal, lograr estabilidad del miembro, conseguir progresión durante la marcha y una correcta alineación de los miembros inferiores.

Una amputación inferior provoca la pérdida de todos los mecanismos empleados para el ciclo de marcha (capacidad de frenado, de impulso y de propulsión, entre otros). Por lo que las prótesis transtibiales tienen como finalidad tratar de recuperar al paciente para la optimización de cualquier tipo de tarea.

Las prótesis transtibial se utilizan para reemplazar el segmento del miembro inferior ausente a nivel de la tibia, por debajo de la rodilla. Las partes que caracterizan este tipo de prótesis son:

- **Socket o encaje:** aloja el muñón y está constituido por dos partes, un encaje duro o externo y otro blando e interno que cumple con la función de amortiguamientos a impactos y reducción de fuerzas de fricción y cizalladura.
- **Segmento Intermedio:** sirve de conexión entre la rodilla el pie protésico, es el componente distal que proporciona el contacto con el suelo.
- **Pie:** existen pies no articulados, los cuales simulan cierta flexión plantar del tobillo con el apoyo del talón, pie articulado, este permite cierto grado de flexión plantar o dorsal del tobillo, se basa en una serie de topes elásticos que limitan el movimiento articular, y por último se menciona el pie almacenador de energía, mismo que consigue un mayor impulso en el despegue debido a la acumulación de energía durante la fase de apoyo.

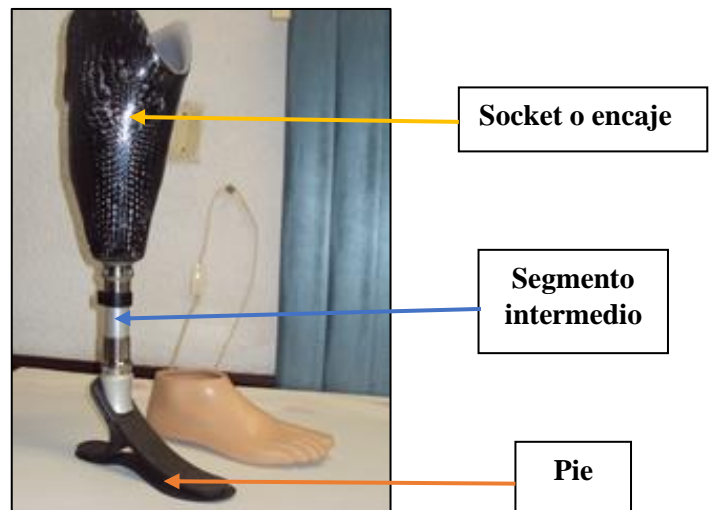


Figura 1.8: Partes principales de prótesis transtibial de fibra de carbono. ^[30]

En la prótesis transtibial, el paciente carece de la extremidad bajo la rodilla. La persona mantiene su articulación natural de rodilla. El diseño es más sencillo ya que no exige el diseño de articulación de rodilla. [28]



Figura 1.9: Prótesis transtibiales de fibra de carbono del corredor olímpico Oscar Pistorius [31]

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

Un material compuesto está formado por la combinación de dos o más materiales distintos para formar un nuevo material con propiedades mejoradas. Por ejemplo, las rocas son combinadas con cemento para hacer concreto. Las propiedades mejoradas de un material pueden ser tanto físicas como químicas. Los compuestos más comunes son los que están fabricados por fibras unidas mediante un aglutinante. ^[31]

Las propiedades de los materiales compuestos dependen de una serie de factores:

- a) Propiedades de la matriz y del refuerzo
- b) Contenido de refuerzo
- c) Orientación del refuerzo
- d) Método de producción del material compuesto

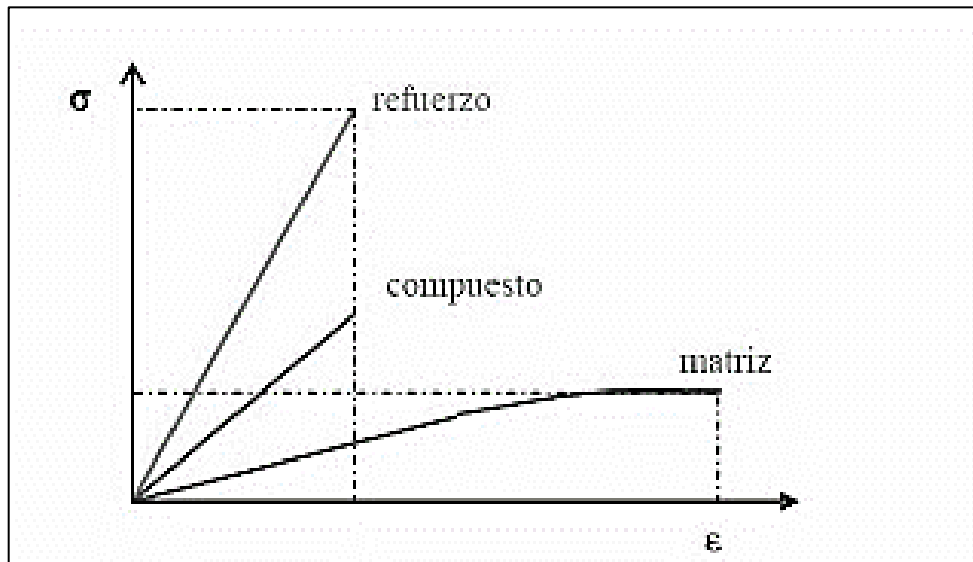


Figura 2.1: Propiedades mecánicas de la matriz del refuerzo, y del material compuesto obtenido a partir de la combinación de ambos ^[3]

En algunas ocasiones se utilizan compuestos donde los diferentes materiales son acomodados por capas para formar un producto con características mejoradas. En el caso de la construcción en “sándwich”, donde el núcleo es un material ligero que está en medio de dos caras donde los materiales son rígidos y fuertes; puede ser clasificado en varias formas, siguiendo los principales factores:

- Reforzamiento
 - Fibras largas continuas
 - Orientación unidireccional de fibras

- Orientación bidireccional de fibras
 - Orientación aleatoria
- Fibras discontinuas
 - Orientación aleatoria
 - Orientación preferencial
- Partículas
 - Orientación aleatoria
 - Orientación preferencial
- Configuración de laminados
 - *Laminado unidireccional*: una sola lámina (también llamada capa), o varias láminas del mismo material y orientación en todas las láminas.
 - *Laminado*: varias láminas apiladas o unidas, dónde al menos algunas láminas tengan diferente material u orientación.
 - *Compuestos amontonados*: cada lámina no puede ser identificada, inclusive el compuesto de moldeo, partículas reforzadas del compuesto, etc.
- Estructura Híbrida
 - Diferentes materiales en varias láminas
 - Diferente refuerzo en una lámina

El refuerzo de fibras es mucho más preferente porque la mayoría de los materiales son mucho más fuertes en forma de fibras que en su forma natural. El factor principal para utilizar la composición de materiales con fibras es la reducción de peso, resistencia a la corrosión, reducción de piezas de ensamble, transparencia electromagnética, mejoramiento a la resistencia de fatiga, aislamiento térmico y acústico, baja expansión térmica, baja o alta conducción térmica, entre otros. ^[31]

2.2 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Como ya se ha mencionado en el apartado 1.1 un material compuesto es la combinación de dos o más materiales a partir de una unión química o no química, el objetivo principal de los materiales compuestos, es crear materiales con mejores propiedades mecánicas. Los

materiales compuestos no deben de disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, ya que los materiales deben de identificarse por medios físicos, ya que por su caracterización se consideran homogéneos. Sus propiedades mecánicas dependen principalmente del método de manufactura y la orientación del material de refuerzo, ya que las propiedades suelen cambiar o ser iguales en todo su volumen. Sus principales propiedades mecánicas y características de los materiales compuestos son:

- **Alta resistencia** en relación a su peso.
- **Baja densidad**, proporcionando buena resistencia por unidad de peso.
- **Flexibilidad de formado**, lo cual facilita los procesos de manufactura antes del curado de la matriz.
- **Alta resistencia dieléctrica**, ya que los materiales compuestos son aislantes eléctricos.
- Capacidad de ensamble, consolidando y reducción partes y uniones.
- **Resistencia a la corrosión**, esta propiedad se determina principalmente por la matriz empleada.
- **Resistencia a la fatiga**, la cual en los materiales compuestos es muy buena, ya que es un material amorfo en donde no contienen estructuras atómicas ordenadas.
- **Reducción en costos de mantenimiento**, esto se debe a la buena resistencia a la fatiga y al presentar muy buena resistencia a la corrosión.

A continuación se describen los materiales que componen los materiales compuestos reforzados por fibras, los cuales son los composites más importantes desde el punto de vista técnico, ya que estos materiales tienen una elevada resistencia a la fatiga, rigidez, tensión, a bajas y altas temperaturas, donde se consigue una mejor relación resistencia-peso. ^[32] Para lograr todo lo mencionando es necesario aplicar refuerzos de fibra y matrices poliméricas.

2.2.1 Refuerzos en Materiales Compuestos

Una de las aplicaciones más importantes de los materiales compuestos por fibras es la reducción de peso, sobre todo en la industria de transporté e industria aeroespacial. La mayoría de los componentes en estos sectores industriales son de peso ligero ya que tanto las fibras y polímeros utilizan matrices de baja densidad. Las fibras tienen altos niveles de relación fuerza/peso y rigidez/peso que otros materiales.

Sin embargo, las fibras no pueden ser utilizadas sin una matriz de aglutinante, ya que solas no pueden sostener cargas transversales o cargas a compresión. La matriz aparte de

mantener las fibras juntas, también protege las fibras de ataques del medio ambiente, tales como la corrosión.

Dado que las fibras no pueden ser utilizadas solas, la fuerza y la rigidez de los polímeros puede ser despreciable cuando se compara con las fibras, la propiedad mecánica del compuesto es más baja que las propiedades de las fibras. La reducción de una fibra para las propiedades de un material compuesto es proporcional a la cantidad de matriz que se utiliza.

Desde que los polímeros pueden ser moldeados en formas más complejas, el compuesto puede remplazar varias partes metálicas que de otra manera tendrían que ser ensambladas para lograr la misma función.

Las fibras son utilizadas en materiales compuestos por su bajo peso, alta rigidez y fuerza. Son más fuertes por la forma en que están hechas. Esto es por la orientación molecular que tienen a lo largo de cada dirección, y por el número de defectos reducidos que se presenta en una fibra en comparación a la composición del material. El refuerzo de fibras se encuentra por lo general en una de las tres configuraciones:

- Alineada en una sola dirección
- Cortada aleatoriamente
- Trenzada en tejido laminado con una matriz.

Existe una amplia variedad de fibras que pueden ser utilizadas para la aplicación de refuerzos. Pueden ser clasificadas por sus fibras de longitud: corta, larga o continua; de acuerdo a su fuerza o rigidez: baja (LM), mediana (MM), alta (HM) y por su módulo ultra largo (UHM); o también por su composición química: orgánica o inorgánica. Las fibras inorgánicas más comunes son utilizadas donde los materiales compuestos son vidrio, carbón, boro, cerámicos, minerales y metálicos. Mientras que las fibras orgánicas son usadas en materiales compuestos de fibras de polímeros. Al escoger un tipo de fibra implica conocer las propiedades mecánicas, ambientales, y el costo. ^[33]

2.2.1.1 Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio son incombustibles, no absorbentes, imputrescibles, de fácil colocado, peso ligero y químicamente estables. Es un material que es obtenido del vidrio por diversos procesos:

1. Estirado del vidrio por centrifugación. (lana de vidrio)

2. Estirado mecánico del vidrio fundido por hileras de diámetro variable, se enrolla sobre tambores que giran a gran velocidad. (seda de vidrio)

Las que son empleadas para aislamientos térmicos y para trabajo acústico se fabrican a partir de un vidrio de composición baja en álcali. Las que se utilizan en el campo eléctrico se fabrican a partir de vidrio que no contiene óxido de metales alcalinos. Existen fibras de vidrio con una resistencia a la ruptura de hasta 500000 lb/pul².

2.2.1.2 Fibras de carbono

Por sus siglas en inglés CFRP (carbon fiber reinforced plastics), son fibras que están dotadas de propiedades y características especiales que las hacen bastante más caras que las fibras de vidrio ya que están fabricadas para ser aplicadas en ámbitos relacionados a la automoción, aeronáutica, aviación aeroespacial, etc.

Se producen a partir de los elementos como el poliacrilomitrilo (PAN). La elaboración de las fibras de carbono tiene lugar en tres fases:

1. Las fibras (PAN) se estiran y se distribuyen para su establecimiento paralelo y para mantenerse en tensión.
2. El procedimiento de carbonización se lleva a cabo por la descomposición del oxígeno, hidrógeno y nitrógeno por acción calorífica en ambientes inertes con temperaturas de 1000 a los 1500°C. El resultado es que se fortalece la resistencia a la tracción de este material debido a que durante el tratamiento de carbonización se constituye en el interior de cada fibra unos filamentos o bandas de esqueletos estratificados como el grafito.
3. Se aumenta el punto de ubicación de los cristales modelos grafito dentro de cada fibra. Estas fibras de grafito llegan a contener hasta un 99% de carbono.

Las fibras de carbono poseen elevadas propiedades mecánicas como la óptima resistencia a la tracción, y buena resistencia a la compresión, elevado módulo de elasticidad, baja densidad, baja resistencia al impacto, elevada resistencia a altas temperaturas, coeficiente de dilatación térmica prácticamente nulo, elevada resistencia a las bases, impermeabilidad al agua, elevada resistencia a la corrosión, buena conductividad eléctrica y térmica, sensibilidad a la abrasión, bajo alargamiento a la rotura, resistencia a la fatiga.

2.2.1.3 Fibras orgánicas

La fibra orgánica tiene el nombre comercial de fibras de Kevlar, las cuales se comercializan en diversos grados de resistencias. Sus características más generales son su baja

densidad, su elevada resistencia a la tracción, a la fatiga y a los agentes químicos. Como características negativas se encuentra su dificultad para ser impregnada con la resina y su sensibilidad a las radiaciones ultravioletas.^[33]

2.2.2 Comparación de algunas propiedades mecánicas de refuerzos en fibras más utilizados.

Las fibras de carbono proporcionan la mejor combinación de alta resistencia, alta rigidez y baja densidad, pero tienen alargamientos bajos. La fibra de Kevlar 49 posee una combinación de alta resistencia a la tensión, alto módulo (no tan elevado como la fibra de carbono), baja densidad y alto alargamiento (resistencia al impacto). Las fibras de vidrio poseen tensión de rotura y módulos más bajos mientras su densidad es más alta.

La tabla 2.1 muestra en forma comparativa algunas de las propiedades más comunes de tres fibras diferentes.

Tabla 2.1. Propiedades comparativas de algunas fibras de refuerzo de plásticos.^[34]

Propiedad	Carbono	Kevlar	Vidrio
Tensión de Rotura (Mpa)	2410	3100	3617
Módulo 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

2.2.3 Matrices

Una matriz tiene como función principal definir la forma geométrica del material compuesto y transmitir los esfuerzos de una fibra a otra. A nivel industrial principalmente se emplean matrices poliméricas, de los dos tipos de polímeros: termoplásticos y termoestables. De forma general las resinas termoestables permiten obtener una estructura con forma fija

permanente, no se pueden reciclar, no se funden y cuando son sometidas a altas temperaturas se descomponen y degradan.

2.2.3.1 Resina poliéster

Las resinas de poliéster forman el grupo más importante de las resinas termoestables utilizadas en la fabricación de materiales compuestos; en concreto se encuentran presentes en el 90% de los laminados comerciales ^[3]. La clasificación de tipo poliéster de acuerdo con su constituyente base, así como sus principales funciones en las cuales están las resinas tipo ortofálicas que su aplicación es para barcos, placas onduladas y planas, resinas isoftálicas y tereftálicas para la aplicación de depósitos o ingeniería química, resinas bisfenólicas para la aplicación de productos anticorrosivos, entre otras. ^[3]

2.2.3.2 Resina epoxi

La resina epoxi es una resina de tipo termoestable. Son resinas muy utilizadas por su versatilidad, altas propiedades mecánicas y alta resistencia a la corrosión. Las resinas epoxi se comprimen mucho menos que otros materiales (1.2-4% de su volumen). Lo cual explica sus excelentes características de unión cuando son usadas como adhesivos. Las principales características de este tipo de resinas son:

- Alta resistencia mecánica, superior a la de la resina poliéster
- Mayores temperaturas de trabajo que las de la resina poliéster.
- Buena adherencia de la resina a la fibra de refuerzo.
- Bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Estabilidad química.
- Permite obtener productos de alta calidad y una buena tolerancia dimensional.

Dentro de los principales campos donde es utilizada la aplicación de resinas epoxis se encuentran en el uso como adhesivos para estructura de aviones y laminado de resinas para fuselaje y aplicación de misiles y para la fabricación de herramientas. ^[32]

2.2.3.3 Resina vinilèster

La resina de vinilèster es utilizada en la fabricación de materiales compuestos, se encuentra en el grupo de los materiales orgánicos del tipo termoestable, los cuales se caracterizan por presentar una red tridimensional completa formada por cadenas cruzadas.

Actualmente es muy utilizada a pesar de sus elevados costos, debido a las propiedades que la caracterizan:

- Buenas propiedades mecánicas, en especial alta resistencia a la fatiga.

- Excelente fluidez, que facilita su impregnabilidad y moldeo.
- Buena adhesión de la resina a la fibra de refuerzo.
- Resistencia a la corrosión, incluso en agua caliente,
- Buena resistencia al fuego.

2.2.4 Comparación de propiedades de Matrices termoestables.

Las propiedades mecánicas que caracterizan las resinas epoxi y poliéster se muestran en la siguiente tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades de las resinas poliéster y epoxi.^[34]

Propiedades	Poliéster	Epoxi
Tensión de rotura (Mpa)	40 - 90	55 - 130
Módulo de elasticidad a tracción (Gpa)	2.0 - 4.4	2.8 - 4.2
Limite elástico a flexión	60 - 160	125
Densidad (g/cm ²)	1.1 - 1.46	1.2 - 1.3

2.3 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES DE ACUERDO A SUS CARACTERÍSTICAS

Los materiales compuestos se pueden clasificar en cinco clases, respecto a sus características principales: homogéneos, heterogéneos, anisotrópicos, Ortotrópicos e isotrópicos.

2.3.1. Materiales Homogéneos

En estos materiales las propiedades son constantes en cualquier punto de una dirección del cuerpo, las propiedades del material no cambian en función de la posición en la que se encuentra el cuerpo.^[35] Su principal característica es que está formando en una sola fase con una estructura y composición uniforme, basta utilizar la visualización del material para clasificarlo con un material homogéneo.

2.3.2 Materiales Heterogéneos

Los materiales heterogéneos tienen propiedades tanto mecánicas como químicas, las cuales varían de un punto a otro. En estos materiales se pueden apreciar las distintas partes que componen el material. ^[32]

2.3.3 Materiales Anisotrópicos

En un cuerpo anisotrópico las propiedades del material van a ser diferentes en todas las direcciones en cualquier punto, es decir, no hay planos de simetría de las propiedades del material en cualquier punto dentro del cuerpo. Las propiedades del material son función de la dirección en un punto determinado. El comportamiento de un material anisótropo puede ser diferente en cada una de las tres direcciones de coordenadas locales. Además, el comportamiento de cizallamiento puede ser completamente junto con el comportamiento de extensión y puede verse afectada por el cambio de temperatura. ^[36]

Los materiales isotrópicos como el aluminio tienen las mismas propiedades en cada una de sus direcciones. Los materiales anisotrópicos tienen propiedades mecánicas y químicas las cuales pueden variar dependiendo de la orientación. Estos materiales pueden ser homogéneos pero sus propiedades pueden cambiar dependiendo la orientación que tenga a lo largo.

La rigidez de un material isotrópico es descrita por dos propiedades, por ejemplo, el módulo de elasticidad E y la relación de Poisson ν . En cambio, para poder describir los materiales anisotrópicos se requieren conocer más de 21 propiedades. ^[34]

2.3.4 Materiales Ortotrópicos

Los materiales ortotrópico tienen tres planos de simetría, que coinciden con las coordenadas de un plano. Para un material compuesto, una fibra de refuerzo unidireccional se debe de considerar ortotrópica. Un plano de simetría es perpendicular a la dirección de la fibra, y los otros dos pueden ser un par de planos paralelos en dirección a la fibra y ortogonal entre ellos. Solo se necesitan nueve constantes para describir materiales ortotópicos. ^[32]

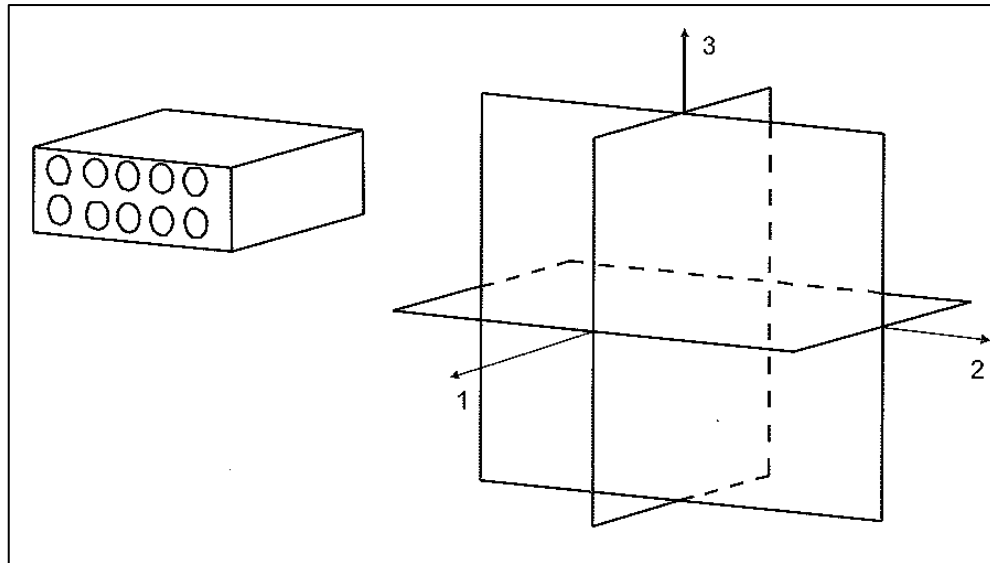


Figura 2.2: Tres planos de simetría de un material ortotrópico. ^[3]

2.3.5 Materiales Isotrópicos

Los materiales más comunes en la industria son los materiales isotrópicos, como el aluminio, acero, cobre, etc. Los materiales isotrópicos tienen un infinito número de planos de simetría, lo cual significa que sus propiedades son independientes de la orientación en que se encuentran. Solo se necesitan dos constantes para describir el comportamiento elástico de un material isotrópico. El módulo de Young E y la relación de Poisson ν . ^[32]

En los materiales isotrópicos las propiedades son las mismas en cualquier dirección en un punto dado, un cuerpo isotrópico tendrá la misma propiedad del material en cualquier plano que pasa por un punto, todos los planos que pasan por un punto en un material isotrópico son planos de simetría de las propiedades del material. ^[32]

2.4 TIPOS DE LAMINADOS

Los laminados se forman a partir del apilamiento de láminas, cada una de las cuales, es una capa de resina de pequeño espesor reforzada con fibras. Existen láminas de cinta o de tejido; las principales características de las láminas de cinta es que todas las fibras se encuentran orientadas en una única dirección y que presentan una isotropía transversal. En otras palabras: cada lámina trabaja conjuntamente con las otras.

2.4.1 Laminado simétrico

Laminado formado por láminas del mismo material, espesor y orientación, las cuales son a dispuestas simétricamente respecto al plano medio. Este plano separa en dos mitades del mismo espesor, el laminado.

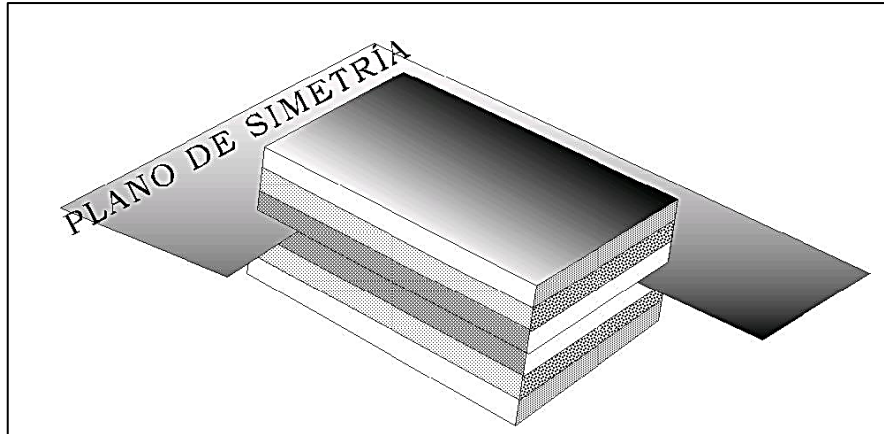


Figura 2.3: Plano medio en un laminado simétrico. [3]

Para definir el laminado simétrico deben tomar los siguientes criterios:

- Se definirán las láminas desde el exterior hacia el interior del laminado.
- Se indicará con un número el ángulo que forman las fibras con la dirección de referencia y, mediante un subíndice, el número de láminas seguidas que poseen esta orientación.
- Cuando se defina la secuencia de apilamiento de todas las láminas del laminado se empleará el subíndice T para indicar que el laminado ha sido definido en su *totalidad*.
- Se expresará la secuencia de apilado de uno de los lados y se utilizara el subíndice S para indica que el laminado es *simétrico*.

Por ejemplo, un laminado simétrico compuesto por 4 láminas a 90° , 2 a 0° , 2 a -45° y 1 a $+45^\circ$ puede nombrarse de las siguientes maneras alternativas:

- $[90_3, 0_2, -45_2, +45, +45, -45_2, 0_2, 90_3]_T$
- $[90_3, 0_2, -45_2, +45_2, -45_2, 0_2, 90_3]_T$
- $[90_3, 0_2, -45_2, +45]_S$

Si el laminado tuviera una lámina justo en el plano de simetría que presentara por ejemplo una orientación de sus fibras de 90° , su nomenclatura sería:

- $[90_3, 0_2, -45_2, +45, \overline{90^\circ}, +45, -45_2, 0_2, 90_3]_T$
- $[90_3, 0_2, -45_2, +45, \overline{90^\circ}]_S$

2.4.2 Laminado Altimétrico

Son laminados en donde las lamias que ocupan posiciones simétricas tienen orientaciones del mismo ángulo, pero con signo distinto, son del mismo material y espesor.

2.4.3 Laminado Balanceado

El laminado balanceado es aquel en donde se tiene pares de láminas simétricas, orientadas en direcciones positivas y negativas respecto a un eje. Quiere decir que por cada lamina que este a $+\theta$, hay otra $-\theta$, y que por cada lamina que este en una orientación de 0° hay otra de 90° .

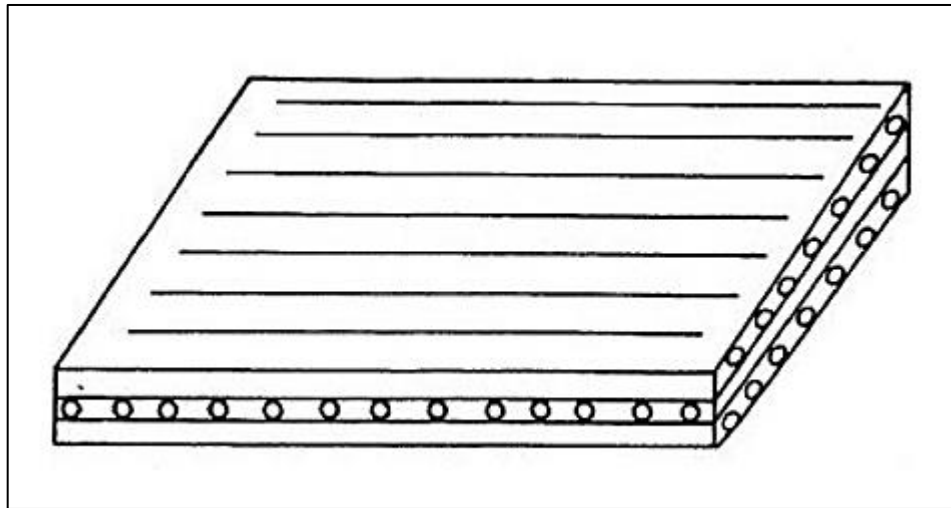


Figura 2.4: Laminado ortótropo ^[34]

2.4.4 Laminado Cuasi-Isótropo

Están fabricados a partir del apilamiento de láminas de cinta, las cuales se encuentran orientadas en diferentes direcciones (0° , 90° , y $\pm 45^\circ$). Sus propiedades son aproximadamente las mismas en todas las direcciones, debido a las diferentes orientaciones de cada lámina.

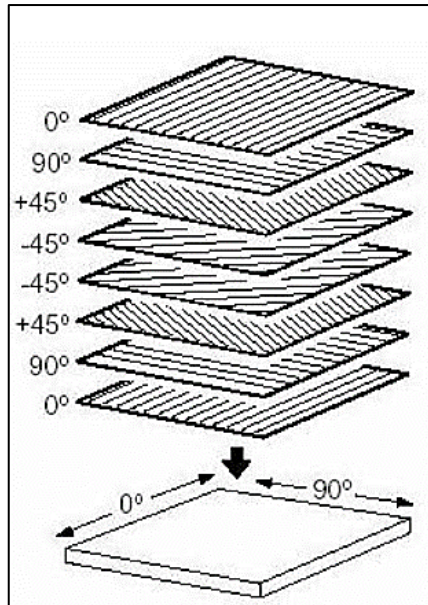


Figura 2.5: Configuración de laminado cuasi-isótropo $[0^\circ, 90^\circ, y \pm 45^\circ]_s$ ^[3]

2.4.5 Laminado Ortotrópicos

Laminados que se fabrican a partir del apilamiento de láminas de cinta en dos direcciones ortogonales (láminas cruzadas o giradas). Las láminas que componen el laminado son de tejidos bidireccionales. Su configuración de laminado es $[0^\circ/90^\circ]$.

2.5 PROCESOS DE MANUFACTURA DE MATERIALES COMPUESTOS.

Los procesos de manufactura de materiales compuestos involucran el empleo de altas temperaturas y presiones para lograr la correcta composición de los materiales. Para lograr la correcta fabricación de un laminado de material compuesto es necesario que la matriz y el refuerzo se encuentren juntos, para así lograr que la matriz impregne correctamente todas las fibras para obtener un buen producto.

2.5.1 Método de contacto manual (Hand lay-up/Wet lay-up)

Es el método más utilizado para piezas que requieren baja responsabilidad. Primeramente, se colocan capas de fibra con las orientaciones deseadas, posteriormente se agrega capas de resina con ayuda de un rodillo, hasta lograr junto con las fibras el espesor deseado que requiera el diseño. El método cura sin calor ni presión, el curado se logra mediante el catalizador que es agregado a la resina. Este método de fabricación se utiliza en

piezas de baja eficiencia, tiene un bajo costo y un alto índice de emisiones tóxicas por resinas de estireno y poliéster. [38]

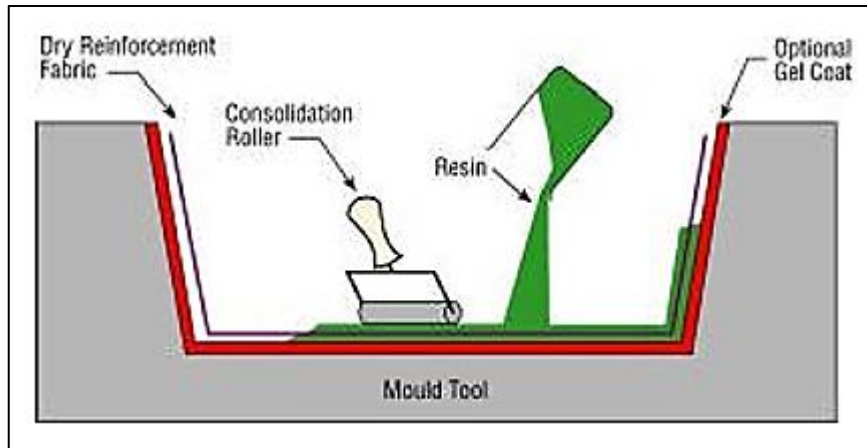


Figura 2.6: Proceso de Manufactura Wet Lay-up [39]

Las piezas fabricadas bajo este proceso de manufactura pueden presentar: arrugas en la superficie, burbujas de aire atrapadas, poros y picaduras, cuarteado y grietas, mala adherencia al molde, áreas pegajosas y afloramiento de fibras.

2.5.2 Bobinado (Filament winding)

Este método de manufactura se utiliza principalmente para la aplicación de tanques y tuberías para productos químicos, así como para depósitos de combustibles, recipientes a presión y cubiertas de motores de cohetes. Es un proceso de fabricación en el que se enrollan refuerzos continuos a grandes velocidades y de forma precisa sobre un mandril que rota en torno a su eje de giro. Las velocidades de trabajo se encuentran entre los 90 - 100 m/min para fibras de vidrio y entre los 15 - 30 m/min para fibras de carbono y aramida. Mediante este proceso se pueden alcanzar volúmenes de fibra de hasta un 75%, siendo posible controlar el contenido de resina.

Este proceso se utiliza para producir cilindros huecos de alta resistencia. La fibra es proporcionada a través de un baño de resina y después es bobinada sobre un cilindro apropiado. Cuando han sido aplicadas suficientes capas, el cilindro (mandril) se cura en un horno. Por último, la pieza moldeada es separada del mandril. [39]

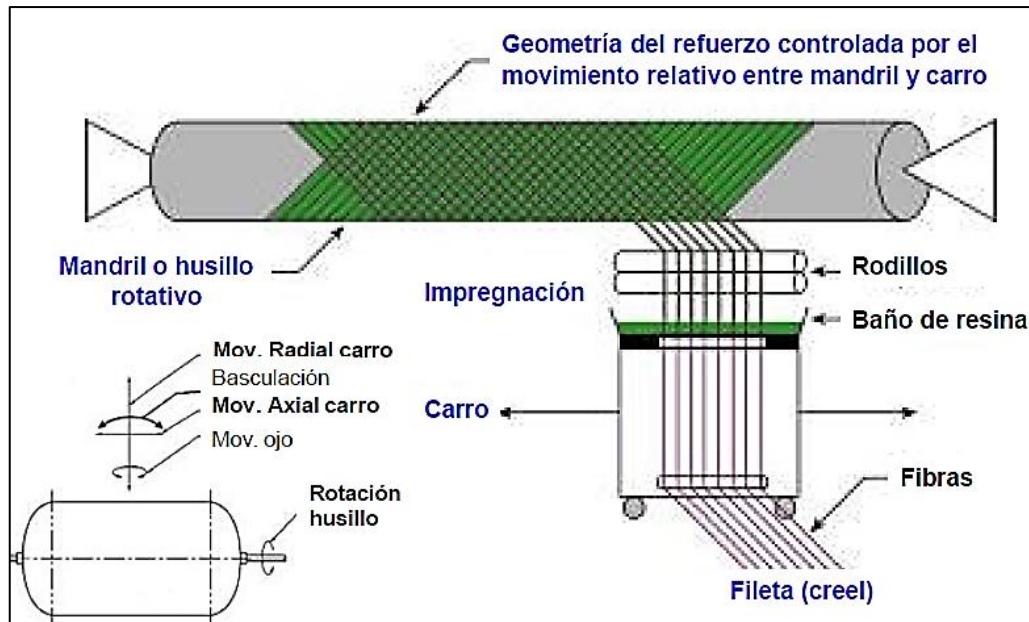


Figura 2.7: Impregnación por bobinado. [39]

Las principales ventajas de este método de manufactura es que el proceso de automatizable, rápido, el contenido de resina es controlable y genera buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, tiene limitaciones en formas convexas, problemas para controlar algunas geometrías requeridas, el costo del mandril es elevado, riesgos de elaboración por maquinaria pesada y generalmente se necesitan resinas de baja viscosidad. [39]

2.5.3 Autoclave

Este proceso se lleva a cabo en un autoclave de materiales compuestos y es utilizado para reforzar y curar componentes utilizados en materiales compuestos poliméricos, mediante el uso de temperatura y presión. Las variables de las que depende principalmente este procesado son la temperatura y la presión aplicadas, y vienen definidas por el tipo de material a procesar como en materiales termoestables y termoplásticos.



Figura 2.8: Autoclave para astilleros navales para materiales compuestos. [40]

Las características principales de la autoclave son que el recipiente es a presión calefaccionado, ya sea de gas, eléctrico, vapor, etc., necesita un sistema de convección reforzada para alcanzar altas temperaturas, cuenta con un sistema de control del proceso, es versátil, tiene la capacidad de curar una pieza de gran tamaño o múltiples piezas pequeñas, tiene alta influencia del diseño del herramental y generalmente es fabricado a la medida.

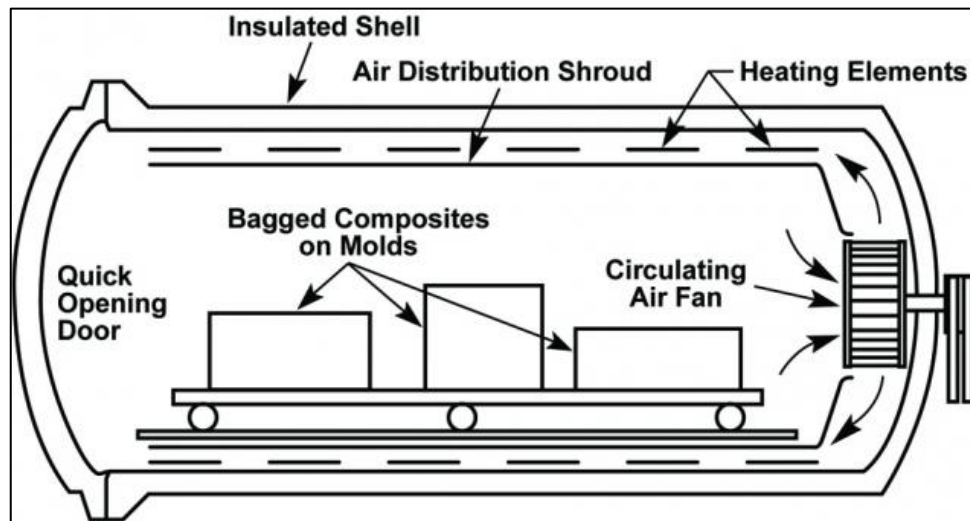


Figura 2.9: Esquema de funcionamiento de autoclave. [41]

2.5.4 Vacuum bag Wet lay-up

Este método utiliza el vacío para remover aire de las fibras y resina de la pieza a manufacturar, mantiene las láminas de fibra en su lugar, ayudando así que la orientación quede fija, remueve el exceso de resina en el laminado, provee compactación en la pieza para el curado. Uno de las contradicciones de utilizar este método es que tiene un alto desperdicio de los materiales auxiliares que se utilizan: Nylon de bola de vacío, cinta de sellado, beather/bleerder, film perforado, desmoldante y el peel-ply. [38]

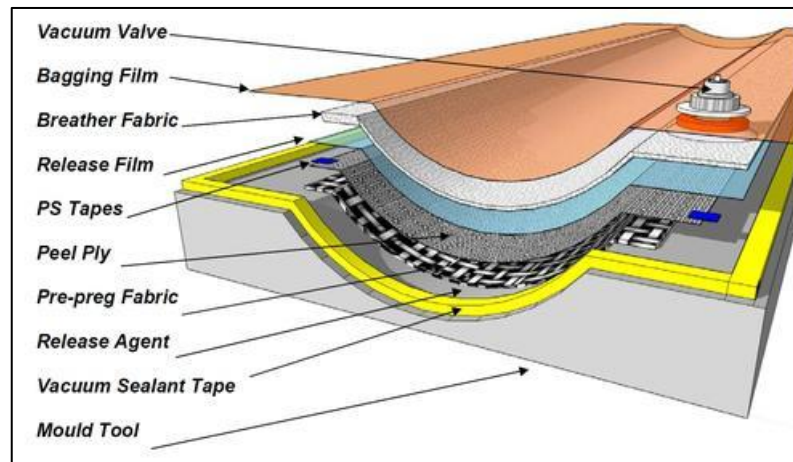


Figura 2.10: Materiales auxiliares para el proceso de wet lay-up al vacío. [41]

2.5.5 Pultrusión

Se trata de un proceso automático muy versátil mediante el que se obtienen perfiles de sección constante. Se utiliza una fibra embebida en una resina termoestable, la cual reacciona cuando se aplica calor. Se tira del material para evitar roturas y desalineamiento de fibras. Mediante este proceso se puede producir cualquier sección compleja siempre que su espesor sea constante. Además, debido a la precisión de la superficie del molde se obtienen acabados de alta calidad.

Esto proceso permite distribuir el refuerzo de fibra adecuadamente en toda la sección del perfil, adaptándola a así a las características requeridas de cada perfil.

La masa formada por la fibra impregnada de resina, entra en el molde, debidamente preformada, precalentada y estirada, ejerciéndose una gran presión a la entrada del molde

debido a la alta densidad del componente en fibras, los cuales, al estar impregnados en resina, eliminan completamente los vacíos. [42]

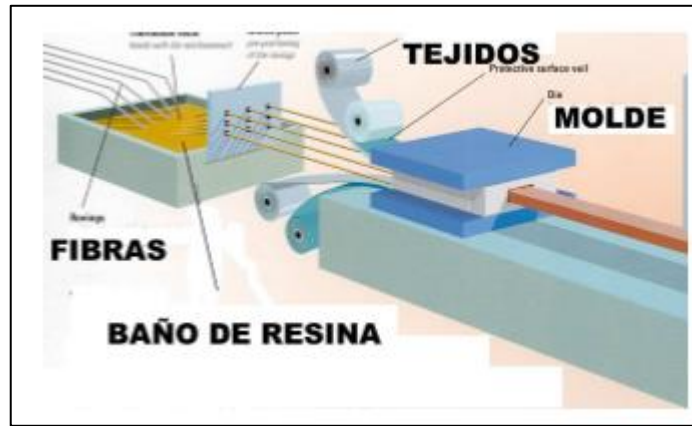


Figura 2.11: Proceso de pultrusión.

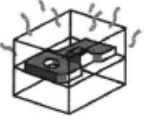
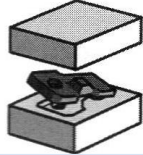
2.5.6 RTM (Resin Transfer Moulding)

La característica principal de este proceso de manufactura empleado en materiales compuestos, es que se coloca la preforma en un molde rígido cerrado y se inyecta resina baja presión (alrededor de 100 psi). [38]

Puede resumirse en cinco etapas, tal como se muestra en la tabla 2.4

Tabla 2.3. Procedimientos para el proceso de manufactura RTM.

Manufactura RTM	
<p>Preform</p>	Se coloca el tejido de fibras secas en el molde y éste es cerrado.
<p>Tool</p>	Se sella la entrada de resina y la salida de aire.
<p>Injection</p>	Se inyecta la resina en el molde mediante una bomba.

 <p>Curing</p>	<p>Se aplica calor (curado)</p>
 <p>Demolding</p>	<p>Tras un período de enfriamiento se abre el molde y se retira la pieza</p>

Las ventajas son que la pieza final posee una excelente terminación en todas sus caras gracias al molde, no hay desperdicio de material auxiliar para el proceso, es un proceso muy complejo, pero que a su vez como desventaja los moldes utilizados son muy costosos.

2.6 MATERIALES COMPUESTOS EN LA INDUSTRIA ORTOPEDICA

Los materiales compuestos utilizados en la fabricación de prótesis de miembro inferior juegan una gran importancia en el diseño y manufactura, ya que deben de ser consideradas las fuerzas a las cuales estará sometida la estructura ortopédica. Las fuerzas aplicadas durante el ciclo del caminado que se deben de tomar en cuenta son compresión, la cual reside en la parte posterior de la prótesis y la fuerza opuesta que es tensión. Existen otras fuerzas involucradas en la aplicación de prótesis ortopédicas, tales como torque, esfuerzo cortante e impacto; por lo tanto, deben de ser consideradas en el diseño y fabricación de aparatos ortopédicos. ^[47]

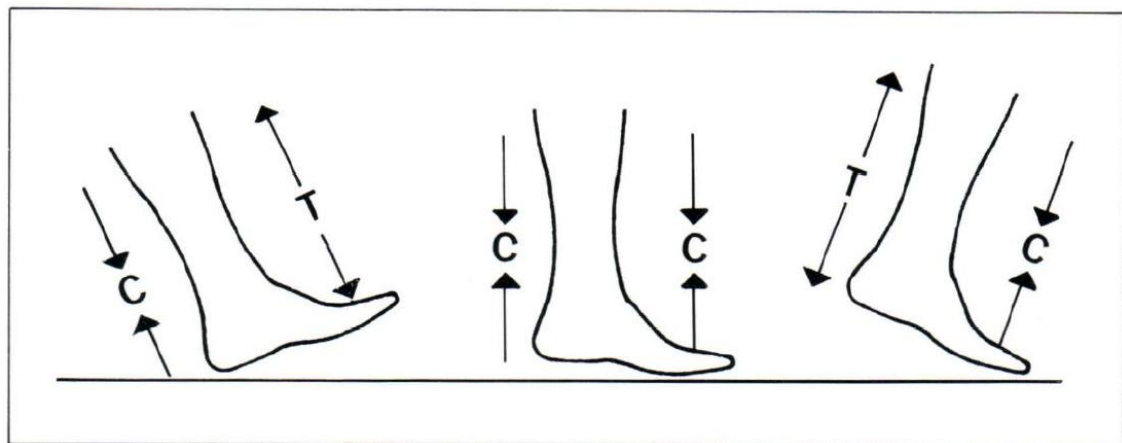


Figura 2.12: Cargas de compresión y tensión sometidas a prótesis de miembro inferior. ^[43]

Una consideración muy importante que se debe de tomar en cuenta cuando se trabaja con materiales compuestos, es enfocarse principalmente en el funcionamiento de las fibras, ya que todas las fuerzas y características del material se producen a lo largo de la longitud de la fibra que es utilizada. Las fibras utilizadas para la industria ortopédica se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.4. Esfuerzos de tensión y compresión de fibras utilizadas en la industria ortopédica. ^[43]

Resultados de tensión y compresión de pruebas estáticas en fibras		
Esfuerzos	Tensión	Compresión
Fibra de Vidrio	68 MPa	34 MPa
Kevlar	103 MPa	20.6 MPa
Fibra de Carbono	91 MPa	73 MPa

Para alcanzar el nivel alto de resistencia a la fractura en una estructura de material compuesto, el ángulo de las fibras en relación a esfuerzo aplicado debe de ser posicionado perpendicularmente con respecto a la carga aplicada. Las fibras bidireccionales o unidireccionales son excelentes para la aplicación en la fabricación de prótesis. Para obtener fuerzas uniformes con la misma resistencia a la fractura en todas las direcciones, es requerido fabricar materiales compuestos cuasi-isotrópicos. Considerando las propiedades de cada material, la aplicación más efectiva para producir un material cuasi-isotrópico, es mezclar ambos materiales, ya que esto provee propiedades mecánicas deseables para resistencia al torque, esfuerzo cortante, esfuerzos de compresivo, flexión, tensión e impacto en cualquier dirección del material.

Las resinas acrílicas son polímeros termoestables ligeros, con excelentes propiedades para definir la geométrica deseada haciendo los materiales ortopédicos lo más ligero posible. Para lograr la máxima resistencia y durabilidad del acrílico, la reacción química de la resina debe seguir un patrón establecido. En la tabla 2.6 se muestran propiedades de los materiales más utilizados para fabricación de prótesis.

Tabla 2.5. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en fabricación de prótesis.

Material	Esfuerzo de Tensión máximo [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Porcentaje de Deformación [%]
Fibra de Carbón	207-275	260-380	1.6-2
Fibra de Vidrio	170	68	5-5.5
Nylon	55-83	1.2-2.4	>5
Polietileno	7-41	0.13-1.3	>5
Polipropileno	28-41	1.3	>5

Esta investigación está enfocada en materiales de fibra de carbono y resina epóxica y resina poliéster, por lo cual más adelante se realiza el análisis comparativo de los materiales como la bibliografía mostrada en esta sección del capítulo 2.

2.6.1 Laminados implementados para la fabricación de prótesis de miembro inferior

A pesar que no existe una información base referente a los laminados fabricados de materiales compuesto para la aplicación de prótesis transtibiales, se han encontrado artículos donde mencionan la aplicación de fibras de carbono y resinas epóxicas, este trabajo habla acerca de un laminado de 5 capas en donde la orientación de las láminas es (0°, 15°, 30°) en donde el material manufactura mostro una gran resistencia bajo pruebas de tensión^[40], a continuación en la tabla 2.7 se muestran los valores obtenidos del laminado implementado.

Tabla 2.6. Resultados de pruebas de tensión a lamiando de fibra de carbono y resina epóxica.^[43]

Material compuesto por Fibra de carbono bidireccional y resina epóxica			
Resistencia a tensión	Módulo de elasticidad	Elongación	Espesor de capa
379 MPa	234.5 GPa	1.5%	0.25mm

Otro de los trabajos investigados aporta un esfuerzo máximo en laminados de fibra de carbono con un valor de 249 MPa, utilizando una configuración de resina epóxica de 80-20. Este laminado es utilizado para la manufactura del socket de la protestéis. Se propone incorporar láminas de 0° y 90° junto con láminas internas de orientación de ±, 45°. Para lograr un laminado ideal con propiedades cuasi-isotrópicas.^[45]

2.6.2 Prótesis transtibiales de fibra de carbono.

La habilidad de competir en deportes para las personas amputadas ha revolucionado en los últimos años gracias a introducción de fibra de carbono reforzados con polímeros, y a los materiales compuestos en el diseño de miembros artificiales. Las fibras de carbono reforzadas con polímeros son extremadamente ligeras, y aseguran una gran flexibilidad, aun en esfuerzos altos, lo cual es posible incorporar sistemas de retorno de energía dentro las prótesis de extremidades inferiores.

Al incorporar el peso en las estructuras diseñadas de los materiales compuestos, se inducen cargas de compresión y por ello se almacena energía en el aparato protésico, así mismo los resultados de fuerzas a compresión permiten que el material vuelva a su forma original, y por ello la energía aplicada regresa. La respuesta dinámica del sistema protésico depende de la altura del paciente, peso y nivel de actividad.

Para diseñar un sistema de prótesis es importante considerar un sistema natural de frecuencia, para que cualquier energía aplicada sea regresada hacia el pie. Un modelo simple del comportamiento en condiciones ideal, puede ser cuando no existe pérdida de energía en la estructura, por ello el pie de fibra de carbono es tratado como un resorte perfecto, en donde la ley de Hooke puede ser aplicada. El regreso de energía aproximado debe ser de un 95%, claro que este valor depende directamente del diseño y capacidad del modelo implementado.



Figura 2.13: Modelo en CAD para prótesis de fibra de carbono.

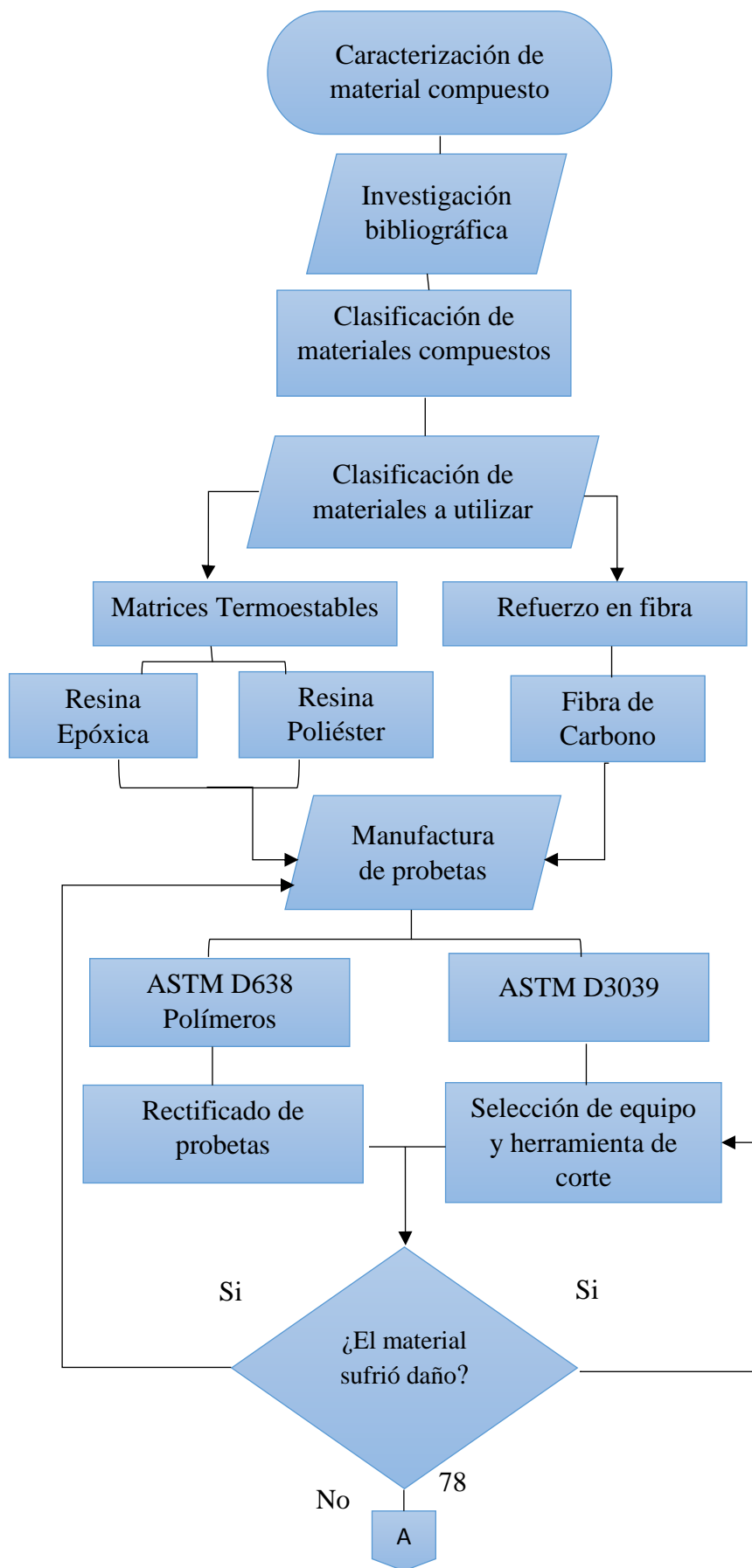
En la actualidad las protestéis utilizadas de deportes son de fibra de carbonó, en especial las que son necesarias para correr y brincar. Los aparatos recientes son capaces de ayudar al atleta a correr 100 m en 11 s; lo cual es aproximadamente 1 segundo más del récord olímpico.^[47]

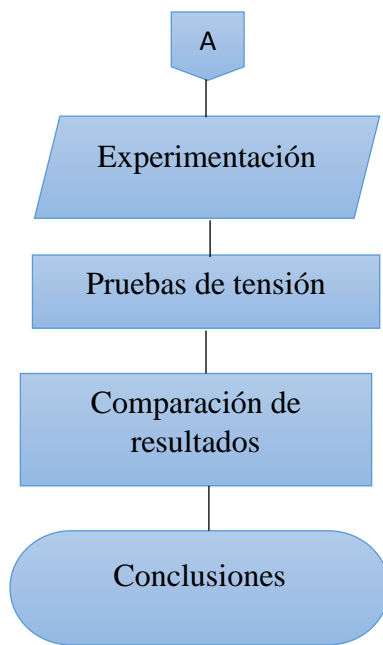
Está demostrado que la fibra de carbono como material tiene grandes influencias en el desarrollo de extremidades ortopédicas modernas.

CAPÍTULO 3

Metodología y Desarrollo experimental

3.1 DIAGRAMA DE FLUJO





3.2 MATERIALES DE TRABAJO

Los materiales utilizados para realizar el desarrollo experimental de esta investigación son fibra de carbono y resinas epóxica y poliéster. La fibra de carbono se seleccionó en base a la investigación realizada en los capítulos 1 y 2, ya que se sabe que es de las fibras más utilizadas en la aplicación de prótesis, por su peso ligero, alta rigidez y su resistencia a esfuerzos de tensión y compresión. Por otra parte, la selección de las matrices, se realizó en base a las matrices termoestables más compatibles para la fibra de carbono, ambas poseen baja densidad, por ellos los esfuerzos del material compuesto recaerán en los límites elásticos de la fibra de carbono, pero las matrices utilizadas ayudan a tener un control en el proceso de manufactura.

3.2.1 Fibra de Carbono de tejido liso 3k

El término “K” se refiere al número de minúsculas fibras (filamentos) usados en cada trenza. 1K significa 1000 filamentos, 3K 3000, y así sucesivamente. Estas trenzas son después entrelazadas biaxialmente para fabricar piezas de carbono. La diferencia entre ellas es básicamente estética.^[47]

Las fibras de carbono contienen hasta un 95% de carbono y el rendimiento de la fuerza de tracción más alta en la industria de FRP (Fiber Reinforced Plastic). Estas fibras tejidas forman la tela de grafito. Estos tejidos ofrecen relaciones de resistencia y rigidez-peso más altas que cualquier otro refuerzo comúnmente disponible. Este tejido es adecuado para su uso en las carreras, aviones, marina competencia, y aplicaciones industriales ligeras. Para maximizar las propiedades de la fibra se recomienda utilizar sólo epoxi o resina de éster de vinilo.

Propiedades generales de la fibra de carbono:

- Peso ligero
- Resistencia al fuego
- Dimensionalmente estable
- Resistencia a la fatiga

Tabla 3.1. Compatibilidad de resinas para el tipo de fibra. ^[47]

Fibra	Resina
Fibra de carbono 3k	Polyester
	Vinyl ester
	Epoxi

Tabla 3.2. Propiedades de fibra de carbono 3k. ^[48]

Propiedades de fibra 3K	
Deformación del material	3k-Multifilamento continuo
Llenado del material	3k-Multifilamento continuo
Modelo de la armadura	Plano
Peso de la fibra por unidad de área	5.4-5.9 oz/yd ² ò 0.1831-0.2 kg/m ²
Deformación de hilos/pulgada	12.5 ± 1.0
Espesor nominal	0.30 mm
Ancho de tela	1.27 ± 0.006 m
Longitud de yarda	100 yds
Resistencia a la tracción	4.20– 4.37 GPa
Módulo de tracción	227 -240 GPa
Elongación	1.4-1.95%

3.2.2. Resina epóxica^[MR]

Esta resina se utiliza para la aplicación de materiales Poliméricos reforzados con Fibras (FRP). La función de la resina es de proteger las fibras y de distribuir uniformemente la carga entre las fibras. Esta resina cuenta con un catalizador, el cual el arreglo de mezclas

recomendable es emplear el 10% de catalizador respecto al 100% de resina que se utiliza. El tiempo de curado de la mezcla es del alrededor de 24 horas a temperatura ambiente (23-25°C). Sus características principales son:

- Excelentes propiedades mecánicas y eléctricas
- Buena resistencia química
- Cura con una gran variedad de endurecedores o catalizadores
- Compatible con diversos tipos de cargas, diluyentes y aceleradores.
- Presenta buena adhesión.
- Viscosidad baja.

Tabla 3.3. Propiedades de resina epóxica. ^[49]

Propiedades de resina epoxi	
Apariencia	Líquido de viscosidad baja transparente
Densidad	1.10-1.20 g/cm ³
Gravedad específica	1.8 a 1.9 Nm ² /kg ²
Tensión	318 MPa
Elongación	1.8%
Flexión	319 MPa
Módulo de tracción de elasticidad	190 GPa
Módulo de flexión de elasticidad	186 GPa

3.2.3. Resina poliéster 33004

Es una resina poliéster no saturada, de reactividad media y baja viscosidad, el curado puede realizarse a temperatura ambiente. Esta resina cuenta con catalizador, el cual se utilizó el arreglo de mezclas del 1% respecto a 100% total. Es necesario que para realizar la mezcla

se agite mecánicamente antes de utilizarse. Su tiempo de gel tarda de 15 a 18 minutos a una temperatura de 25°C.

Entre sus aplicaciones se encuentra la fabricación de piezas reforzada con fibra de vidrio en general, fabricación de partes automotrices, puede utilizarse en proceso de moldeo manual o por aspersión.

Sus características principales son:

- Viscosidad adecuada.
- Moderada liberación de pegajosidad residual.
- Laminados con buen acabado superficial.
- Versátil.
- Buenas propiedades mecánicas.
- Buena humectación del refuerzo.
- Mayor rapidez en el rolado, fácil eliminación en aire atrapado.
- Buena lijabilidad.
- Buen acabado de las piezas.

Tabla 3.4. Propiedades de resina poliéster. ^[50]

Propiedades de resina Poliéster 33004	
Absorción de agua @23°C	0.2595 %
Resistencia a la tensión	54 MPa
Módulo de tensión	35 GPa
Elongación hasta la ruptura	1.8%
Resistencia a la Flexión	36 GPa

3.3 NORMATIVIDAD

La American Society for Testing Materials (ASTM) es uno de los mayores contribuyentes técnicos del ISO (Organización Mundial de Normalización), esta sociedad mantiene uno de los más grandes liderazgos en la definición de los materiales y métodos de prueba en casi todas las industrias. Las normas que son establecidas por ASTM regulan y establecen métodos para los tamaños, formas y pruebas de especímenes de materiales.

Las normas que se utilizan para realizar pruebas de tensión, para materiales compuestos y resinas poliméricas, ya sea por su constitución y uso/aplicación, están dadas por (ver tabla 3.4), con la norma ASTM D3039 se comparan los laminados de material compuestos con diferentes matrices termoestables, en cambio la norma ASTM D638 es utilizada para conocer las propiedades mecánicas de las resinas empleadas. Se utilizan las normas mencionadas ya que los esfuerzos de tensión se comparan con las cargas principales a lo cual las prótesis de miembro inferior son sometidas. A pesar que en las prótesis transtibiales se aplican esfuerzos combinados de tensión y compresión. Esta investigación se orienta a solo utilizar pruebas para esfuerzos de tensión para materiales compuestos y polímeros (resinas), ver tabla 3.5.

Tabla 3.5. Normas ASTM aplicadas para pruebas de tensión

Norma Aplicada	Descripción de la prueba
ASTM D3039	Propiedades de tensión para materiales compuestos de matrices poliméricas.
ASTM D638-03	Método de prueba estándar de tracción para las propiedades de plásticos.

La aplicación de pruebas que determinan las normas ASTM, establece la metodología y manufactura para utilizar parámetros en trabajos mecánicos que se realizan a los especímenes de dicho material a analizar.

Se describen a continuación las normas estandarizadas a las que se someterán los materiales de trabajo:

- Norma ASTM D3039 Propiedades de tensión para materiales compuestos de matrices poliméricas.

Este método de ensayo determina las propiedades de tensión para materiales compuestos de matriz polimérica y reforzado por fibras de alto modulo. La composición del material está limitada por refuerzo de fibras ya se continuas o discontinuas, donde el laminado es balanceado y simétrico con respecto a la dirección de la prueba. Este método de prueba es diseñado para conocer las propiedades de tensión para las especificaciones de un material, investigación y desarrollo, control de calidad, diseño estructural y análisis. Los factores que influyen en la prueba de tensión son: material, métodos de preparación de material y lay-up, secuencia de apilamiento del espécimen, preparación y condición del espécimen, entorno de prueba, velocidad de prueba, temperatura, alineación y agarre del espécimen, contenido de vacío y porcentaje de refuerzo volumétrico. ^[51]

- Norma ASTM D638-03 Método de prueba estándar de tracción para las propiedades de plásticos.

Este método de ensayo cubre la determinación de las propiedades de tracción de plásticos reforzados y no reforzados en forma de pesa de especímenes de pruebas que se prueban en condiciones definidas de tratamiento previo ya sea a temperatura, humedad, y a la velocidad de la máquina para realizar las pruebas.

Este método de prueba se puede utilizar para ensayo de materiales de cualquier espesor de hasta 14 mm [0.55 in.]. Sin embargo, para el análisis de muestras en forma de láminas delgadas, incluyendo películas de menos de 1,0 mm [0,04 in.] de espesor.

Este método de ensayo incluye la opción de determinar el coeficiente de Poisson a temperatura ambiente. ^[52]

3.4 ESPECÍMENES DE RESINA EPÓXICA Y RESINA POLIÉSTER

3.4.1 Manufactura

Para comparar los datos de las resinas termoestables manejadas y conocer cuál de las dos mencionadas anteriormente en el apartado 3.2 de este capítulo, es la más apta para la fabricación de laminados de material compuesto, se sometieron 5 pruebas de cada matriz, las cuales son estipuladas bajo el régimen de la norma ASTM D638-03.

Las medidas que se aplicaron para realizar las probetas son las del espécimen tipo I, ya que el material es un plástico semirrígido y tiene un grosor aproximado a 7mm [0.28 in.]. Tal como se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Medidas de probetas estipuladas por ASTM D638-03

Probeta Tipo I	
Anchura de sección estrecha (W)	13mm [0.50 in]
Longitud de la sección estrecha (L)	57mm [2.25 in]
Anchura total (WO)	19 mm [0.75 in]
Longitud total (LO)	165 mm [6.5 in]
Longitud calibrada (G)	50 mm [2.00 in]
Distancia entre opresores (D)	115 mm [4.5 in]
Radio (R)	76 mm [3.00 in]

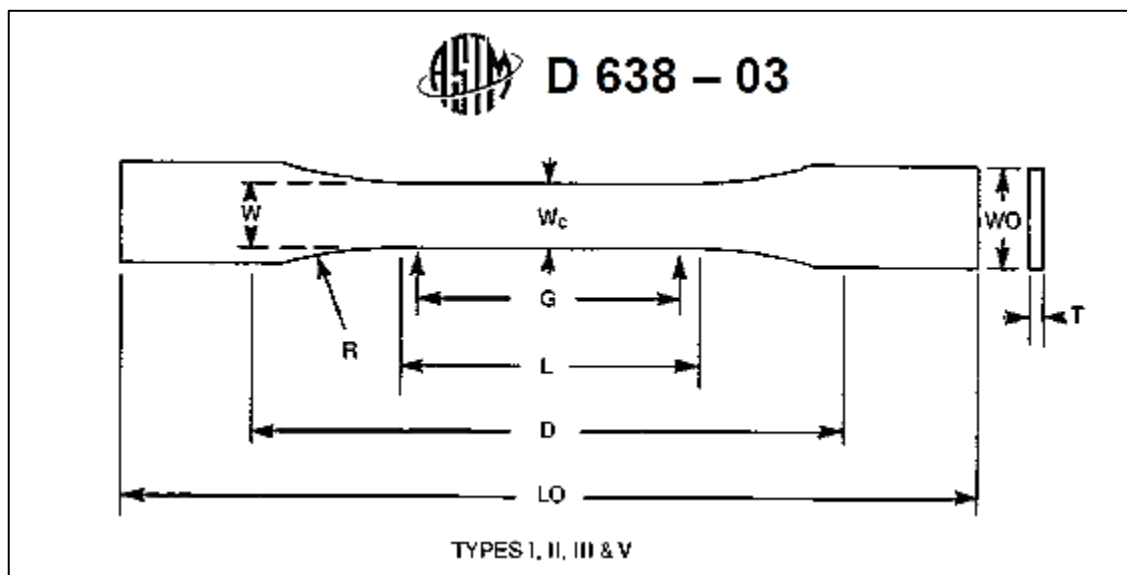


Figura 3.1: Probetas tipo I normalizadas bajo ASTM D638-03.

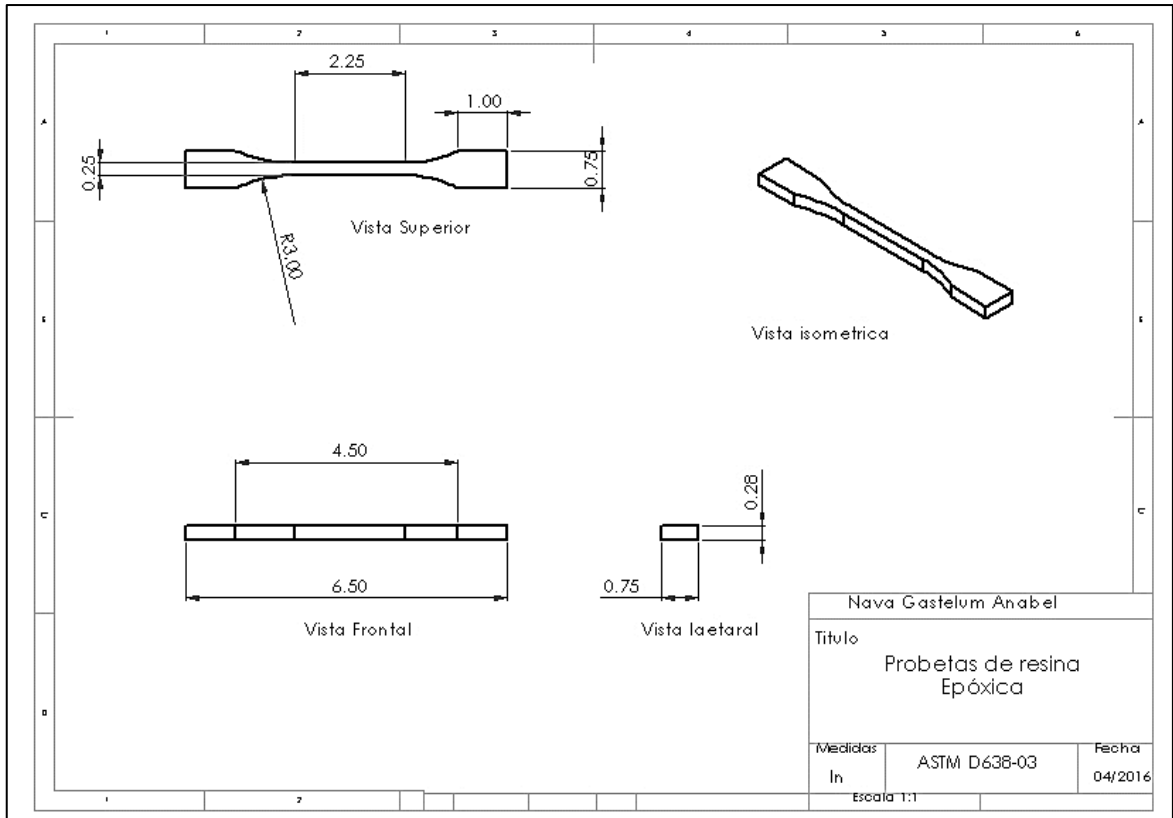


Figura 3.2: Plano de probeta tipo I establecida por ASTM D638-03

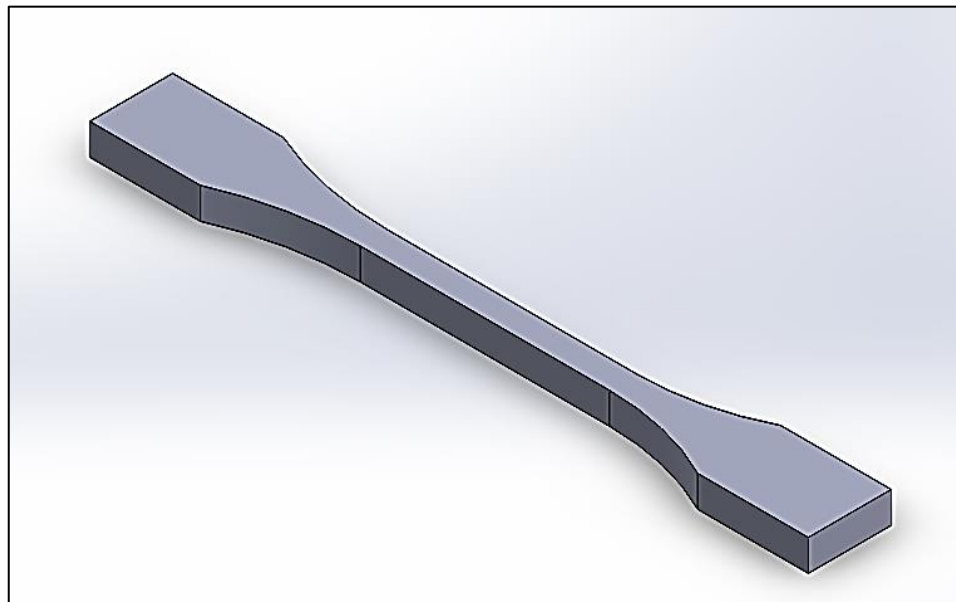


Figura 3.3: Probetas tipo I en isométrico normalizadas bajo ASTM D638-03

Para la fabricación de las probetas tipo I, primeramente, se realizó un molde positivo de aluminio con las dimensiones establecidas de la norma, el cual fue maquinado en una fresadora CNC. Para obtener el mismo molde negativo se utilizó un vaciado de silicón en el molde positivo de aluminio. Se realizaron cuatro moldes negativos de silicón, con la finalidad de obtener las mismas dimensiones en cada molde para así poder fabricar las probetas de resina epoxi.



Figura 3.4: Vaciado de silicón en molde negativo de aluminio con geometría de probetas tipo 1 ASTM D638.

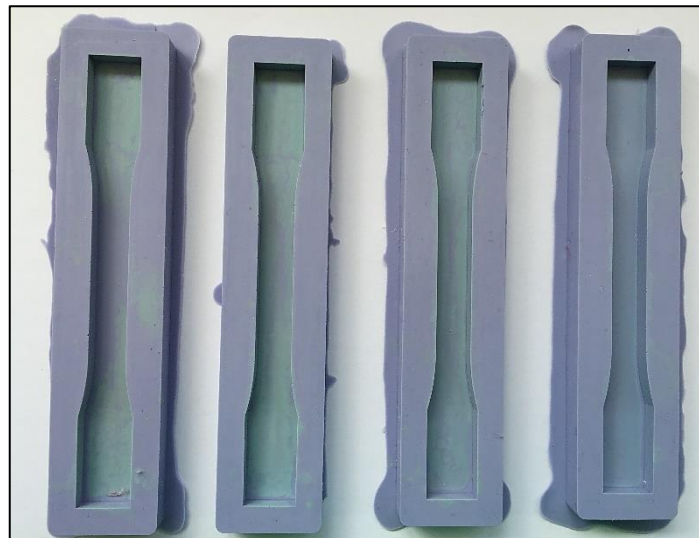


Figura 3.5: Moldes de silicón para probetas tipo I.

3.4.2 Resina Epóxica

Para la realización de 5 probetas de resina epóxica se utilizó un arreglo de mezclas con el 10% de catalizador en base al 100% de la masa de resina. (Ver tabla 3.7)

Tabla 3.7. Masa en gramos para la mezcla de resina y catalizador.

Recipiente	Resina epoxi	Catalizador
6 gr	120 gr	12 gr

Ya que la resina epóxica es un material rígido pero muy quebradizo, se tomaron medidas de cuidado en el material. Antes de verter la mezcla de resina epóxica, se aplicó un desmoldante a los moldes de silicón para facilitar el desmoldado de las probetas y así evitar daños de los especímenes al retirarlos del molde. El curado de la matriz polimérica fue al ambiente (23°C), sin someter temperatura externa.



Figura 3.6: Mezcla vertida en moldes de silicón para probetas Tipo I.

Posteriormente, una vez que las probetas cumplieron con su tiempo de curado, se procedió a rectificarlas de manera manual como se muestra en la figura 3.7, se utilizaron lijas de diferentes tamaños de grano, comenzando del más grueso al más fino y cambiando de orientación de 0° y 90°. Este proceso se llevó a cabo por el hecho que la resina epóxica al curarse en a temperatura ambiente desarrolla una contracción de sus moléculas internas

dejando así un acabado cóncavo superficial, el cual puede afectar en los ensayos de tensión por la sujeción que se lleva a cabo en el área de las mordazas.



Figura 3.7: Rectificado de especímenes de resina epóxica con lijas a diferentes grados de orientación.



Figura 3.8: Probetas Tipo I de resina epóxica.

Los especímenes se midieron y se promediaron 3 medidas de cada sección (ancho, espesor y longitud) las cuales son necesarias para las pruebas de tensión. (Ver tabla 3.8)

Tabla 3.8. Medidas promediadas de probetas Tipo I de resina epóxica.

Probeta	Ancho mm [in.]	Espesor mm [in.]	Longitud calibrada mm [in.]
1	17.12 [0.674]	7.11 [0.280]	50.00[2.00]
2	17.12 [0.674]	6.93 [0.273]	50.00[2.00]
3	17.09 [0.673]	7.29 [0.287]	50.00[2.00]
4	16.94 [0.667]	6.67 [0.262]	50.00[2.00]
5	16.91 [0.666]	6.248 [0.246]	50.00[2.00]

3.4.3 Resina Poliéster

La realización de los 5 especímenes de resina poliéster 330004, se llevó a cabo bajo las indicaciones de la ficha técnica, utilización el arreglo de mezcla que se muestra en la tabla 3.9, utilizando el 1% de catalizador respecto al 100% de resina.

Tabla 3.9. Masa utilizada para preparación de resina poliéster para probetas D638.

Recipiente	Resina epoxi	Catalizador
6 gr	110 gr	1.1 gr



Figura 3.9: Resina Poliéster vertida en molde de silicón para probetas tipo I.

El curado de las probetas se llevó a cabo a una temperatura de 18°C, con un tiempo de 72 a 96 horas.



Figura 3.10: Especímenes de Resina Poliéster antes de Rectificado.

Para lograr un buen acabado superficial, y para la sujeción correcta de los especímenes en las pruebas de tensión se llevó el mismo proceso de rectificado que se utilizó en las probetas de resina epóxica, utilizando lijas con diferente tamaño de grano y aplicando el desbaste en direcciones perpendiculares.



Figura 3.11: Proceso de rectificado de probetas de resina poliéster.

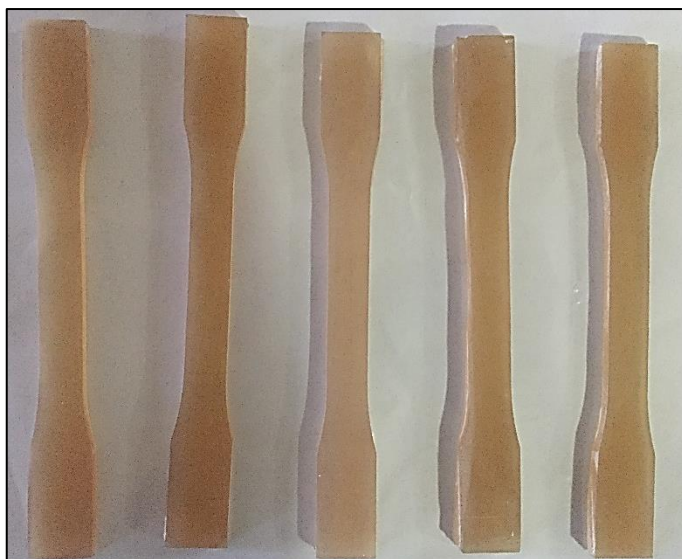


Figura 3.12: Especímenes de resina poliéster rectificados.

Posterior al proceso de rectificado con diferentes números de grano de lijas, de los especímenes se midieron y se promediaron 3 medidas de cada sección (ancho, espesor y longitud) las cuales son necesarias para las pruebas de tensión. (Ver tabla 3.10)

Tabla 3.10. Medidas promediadas de probetas Tipo I de resina poliéster.

Probeta	Ancho	Espesor	Longitud calibrada
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
1	12.75 [0.502]	5.06 [0.199]	50.00[2.00]
2	12.87 [0.506]	6.51 [0.256]	50.00[2.00]
3	12.60 [0.496]	6.13 [0.241]	50.00[2.00]
4	12.84 [0.505]	5.49 [0.216]	50.00[2.00]
5	12.81 [0.504]	5.54 [0.218]	50.00[2.00]

3.5 ESPECÍMENES DE MATERIAL COMPUESTO

3.5.1 Manufactura

Para llevar a cabo los ensayos de tensión de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica se sometieron a pruebas de probetas planas estipuladas en la norma ASTM D3039.

Tabla 3.11. Medidas de probetas estipuladas por ASTM D3039.^[51]

Orientación del laminado	Ancho mm [in.]	Longitud mm [in.]	Espesor mm [in.]
Balanceado y simétrico	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]

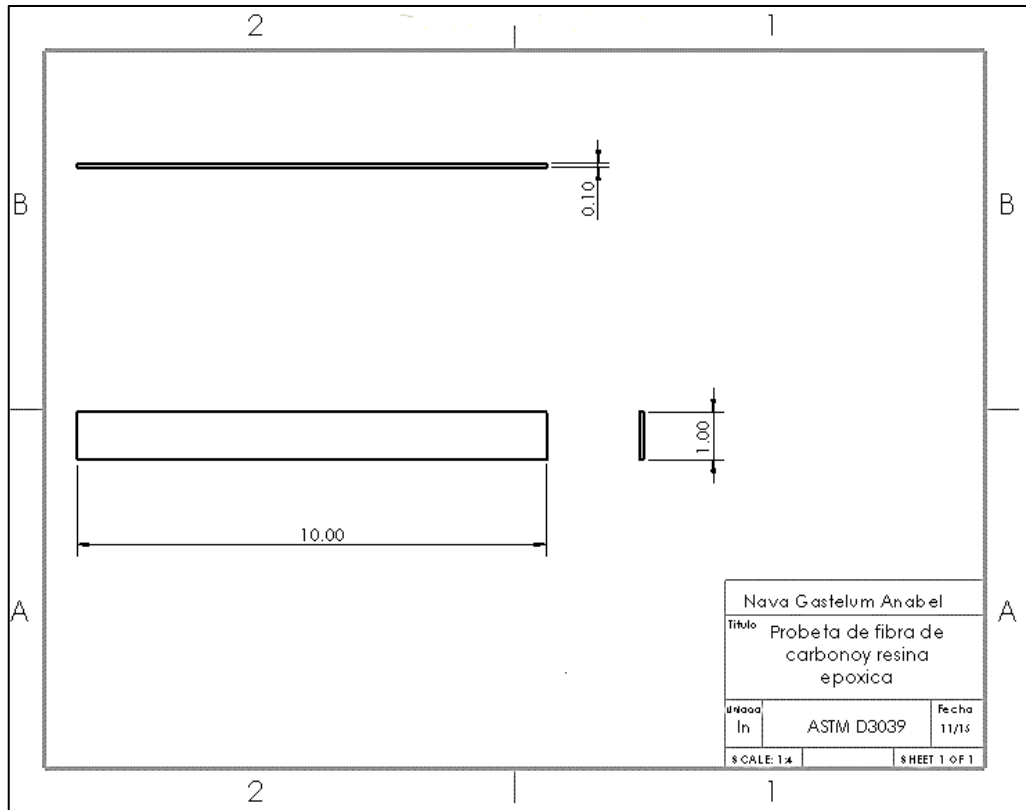


Figura 3.13: Plano de probeta establecida por ASTM D3039.

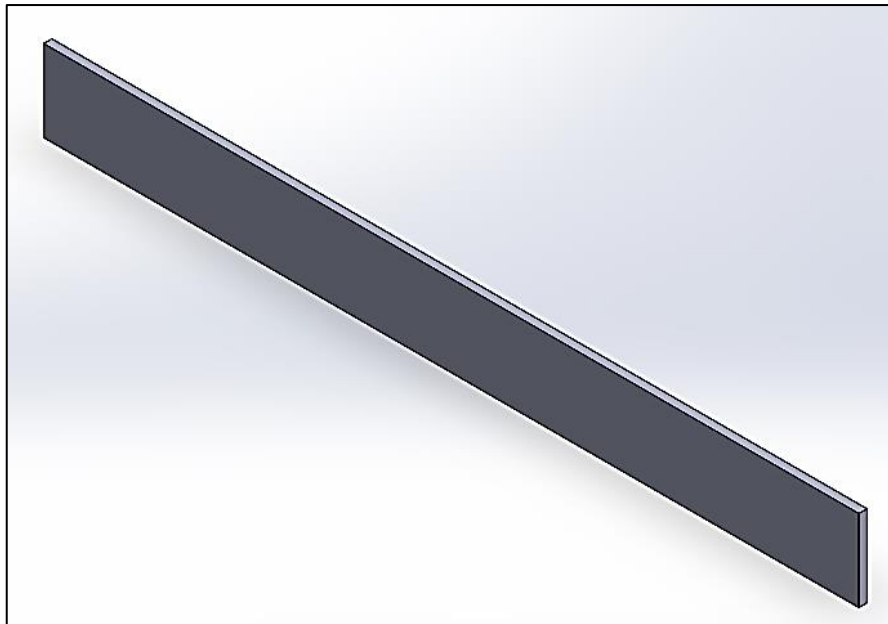


Figura 3.14: Probeta de material compuesto en isométrico.

Con el fin de realizar los análisis del material compuesto, primeramente, la fibra de carbono fue cortada con las orientaciones $[0/\pm 45]_s$, para después realizar el laminado e impregnarlo de resina mediante el método de manufactura VACCUM BAG WET LAY-UP, el cual utiliza una bomba para generar vacío y así impregnar con resina de una manera más eficiente la fibra de carbono. Los laminados manufacturados son simétrico balanceados cuasi-isotrópico de 6 capas. Los cuales fueron sometidos para pruebas de tensión con las diferentes matrices termoestables de resinas epóxicas.

El arreglo de mezclas utilizado para las matrices poliméricas de resina epóxica fue utilizando el 10% de catalizador respecto al 100% de masa utilizada, para el arreglo de resina poliéster se utilizó el 1% de catalizador respecto al 100% de masa total utilizada. Cabe mencionar que estos arreglos de mezclas se utilizaron por especificaciones de fichas técnicas de ambas matrices. (Ver tabla 3.12)

Tabla 3.12. Arreglo de mezcla de matrices poliméricas termoestables para los laminados material compuesto.

Resina	Matriz	Catalizador
Epóxica	200 gr	20 gr
Poliéster	200 gr	2 gr

3.5.2 Configuración de la fibra de carbono como tejido de refuerzo

La estructura de las fibras de carbono está compuesta por hilos que se encuentran en diferentes direcciones de la tela, principalmente los hilos que se encuentran en una dirección longitudinal son llamados *urdimbre*, los cuales se entrelazan con filamentos en dirección transversal, a estos últimos se les llama *tramas*. Esto ayuda a que el tejido sea equilibrado, y que mantenga uniformidad en las direcciones de 0° y 90° .

Ya como se ha mencionado un laminado es un conjunto de láminas apiladas unas sobre otras, y con ayuda de la matriz aplicada ayuda a que cada una de las láminas trabajen unas en conjunto de otras.

El laminado cuasi-isotrópico se caracteriza por la apropiada secuencia de apilamiento de láminas de fibras, ya que su rigidez longitudinal debe de ser la misma en todas las direcciones. Para ello se necesita un elevado número de láminas y que las orientaciones de las fibras de cada una de ellas varíen muy poco respecto a su lámina anterior en el acomodo del laminado. A pesar que a estos laminados se les denominen cuasi-isotrópicos, no se comportan como los materiales isotrópicos y homogéneos.^[49]

La configuración de laminado que se utilizó para realizar las probetas de material compuesto, tomando en cuenta el número de capas y considerando el espesor final de la probeta respecto a la norma ASTM D3039. La primera capa del laminado de colocó a 0° , las siguientes $+45^\circ$, -45° , -45° , $+45^\circ$ y finalmente la última capa a 0° , con lo cual se obtuvo un laminado uniforme de 6 capas. $[0/\pm 45]_s$ se representa como un laminado simétrico balanceado, el cual cuenta con las características de un laminado cuasi-isotrópico.

3.5.3. Fracción Volumétrica de fibra de carbono

En este apartado es necesario determinar las fracciones volumétricas que se requieren para este estudio, relacionada con los parámetros de cantidades utilizadas por ambas matrices poliméricas. La constante para ambos laminados es la fracción volumétrica de la fibra de carbono.

Se utilizaron 6 capas en cada laminado, cada lámina de fibra de carbono contiene las siguientes especificaciones (ver tabla 3.13):

Tabla 3.13. Fracción Volumétrica de una lámina de fibra de carbono.

Largo m [in.]	Ancho m [in.]	Espesor m [in.]	Volumen m ³ [lt.]
0.2794 [11]	0.1524 [6]	0.0003048 [12]	0.0000129 [0.0129]

De acuerdo a los datos obtenidos de la tabla 3.13, se procedió a calcular el volumen del tejido de la fibra de carbono, la cual se multiplico su volumen por el número de láminas utilizadas, tal como se muestra en la ecuación 3.1

V_f (volumen del tejido de fibra de carbono) = (Volumen de lámina) (Cantidad de láminas)

$$V_f = V \cdot n \quad (3.1)$$

Volumen del tejido de fibra de carbono = 0.0129 lt. x 6 láminas = 0.0774 lt.

$$V_f = 0.0774 \text{ lt}$$

Una vez obtenido el volumen de fibra de prosigue con el análisis del siguiente apartado 3.5.4 para obtener el volumen del material compuesto con ayuda de la ecuación 3.3

3.5.4 Porcentaje volumétrico de material compuesto con resina epóxica

Para obtener el volumen de la matriz epóxica fue necesario dividir la masa utilizada entre su densidad especifica (utilización de ecuación 3.2.), datos obtenidos del capítulo 3^[53]¹

$$V_{m \text{ epoxica}} = \frac{m}{\rho} \quad (3.2)$$

Volumen de resina epóxica = $\frac{220 \text{ gr}}{1.5 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 146.67 \text{ cm}^3 = 0.14764 \text{ lt.}$

$$V_{m \text{ epoxica}} = 0.14764 \text{ lt}$$

A partir de la relación:

$$V_f + V_m = V_c \quad (3.3)$$

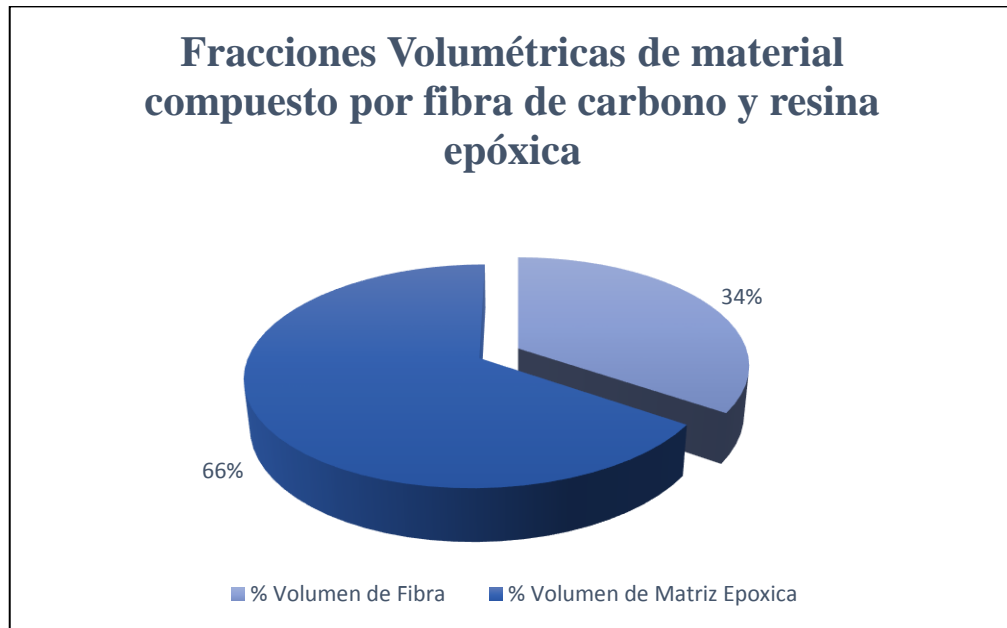
¹ Fórmulas utilizadas en referencia del trabajo “Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz epoxica reforzada con tejido mixto elaborado con fibras de carbono y kevlar y si incidencia en las propiedades mecánicas de partes externas de autos.”

Dónde:

- V_f = Volumen del tejido de fibra de carbono
- V_m = Volumen de matriz epóxica
- V_c = Volumen del material compuesto

$$V_c = 0.0774 \text{ lt} + 0.14764 \text{ lt}$$

$$V_c = 0.22504 \text{ l}$$



Grafica 3.1: Evaluación de los porcentajes de fracción volumétrica de compuesto de fibra de carbono y resina epóxica.

3.5.5 Porcentaje volumétrico de material compuesto con resina poliéster

Se utilizó el mismo análisis anterior para obtener el volumen del matriz poliéster, en donde también fue necesario dividir la masa utilizada entre su densidad específica.

$$V_{m \text{ Poliester}} = \frac{m}{\rho} \quad (3.4)$$

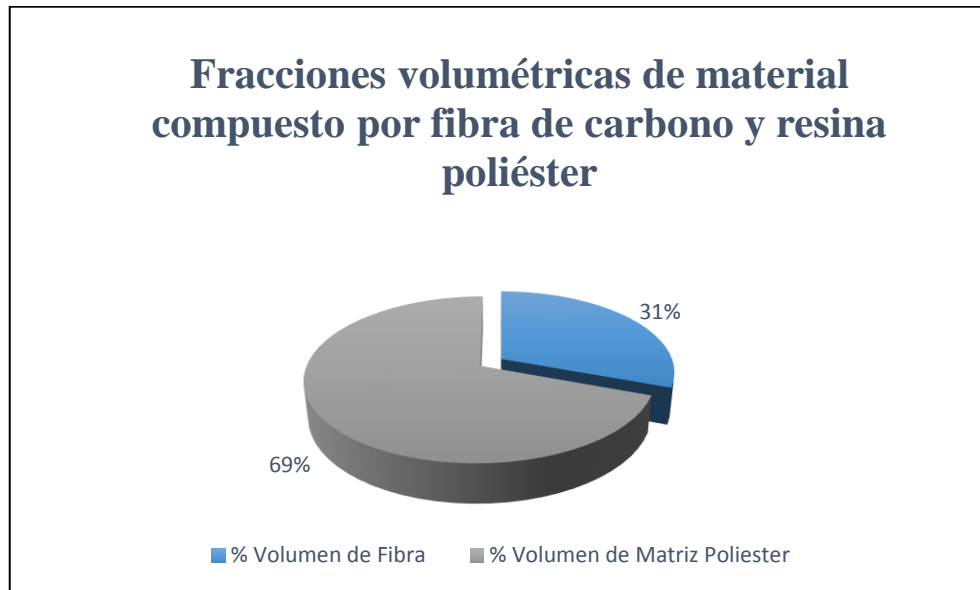
$$\text{Volumen de resina poliéster} = \frac{202 \text{ gr}}{1.5 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 175.65 \text{ cm}^3 = 0.1756 \text{ lt.}$$

$$V_{m \text{ poliester}} = 0.1756 \text{ lt}$$

$$V_f + V_m = V_c \quad (3.5)$$

$$V_c = 0.0774 \text{ lt} + 0.1765 \text{ lt}$$

$$V_c = 0.2539 \text{ lt}$$



Grafica 3.2: Evaluación de los porcentajes de fracción volumétrica de compuesto de fibra de carbono y resina Poliéster.

3.5.6 Fabricación de probetas para pruebas tensión

En esta sección de la investigación se manufacturaron 10 especímenes para las pruebas de tensión, los cuales se separaron en dos grupos de 5 probetas, con el fin de comparar las dos distintas matrices de resina epóxica y poliéster que se utilizaron en el análisis.

El método de manufactura utilizado para la realización de los especímenes cumple varias funciones para el análisis del material compuesto, ya que remueve el aire existente entre capas del laminado, compacta las capas proporcionando un laminado más uniforme, reduce humedad, ayuda a que no se modifique la orientación del laminado durante el curado y favorece en la interfaz de refuerzo-matriz. El molde por vacío deja un mejor acabado superficial en el material compuesto como se muestra en la figura 3.18.



Figura 3.15: Manufactura al vacío de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica para pruebas de tensión.



A)

B)

Figura 3.16: A) Acabado superficial de material compuesto con resina poliéster, B) Acabado superficial de material compuesto con resina epóxica.

Con el objetivo de obtener las probetas planas de material compuesto manufacturadas con los dos tipos de resina epóxica de diferente distribuidor, las cuales fueron sometidas a pruebas de tensión. Se cortaron respecto a las medidas mencionadas en la ASTM D3039 tal como se muestran en las figuras 3.19 y 3.20.

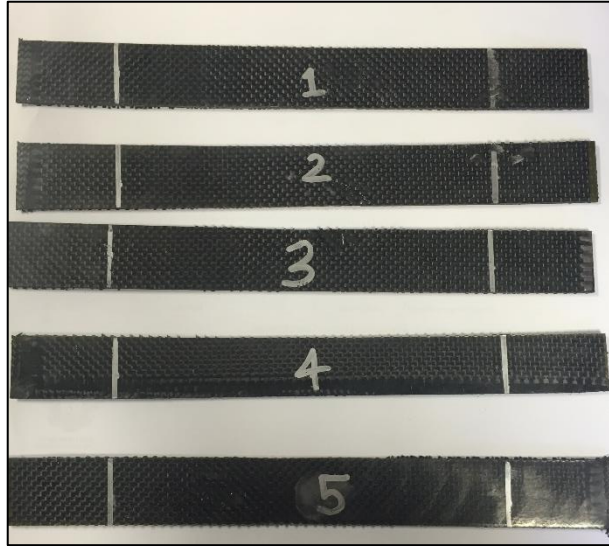


Figura 3.17: Probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica para pruebas de tensión.

Posteriormente a la manufactura, los especímenes de material compuestos se midieron y se promediaron 3 medidas de cada sección (ancho, espesor y longitud, estas medidas son necesarias para realizar las pruebas de tensión. (Ver tablas 3.14 y 3.14)

Tabla 3.14. Medidas promediadas de probetas de material compuesto para pruebas de tensión ASTM D3039.

Pruebas de Tensión (Probetas Resina Epóxica)			
Probeta	Ancho mm [in.]	Espesor mm [in.]	Longitud calibrada mm [in.]
1	27.48 [1.082]	2.21 [0.087]	164.33 [6.470]
2	27.53 [1.084]	2.28 [0.099]	165.10 [6.500]
3	27.48 [1.082]	2.28 [0.099]	166.75 [6.565]
4	27.48 [1.082]	2.10 [0.083]	165.10 [6.500]
5	28.16 [1.109]	2.21 [0.087]	164.57 [6.479]

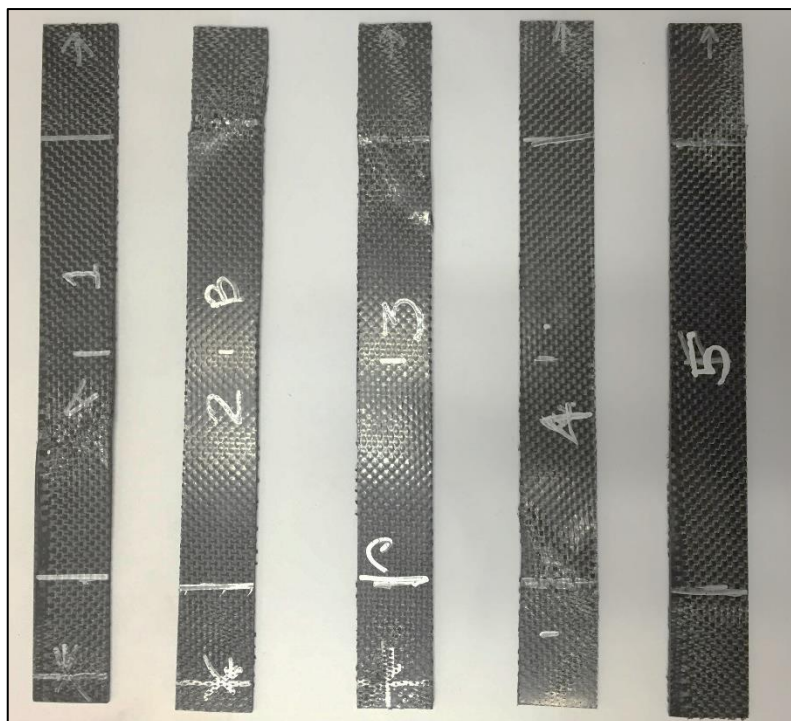


Figura 3.18: Probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina poliéster para pruebas de tensión.

Tabla 3.15. Medidas promediadas de probetas de material compuesto para pruebas de tensión ASTM D3039.

Pruebas de Tensión (Probetas Resina Poliéster)			
Probeta	Ancho mm [in.]	Espesor mm [in.]	Longitud calibrada mm [in.]
1	25.48 [1.676]	1.67 [0.066]	166.39 [6.590]
2	25.04 [1.663]	1.66 [0.065]	164.71 [6.485]
3	25.60 [1.008]	1.63 [0.064]	161.59 [6.362]
4	25.52 [1.005]	1.81 [0.071]	162.96 [6.416]
5	25.17 [1.727]	1.72 [0.068]	164.54 [6.478]

3.6 DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

3.6.1. Sierra de corte.

Con la finalidad de producir los especímenes de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica con las medidas estipulas bajo la norma ASTM D3039, se utilizó un cortador para pisos cerámicos (baldosas) con un disco de corte de metal, con el cual se cortaron las probetas para la aplicación de pruebas tensión y de flexión. Aplicando así esta

herramienta mencionada, la superficie del material compuesto no mostro daño alguno y se obtuvo una buena superficie de corte. A continuación, en la tabla 3.16 se muestran las especificaciones de la sierra de corte. ^[55]

Tabla 3.16. Especificaciones de cortador utilizado para material compuesto.

Sierra de corte	
Velocidad de corte de disco	3500 rpm
Potencia	550w



Figura 3.19: Sierra de corte utilizada para material compuesto

3.6.2 Máquina universal de ensayos SHIMADZU

La máquina AUTOGRAPH SHIMADZU AG-IC, permite un uso con un sistema adecuado que incluye, máquina de pruebas, dispositivos y software. ^[55] Este modelo de máquina cuenta con la capacidad de 100 kN (22480 lb-fuerza), en el cual se puede llevar a cabo los ensayos de tensión, compresión y flexión.

Para realizar las pruebas de tensión, la maquina universal de ensayos AUTOGRAPH SHIMADZU AG-IC permite el uso completo de un sistema operativo, el cual es adecuado para ensayos mecánicos, este software es basado en las necesidades que sean requeridas.



Figura 3.20: Maquina de ensayos SHIMADZU AG-IC

El software a utilizar como se muestra en la figura 3.23 es el Materials Testing Operation Software TRAPEZIUM, el cual es un arrojadador de datos de alta eficiencia y fácil de utilizar, consta con una guía visual para asegurarse de la configuración correcta de la prueba a realizar, introducción de datos de la cantidad y tamaño de los especímenes a analizar y arroja los datos de manera confiable y fácil de interpretar.

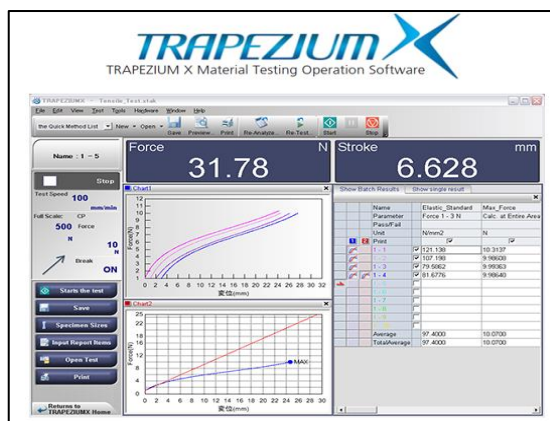


Figura 3.21: Software utilizado para pruebas de tensión.

Las especificaciones para la máquina de pruebas de tensión SHIMADZU, se describen en la tabla 3.17; la velocidad de prueba para los especímenes está recomendada por la norma ASTM D3039.

Tabla 3.17. Especificaciones de la maquina universal de ensayos. [55]

SHIMADZU AG-100kNIC	
Velocidad de prueba	2 mm/min [0.05 in/min]
Celda de carga	100 KN
Precisión de prueba de fuerza	Dentro de $\pm 1\%$ de la fuerza de ensayo indicado (en 1/500 a 1/1 rango de la fuerza de carga)
	Dentro de $\pm 1\%$ de la fuerza de ensayo indicado (en 1/250 a 1/1 rango de la fuerza de carga)
Software	Trapezium

3.7 PRUEBAS DE TENSION

A fin de realizar pruebas de tensión después de haber realizado el corte de las probetas, se utilizó la máquina universal de ensayos SHIMADZU. En los cinco especímenes manufacturados de cada material se aplicó la misma celda de carga de 100 KN, con la velocidad recomendada en la norma ASTM D3930, la cual es de 2mm/min [0.05 in/min].



Figura 3.22: Probeta de material compuesto sometida a prueba de tensión.

Para someter los especímenes a un adecuado análisis en pruebas de tensión se utilizaron mordazas especiales de la máquina de ensayos universales SHIMADZU, ya que cuentan con un buen muleteado para la sujeción de los especímenes que se someten a pruebas, tal como se muestra en la imagen 3.25. No se llegó a la necesidad de utilizar lija en la zona de

sujeción de los especímenes, tal como se recomiendan en la normas ASTM D3039 y ASTM D638, ya que las mordazas mencionadas se encuentran en buen estado.

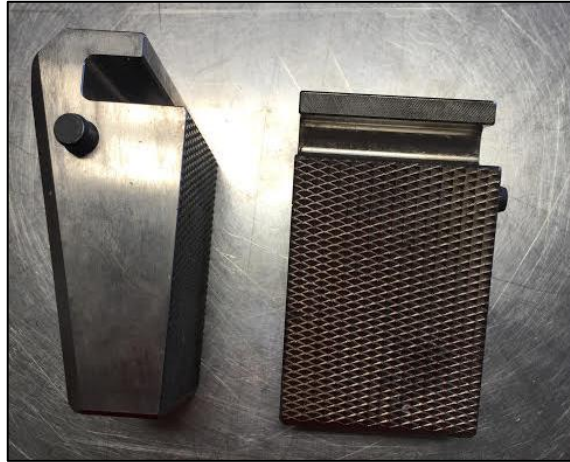
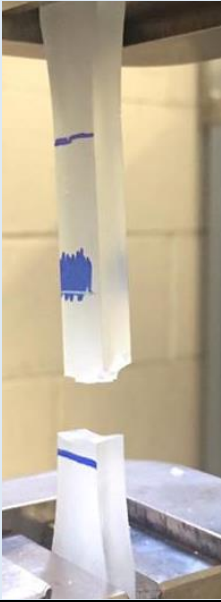
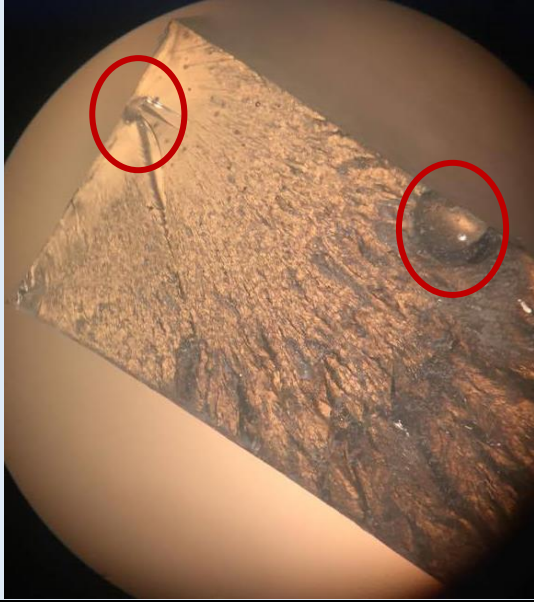




Figura 3.23: Mordazas de sujeción para pruebas de tensión.

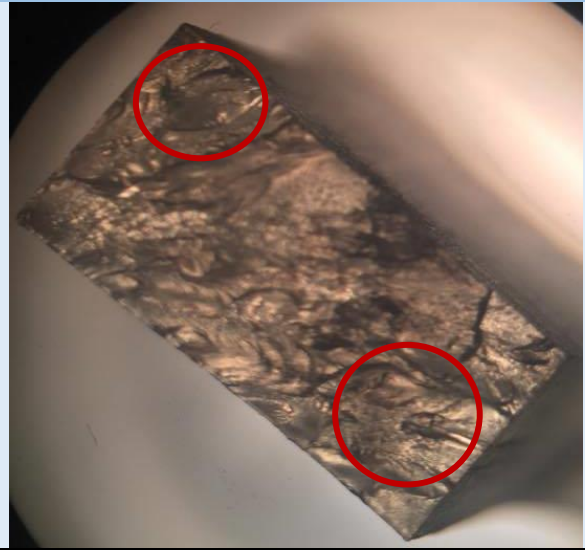
3.7.1 Probetas de resina epóxica.

Los especímenes Tipo I de resina epóxica que fueron sometidos a las pruebas de tensión, muestran en la tabla 3.18 el resquebrajamiento localizado en la zona calibrada de las probetas. Este fenómeno es encontrado en la mayoría de los plásticos amorfos vidriosos, a menudo pueden llevar error con el crecimiento de una red interna de pequeñas grietas.

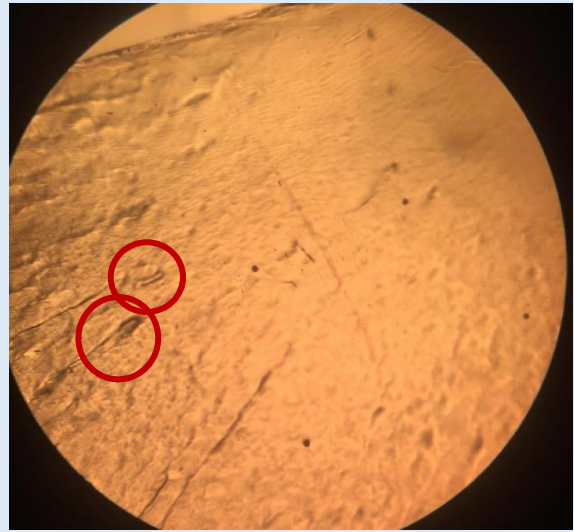
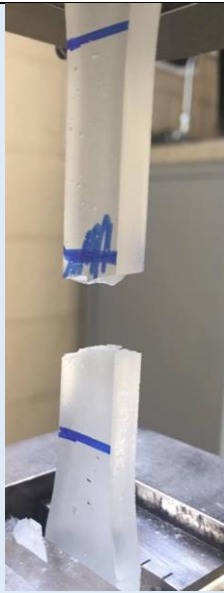
Tabla 3.18. Fallas por ensayo tensión en probetas de resina epóxica.

Fallas en Especímenes Tipo I de Resina Epóxica	
Ruptura a tensión	Vista Microscópica
Espécimen 1	
	
Espécimen 2	
	

Espécimen 3



Espécimen 4



Espécimen 5


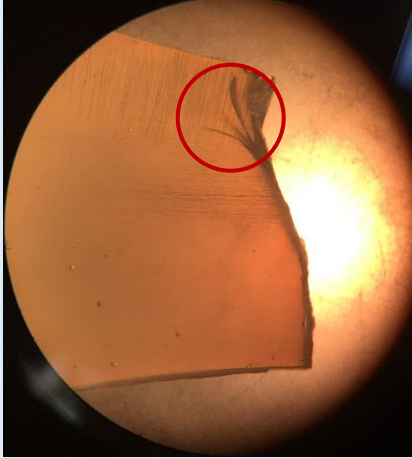

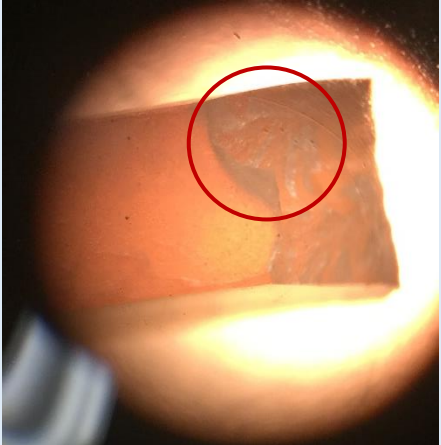


Las probetas examinadas presentan grietas y microhuecos, se observa en la columna de vista microscópica en círculos rojos los concentradores de esfuerzos que llevaron a los especímenes a su punto de ruptura. La presencia de defectos en forma discontinua dentro de la matriz polimérica provoca un incremento de las tensiones, a los cuales se les llama “concentradores de esfuerzos”, mismo que ocasionan que los especímenes lleguen a su punto de ruptura antes de sobrepasar a su límite elástico.

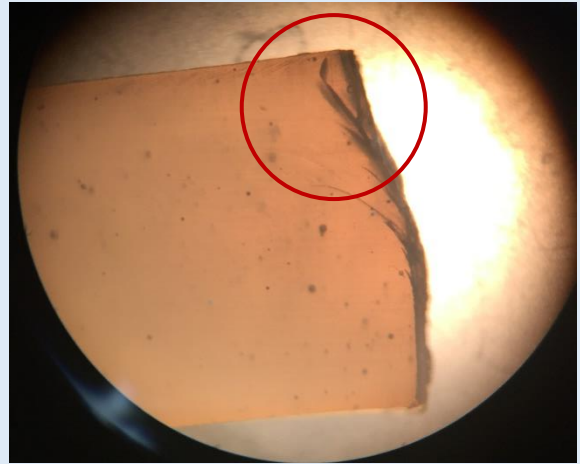
3.7.2 Probetas de resina poliéster.

Los especímenes Tipo I de resina epóxica que fueron sometidos a las pruebas de tensión, muestran en la tabla 3.18 el resquebrajamiento localizado en la zona calibrada de las probetas. Este fenómeno es encontrado en la mayoría de los plásticos amorfos vidriosos, a menudo pueden llevar error con el crecimiento de una red interna de pequeñas grietas.

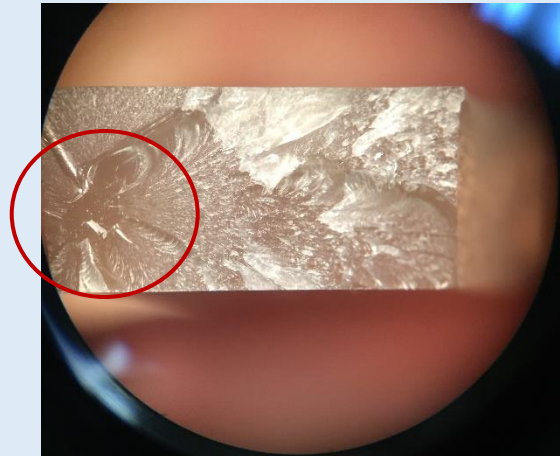
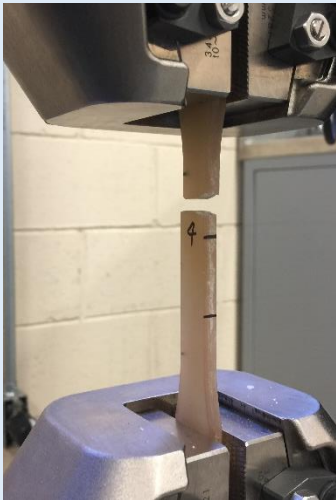
Tabla 3.19. Fallas por ensayo tensión en probetas de resina poliéster.

Fallas en Especímenes Tipo I de Resina Poliéster	
Ruptura a tensión	Vista Microscópica
Espécimen 1	
	
Espécimen 2	
	

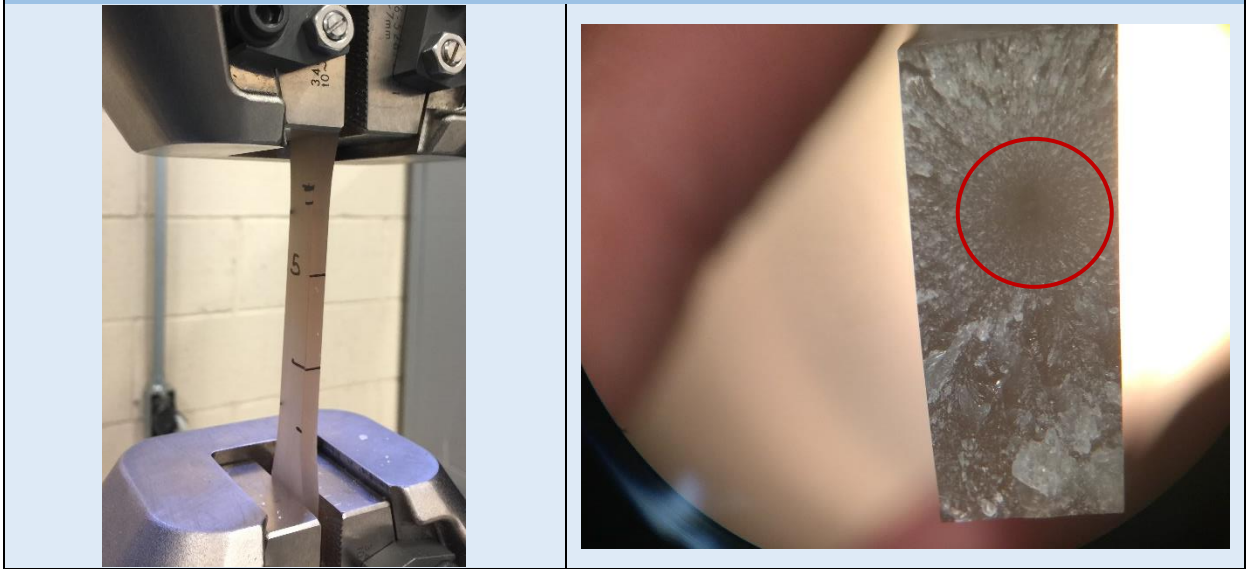
Espécimen 3



Espécimen 4



Espécimen 5



Tal como se explicó en la tabla 3.18, las probetas de resinas termoestables tanto epóxica como poliéster presenta grietas y microhuecos que provocan incrementación de tensiones, mismo que son llamadas concentradores de esfuerzos. Estos fenómenos que tienden a llevar al material a su punto de ruptura se presentan en la tabla 3.19; como se observa en las imágenes los especímenes muestran resquebrajamiento localizados en la zona calibrada, lo cual es buena señal del comportamiento del material. Las zonas afectadas que se muestran de color blanquecina, es en donde surgió la deformación de los especímenes a temperatura ambiente.

Uno de los fenómenos de resquebrajamiento más notorito ocurrido durante las pruebas de tensión, fue en la probeta 2, en donde se presentan desprendimiento del espacio total entre la sujeción de las mordazas, sin tener un error de crecimiento de grietas en el área calibrada. Este espécimen en especial se comportó de tal manera, debido a que presento una superficie cóncava en la sujeción de las mordazas, tal como se muestra en la figura 3.26.

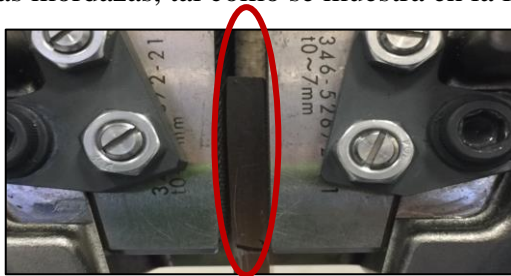


Figura 3.24: Mala sujeción en área de mordaza superior en probeta 2, debido a superficie cóncava.

3.7.3 Probetas de material compuesto con resina epóxica.

Los ensayos de tensión presentaron el tipo de falla en una localización determinada a lo largo de los especímenes, tal como se muestra en la figura 3.26.

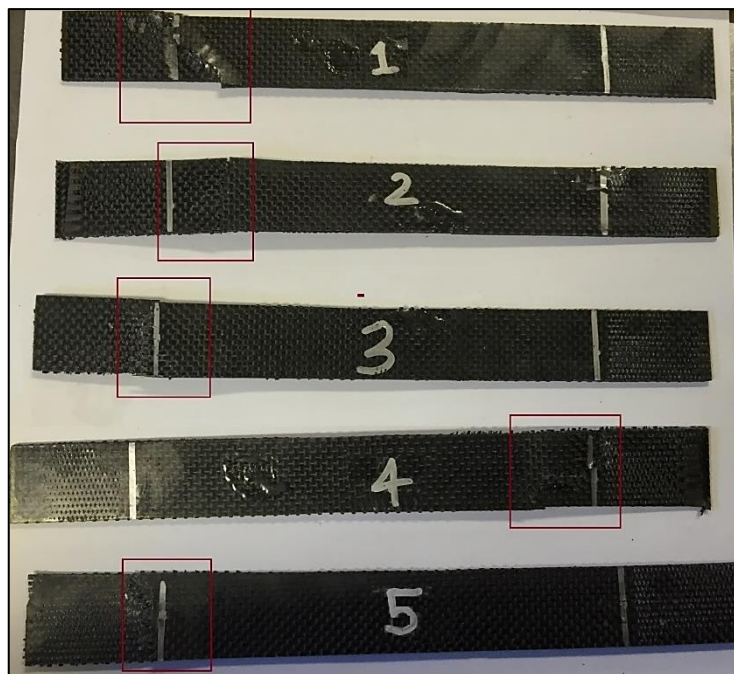


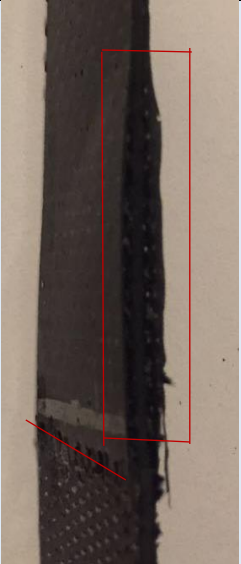
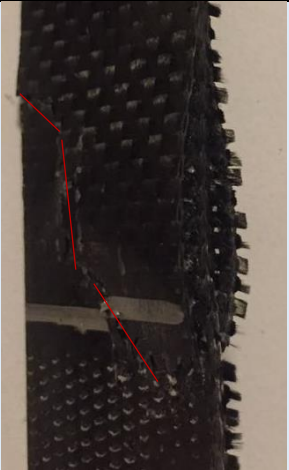



Figura 3.25: Presentación de fallas por ensayo de tensión.

En la tabla 3.29 se describen las fallas presentadas por el ensayo de tensión en cada uno de los especímenes de material compuesto, para determinar las fallas en los especímenes se consultó el código de la norma ASTM D3039.

Tabla 3.20. Fallas por ensayo de tensión presentadas en probetas.

Fallas en Especímenes de Fibra de carbono y Resina Epóxica	
Espécimen 1	Falla
	<p>(AGB) Angled Gage Bottom</p> <p>En la probeta 1 se presentó un tipo de falla con un ángulo alrededor de los 45°, debajo de la mordaza inferior, la localización de la falla se encuentra dentro del área calibrada.</p>

<p style="text-align: center;">Espécimen 2</p> 	<p style="text-align: center;">Falla</p> <p style="text-align: center;">(LGB) Lateral Gage Bottom</p> <p>La falla que se presentó en la probeta 2 es del tipo lateral a lo ancho de la probeta, se observa que la falla está dentro del área calibrada cercas de la mordaza inferior.</p>
<p style="text-align: center;">Espécimen 3</p> 	<p style="text-align: center;">Falla</p> <p style="text-align: center;">(DGB) Edge Delamination Gage Bottom</p> <p>La probeta 3 presenta una delaminación de las capas externas de fibra de carbón hacia el centro del material compuesto, la falla se presentó en el área calibrada cercas de la mordaza inferior.</p>
<p style="text-align: center;">Espécimen 4</p> 	<p style="text-align: center;">Falla</p> <p style="text-align: center;">(SAT) Long Splitting at grip/tap Top</p> <p>Se presentó en la probeta 4 una falla en donde las fibras se rompieron en partes a lo largo del área mostrada en la figura del espécimen 3, la falla apareció en el final de la mordaza superior y la delaminación termina en el área calibrada.</p>

Especimen 5	Falla
	<p data-bbox="881 233 1377 302">(DAB) Edge Delamination At grip/tap Bottom</p> <p data-bbox="846 344 1409 596">La probeta 5 presento una falla de delaminación que comienza en la mordaza inferior; la falla se prolongó hasta la longitud calibrada del espécimen.</p>

3.7.4 Probetas de material compuesto con resina poliéster

Las pruebas de tensión aplicadas en las probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster presentaron la falla muy a parecida al de las pruebas de resina epóxica, esto se debe a que se utilizó el mismo arreglo de laminado $[0/\pm 45]_s$

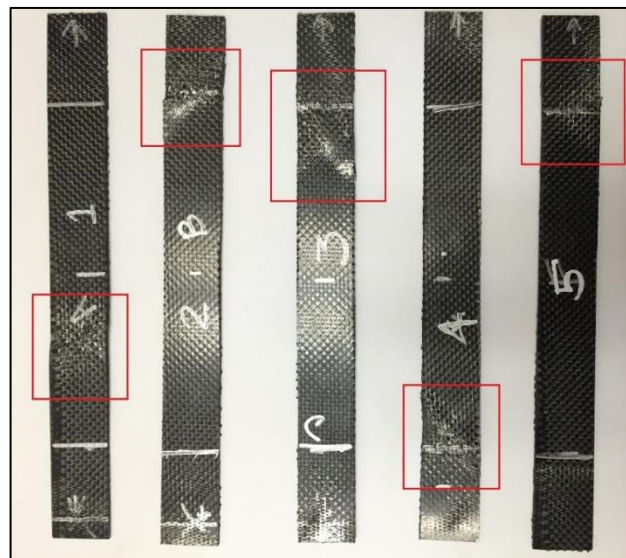







Figura 3.26: Presentación de fallas en material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster.

A continuación, la tabla 3.21, se presentará las fallas en los 5 especímenes de fibra de carbono y resina poliéster.

Tabla 3.21. Fallas por ensayo de tensión presentadas en probetas.

Fallas en Especímenes de Fibra de Carbono y Resina Poliéster	
Especímen 1	Falla
	<p>(AGB) Angle Gage Bottom</p> <p>Se observa una falla con un ángulo alrededor de los 45°, debajo de la mordaza superior, la localización de la falla se encuentra dentro del área calibrada.</p>
Especímen 2	Falla
	<p>(AAT) Angle At grib/tab Top</p> <p>La falla que se presentó en la probeta 2 cuenta con un ángulo de 45° con una delaminación que comienza debajo de la mordaza superior.</p>
Especímen 3	Falla
	<p>(AGT) Angle Gage Top</p> <p>La probeta 3 presenta una falla donde se encuentra en ángulo dentro de la zona calibrada, debajo de la mordaza superior.</p>

Espécimen 4	Falla
	<p data-bbox="951 237 1305 275">(AGB) Angle Gage Bottom</p> <p data-bbox="846 310 1409 562">Se presenta una falla en la probeta 4 donde se encuentra en ángulo 45° dentro de la zona calibrada, debajo de la mordaza inferior.</p>
Espécimen 5	Falla
	<p data-bbox="938 793 1318 831">(AAT) Angle At grip/top Top</p> <p data-bbox="846 867 1409 1045">La probeta 5 presento una falla de delaminación de 45° debajo de la mordaza superior.</p>

CAPÍTULO 4

Análisis y discusión de resultados

4.1 Resultados de pruebas de Tensión

En esta sección del capítulo 3, se detallan los resultados obtenidos durante el desarrollo de los ensayos de tensión para los 4 grupos de especímenes sometidos:

1. Probetas Tipo I Matriz Epóxica.
2. Probetas Tipo I Matriz Poliéster.
3. Probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica.
4. Probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster.

Respecto a los datos obtenidos la resistencia a tracción, deformación a la ruptura, porcentaje de elongación, resistencia a la cedencia por el método de offset y el módulo de Young o de elasticidad.

4.1.1 Resistencia a la tracción (σ)

Los materiales sometidos a las pruebas de tensión pueden soportar un esfuerzo máximo relacionando el área transversal y las cargas máximas:

$$\sigma_{max} = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

Dónde:

- σ_{max} = Esfuerzo máximo a la tracción [MPa]
- F = Carga máxima aplicada [N]
- A = Área de la sección transversal de la probeta [mm²]

4.1.2 Deformación a la ruptura (ε) y porcentaje de elongación (n)

La deformación a ruptura o elongación se obtiene con la relación que existe entre la longitud inicial de la probeta y la longitud final después del ensayo aplicado:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i} \quad (4.2.)$$

$$\%n = \varepsilon * 100 \quad (4.3)$$

Donde:

- ε = Elongación
- n = Porcentaje de elongación [%]

- l_i = Longitud inicial [mm]
- l_f = Longitud final [mm]

4.1.3 Módulo de Young (E)

El módulo de Young o módulo de elasticidad se analiza siguiendo la ecuación establecida en la norma del ensayo, la ecuación se desglosa con las siguientes variables:

$$E = \left(\frac{dP}{dL}\right) \left(\frac{L}{b \cdot d}\right) \quad (4.4)$$

Dónde:

- E = Módulo de elasticidad [GPa]
- dP = Fuerza aplicada [N]
- dL = Variación de la longitud en la probeta [m]
- L = Longitud inicial de la probeta [m]
- b = Ancho de la probeta [m]
- d = Espesor de la probeta [m]

4.2 Probetas Tipo 1 de Matriz Polimérica

Como se comenta en el apartado 4.1 del presente capítulo, los resultados obtenidos por las pruebas de tensión de las probetas de matriz polimérica Tipo I, son utilizados en las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 para obtener los valores de las propiedades mecánicas que son de interés en este estudio, se presentaran tablas con resultados analizados.

4.2.1 Resina Epóxica

4.2.1.1 Esfuerzo Máximo

Los esfuerzos máximos obtenidos por los ensayos de tensión de las probetas de resina epóxica se muestran en la tabla 4.1, donde la probeta 2 obtuvo el mayor esfuerzo de los especímenes analizados. A pesar que la probeta 3 obtuvo una mayor fuerza aplicada, el área transversal de la probeta es mayor en comparación con el respecto de los 4 especímenes, por ello su esfuerzo máximo está por debajo de la probeta 2. En promedio el esfuerzo máximo soportado por los especímenes de resina epóxica fueron 39.1 GPa, que en comparación de su ficha técnica está por debajo un 80% en resistencia al ser sometidos a esfuerzo de tensión.

Como se mencionó en el apartado 3.7.1 del capítulo 3, en el proceso de manufactura se generan microhuecos que hacen su función de concentradores de esfuerzos, mismo que debilitan el material antes de llegar a su esfuerzo máximo permisible.

Tabla 4.1. Esfuerzos máximos de ensayos a tensión calculados en probetas tipo I de resina epóxica.

Espécimen	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Área [mm ²]	Fuerza [N]	Esfuerzo [MPa]
Probeta 1	6.53	13.19	86.1307	3084.375	35.8
Probeta 2	6.35	13.13	83.3755	3806.25	45.7
Probeta 3	6.23	13.09	81.5507	3162.5	38.8
Probeta 4	6.65	12.89	85.7185	3025	35.3
Probeta 5	6.39	12.99	83.0061	3312.5	39.9
Promedio				3278.125	39.1

4.2.1.2 Elongación

A pesar que este polímero se comporta como un polímero cristalizado, presento un porcentaje de deformación promedio de 5.19% (ver tabla 4.2.) ya que como en cualquier material, este presenta una zona plástica. Su porcentaje de deformación es aceptable ya que se analizó un polímero termoestable. Por otra parte, en comparar el porcentaje de deformación mencionado en la ficha técnica del material en el apartado de la tabla 3.3, el porcentaje de elongación obtenido en los especímenes está por arriba un 180%.

Tabla 4.2. Elongación unitaria y porcentaje de deformación de probetas tipo I de resina epóxica.

Especímenes	l_i [mm]	l_f [mm]	Elongación	Deformación (%)
Probeta 1	50	52.65	53.0E-3	5.30%
Probeta 2	50	52.71	54.2E-3	5.42%
Probeta 3	50	52.365	47.3E-3	4.73%
Probeta 4	50	52.515	50.3E-3	5.03%
Probeta 5	50	52.745	54.9E-3	5.49%
Promedio			51.9E-3	5.19%

4.2.1.4 Módulo de elasticidad

El promedio obtenido del módulo de elasticidad de los especímenes sometidos a los ensayos de tensión se muestra en la tabla 4.3, está por debajo un 60%, del módulo elástico establecido como propiedad de la resina epóxica adquirida, esto quiere decir que a pesar que el material no logro obtener el esfuerzo máximo permisible, su capacidad elástica no se mantiene, a pesar que es una de las propiedades mecánicas que permanece constante en el material. La diferencia notable respecto a las fichas técnicas y bibliografías citada, se puede deber a las condiciones en que se llevó a cabo los procesos de manufactura y a los microhuecos o concentradores de esfuerzos desarrollados en el curado de la matriz; ya que los 5 especímenes se comportaron de forma similar entre ellos, y diferente en resultados con respecto a su bibliografía. Se puede decir que por ser una resina polimérica su tenacidad es pobre.

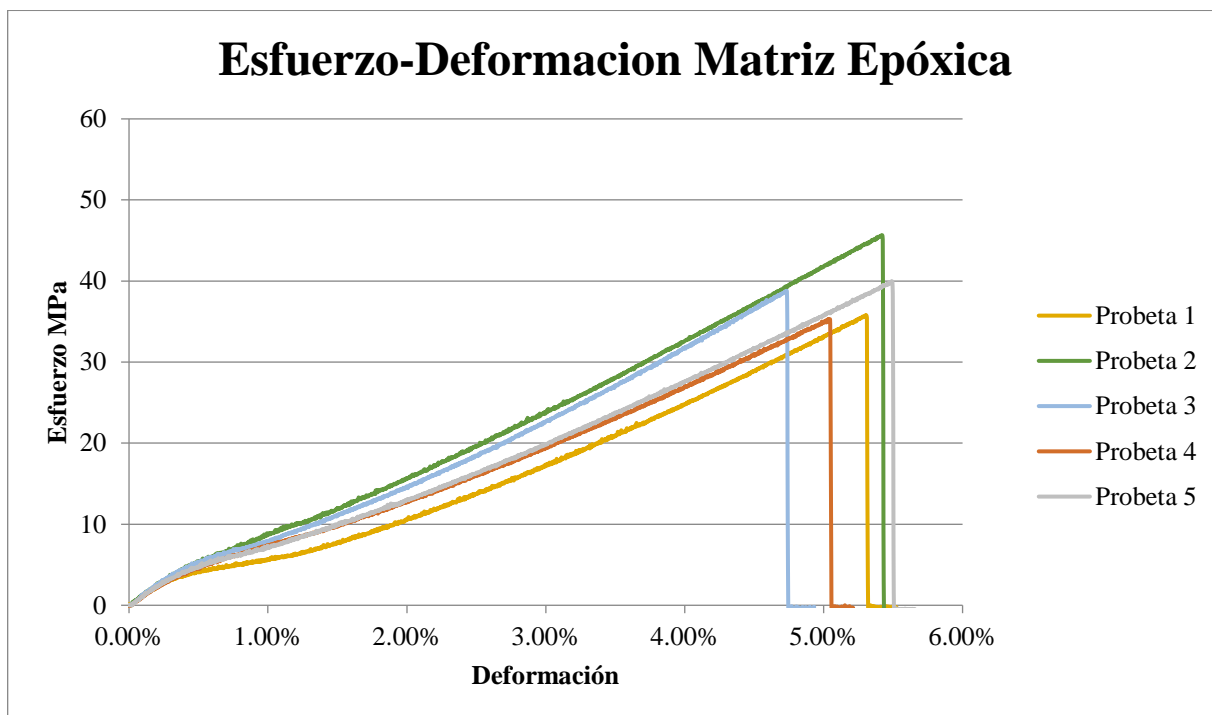
Tabla 4.3. Módulo de Young obtenido de probetas tipo I de resina epóxica.

Especímenes	Fuerza [N]	Variación de la longitud [m]	Longitud Inicial [m]	Espesor [m]	Ancho [m]	Módulo de Young (GPa)
Probeta 1	3084.375	0.00265	0.05	0.00653	0.01319	.676
Probeta 2	3806.25	0.00271	0.05	0.00635	0.01313	.842
Probeta 3	3162.5	0.002365	0.05	0.00623	0.01309	.820
Probeta 4	3025	0.002515	0.05	0.00665	0.01289	.702
Probeta 5	3312.5	0.002745	0.05	0.00639	0.01299	.727
Promedio	3278.125	0.002597	0.05	0.00643	0.013058	.753

4.2.1.5 Curva de esfuerzo-deformación

Tal como se mencionó, la probeta 2 es la que obtuvo el mayor esfuerzo soportado, cabe mencionar que los 4 especímenes restantes, su curva de esfuerzo-deformación se encuentran muy cercas una de otras, tal como se observa en la gráfica 4.2, lo cual indica que el método de manufactura fue factible para el muestreo empelado, ya que no se observa tanta

dispersión del comportamiento de los especímenes bajo esfuerzos de tensión entre ellos. Con respecto al comportamiento elástico-plástico del material, la gráfica 4.2 muestra semejanza entre los especímenes, aunque cabe señalar que los esfuerzos máximos y deformación están por debajo de los datos teóricos citados en este trabajo, tal como se discutió en el apartado 4.2.1.2.



Gráfica 4.1: Curva esfuerzo-deformación de probetas tipo I de resina epóxica.

4.2.2 Resina Poliéster

4.2.2.1 Esfuerzo Máximo

En el ensayo de tracción aplicado en las probetas de resina poliéster, los esfuerzos máximos de cada espécimen se promediaron, obteniendo así un valor de 43.6 MPa tal como se muestra en la tabla 4.4. En relación al valor de la ficha técnica de la matriz poliéster mencionada en la tabla 3.4, el esfuerzo máximo obtenido está solo un 20% debajo del módulo de tensión de la bibliografía mencionada en el capítulo 3. Esta diferencia de valores, se debe a los concentradores de esfuerzos que se crean por el proceso de manufactura empleado.

Tabla 4.4. Esfuerzos máximos de ensayos a tensión calculados en probetas tipo I de resina poliéster.

Espécimen	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Área [mm ²]	Fuerza [N]	Esfuerzo [MPa]
Probeta 1	5.06	12.75	64.515	3650	56.8
Probeta 2	6.61	12.87	85.0707	4093.75	48.9
Probeta 3	6.13	12.6	77.238	3390.625	43.9
Probeta 4	5.49	12.84	70.4916	2775	39.4
Probeta 5	5.54	12.81	70.9674	2075	29.2
Promedio				3196.875	43.6

4.2.2.2 Elongación

En relación con los resultados de resina epóxica, ambos materiales al ser matrices termoestables se comportan como polímeros cristalizados. Con respecto al ensayo de tracción realizado, el valor obtenido del porcentaje de deformación fue 4.23%, mismo que se presenta en la tabla 4.5; este valor es superior un 135% con respecto al valor teórico mencionado en su ficha técnica.

Tabla 4.5. Elongación unitaria y porcentaje de deformación de probetas tipo I de resina poliéster.

Especímenes	l_i [mm]	l_f [mm]	Elongación	Deformación (%)
Probeta 1	50	53.21	64.2E-3	6.42%
Probeta 2	50	52.35	47.0E-3	4.70%
Probeta 3	50	51.5	30.0E-3	3.00%
Probeta 4	50	51.96	39.2E-3	3.92%
Probeta 5	50	51.55	31.0E-3	3.10%
Promedio			42.3E-3	4.23%

4.2.2.4 Módulo de elasticidad

Para lograr obtener el módulo de elasticidad de la matriz poliéster, se promediaron los resultados de los especímenes ensayados. Como resultado se obtuvo un valor de 1.06 GPa tal

como se muestra en la 4. En este caso el valor obtenido esta un 95% por debajo de los valores bibliográficos mencionados en los capítulos 2 y 3. En cuanto a los valores experimentales y teóricos comprados, se debe de mencionar que existe una diferencia muy evidente, sin embargo, la correlación entre los especímenes es aceptable para el muestreo empleado en el ensayo de tracción.

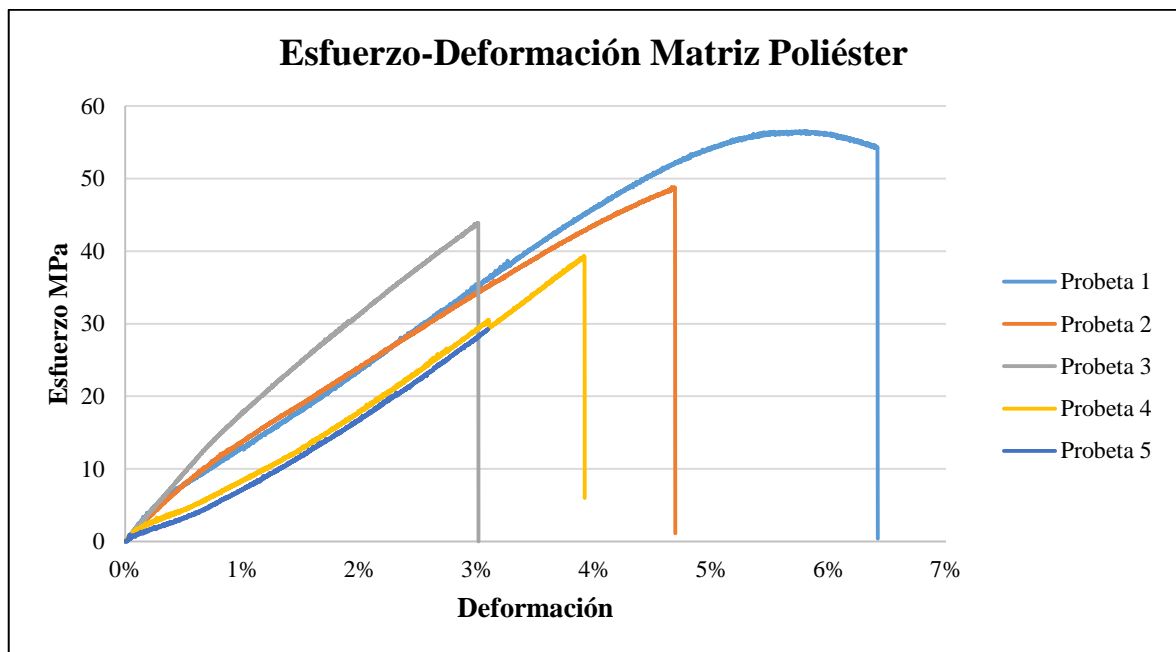
Tabla 4.6. Módulo de Young obtenido de probetas tipo I de resina poliéster.

Especímenes	Fuerza [N]	Variación de la longitud [m]	Longitud Inicial [m]	Espesor [m]	Ancho [m]	Módulo de Young (GPa)
Probeta 1	3418.75	0.00321	0.05	0.00506	0.01275	.881
Probeta 2	3084.375	0.00235	0.05	0.00661	0.01287	1.02
Probeta 3	3806.25	0.0015	0.05	0.00613	0.0126	1.46
Probeta 4	3162.5	0.00196	0.05	0.00549	0.01284	1.00
Probeta 5	3312.5	0.00155	0.05	0.00554	0.01281	.943
Promedio	3356.875	0.002114	0.05	0.005766	0.012774	1.06

4.2.2.5 Curva de esfuerzo-deformación

Con respecto a los valores mencionados en esta sección de resultados de la matriz de resina poliéster, se muestra la curva de esfuerzo-deformación, donde en efecto la probeta 1 muestra una superioridad en comparación al resto del muestreo. Por otra parte, a pesar que los especímenes fueron manufacturados y rectificados de la misma manera, estos presentan un comportamiento diferente entre ellos. No obstante, eso no quiere decir que los especímenes no son factibles, ya que como se mencionó en el capítulo 3, existen variables en el proceso de manufactura que influyen en la formación de defectos en cada una de las probetas. Por otra parte, la probeta 5 muestra un comportamiento hasta su punto de esfuerzo máximo, sin presentar adelgazamiento de la sección transversal que es en donde se presenta el esfuerzo a la ruptura; se debe mencionar que este espécimen fue el único que fallo en el área de mordazas y

no en el área calibrada como marca la norma. En todo caso la obtención de la gráfica 4.4 muestra el comportamiento del material polimérico.



Gráfica 4.2: Curva esfuerzo-deformación de probetas tipo I de resina poliéster.

4.3 Probetas de Material Compuesto

Para el análisis de materiales compuestos se utilizan las mismas ecuaciones mencionadas en el apartado 4.2, ya que a pesar que los composites se comportan como materiales cuasi-isotrópicos, nos enfocaremos solo en las propiedades mecánicas de esfuerzos máximos, elongación y módulo de elasticidad, para así poderlo comparar con bibliografía de fabricación de prótesis transtibiales y así conocer si los laminados implementados en esta investigación son factibles para el objetivo principal, que es para la aplicación de una prótesis transtibial.

4.3.1 Fibra de Carbono y Resina Epóxica

4.3.1.1 Esfuerzo Máximo

El esfuerzo máximo analizado por los especímenes de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica da un valor promediado de 226.3 MPa, donde la probeta 4 resalta en el muestro por soportar el esfuerzo máximo, tal como se muestra en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Módulo de Young obtenido de probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica.

Espécimen	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Área [mm ²]	Fuerza [N]	Esfuerzo [MPa]
Probeta 1	2.69	27.88	74.9972	13556.25	180.8
Probeta 2	2.21	27.48	60.7308	13668.75	225.1
Probeta 3	2.28	27.53	62.7684	15271.88	243.5
Probeta 4	2.1	27.48	57.708	14384.38	249.3
Probeta 5	2.21	28.16	62.2336	14500	233.0
Promedio				14276.252	226.3

4.3.1.2 Elongación

El análisis de porcentaje de deformación y elongación en los materiales compuestos, es más complicado de analizar, ya que como se observó en capítulo 3 en el apartado 3.7.3 los especímenes no llegaron a una ruptura abrupta, ya que solo obtuvieron fracturas a un ángulo de 45° por la configuración de laminado que se empleó, por ello el porcentaje de deformación disminuye en este material tal como se observa en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Elongación unitaria y porcentaje de deformación de probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica.

Especímenes	l_i [mm]	l_f [mm]	Elongación	Deformación (%)
Probeta 1	167.69	173.964	37.4E-3	3.74%
Probeta 2	164.33	170.286	36.2E-3	3.62%
Probeta 3	165.1	170.858	34.9E-3	3.49%
Probeta 4	165.1	170.419	32.2E-3	3.22%
Probeta 5	164.57	169.766	31.6E-3	3.16%
Promedio			34.5E-3	3.45%

4.3.1.4 Módulo de elasticidad

Tal como se observa en la tabla 4.9, el módulo de Young obtenido es de 6.63 GPa, el cual es un valor alto, e indica que el material tiene buena capacidad elástica, y que el material cuenta con un alto nivel de rigidez, esto se debe a los refuerzos utilizados de fibra de carbono, a pesar que en la totalidad del material compuesto la resina epóxica domina un 64%, el

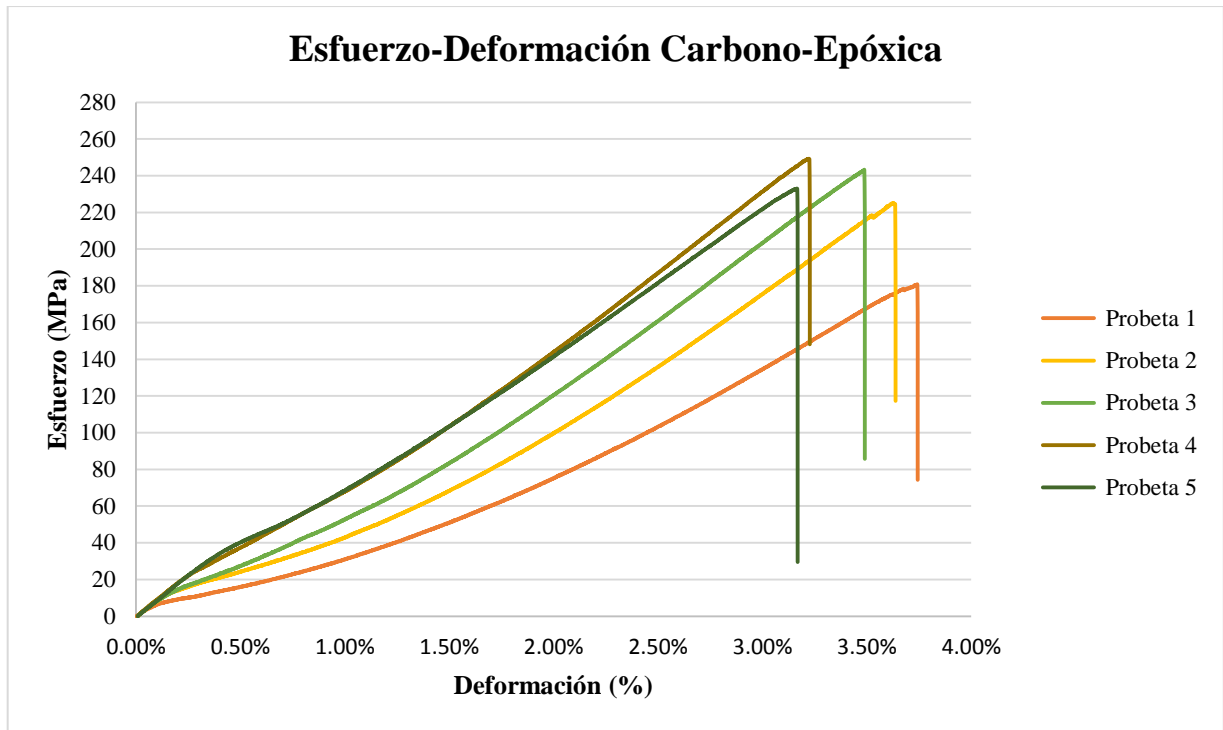
material que atribuye la resistencia a esfuerzos y acumulación de energía es la fibra de carbono.

Especímenes	Fuerza [N]	Variación de la longitud [m]	Longitud Inicial [m]	Espesor [m]	Ancho [m]	Módulo de Young [GPa]
Probeta 1	13.6E+3	0.006274	0.16769	0.00269	0.02788	4.83
Probeta 2	13.7E+3	0.005956	0.16433	0.00221	0.02748	6.21
Probeta 3	15.3E+3	0.005758	0.1651	0.00228	0.02753	6.98
Probeta 4	14.4E+3	0.005319	0.1651	0.0021	0.02748	7.74
Probeta 5	14.5E+3	0.005196	0.16457	0.00221	0.02816	7.38
Promedio	14276.25 2	0.0057006	0.165358	0.00229 8	0.027706	6.63

Tabla 4.9. Módulo de Young obtenido de probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica.

4.3.1.5 Curva de esfuerzo-deformación

En la curva de esfuerzo-deformación obtenida del ensayo de tracción los especímenes de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica, se observa una superioridad en la probeta 4, tal como se mostró en la tabla 4.7 y como se observa en la gráfica 4.6.



Gráfica 4.3: Curva esfuerzo-deformación de probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica.

4.3.2 Fibra de Carbono y Resina Poliéster

4.3.2.1 Esfuerzo Máximo

En los especímenes de fibra de carbono y resina poliéster, los esfuerzos máximos obtenidos por los ensayos de tensión dan un valor promediado de 269 MPa, en donde la probeta 3 obtiene una resistencia superior en comparación a los 4 especímenes del muestreo, tal como se observa en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. Módulo de Young obtenido de probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina poliéster.

Especímenes	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Área [mm ²]	Fuerza [N]	Esfuerzo [MPa]
Probeta 1	2.108	25.9	54.5972	13562.5	248.4
Probeta 2	2.082	26.16	54.46512	13668.75	251.0
Probeta 3	2.032	25.9	52.6288	15271.88	290.2
Probeta 4	2.006	25.9	51.9554	14384.38	276.9
Probeta 5	2.006	25.9	51.9554	14500	279.1
Promedio				14277.502	269.1

4.3.2.2 Elongación

El porcentaje de deformación obtenido es significativo (ver tabla 4.11), aunque el valor es mínimo, se debe a que los especímenes no llegaron a una ruptura abrupta en donde el material se separa completamente, tal como se muestra en el capítulo 3, la mayoría de las fallas se originan a 45° por el laminado simétrico balanceado empleado.

Tabla 4.11. Elongación unitaria y porcentaje de deformación de probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster.

Especímenes	l_i [mm]	l_f [mm]	Elongación	Deformación (%)
Probeta 1	165.1	171.374	38.0E-3	3.80%
Probeta 2	165.1	171.056	36.1E-3	3.61%
Probeta 3	165.1	170.857	34.9E-3	3.49%
Probeta 4	165.1	170.419	32.2E-3	3.22%
Probeta 5	165.1	170.309	31.6E-3	3.16%
Promedio			34.5E-3	3.45%

4.3.2.4 Módulo de elasticidad

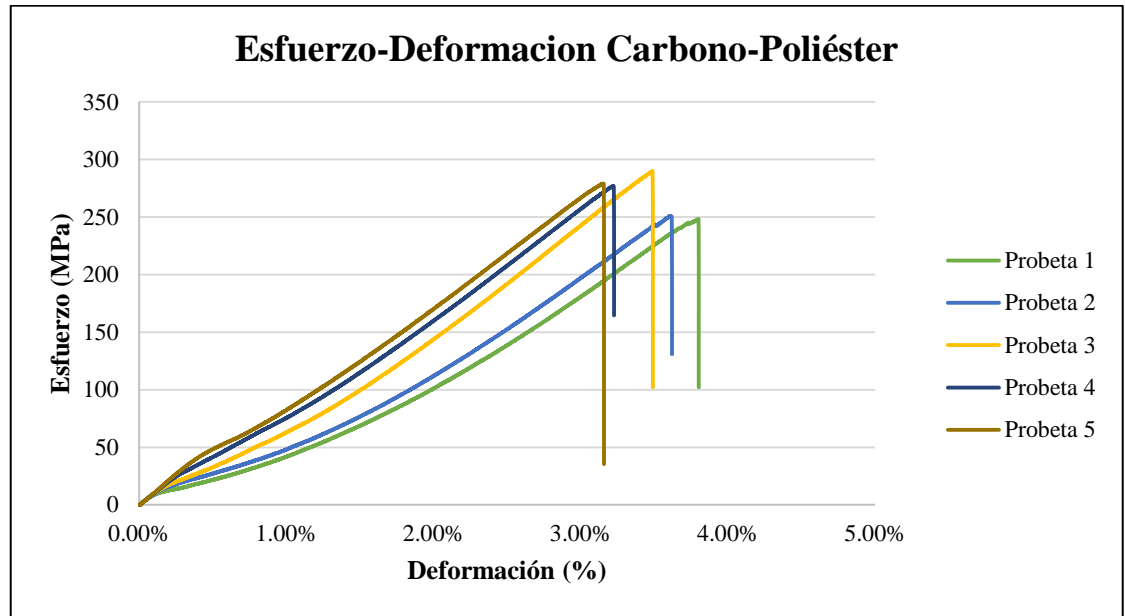
El módulo de elasticidad obtenido muestra una gran variación entre 2 de los 5 especímenes. El límite elástico da un resultado alto en promedio del ensayo aplicado en las probetas de fibra de carbono y resina poliéster, obteniendo 785 GPa tal como se observa en la tabla 4.12, lo cual indica que el material cuenta con una gran rigidez.

Tabla 4.12. Módulo de Young obtenido de probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina poliéster.

Especímenes	Fuerza [N]	Variación de la longitud [m]	Longitud inicial [m]	Espesor [m]	Ancho [m]	Módulo de Young [GPa]
Probeta 1	13562.5	0.006274	0.1651	0.002108	0.0259	6.54
Probeta 2	13668.75	0.005956	0.1651	0.002082	0.0261	6.96
Probeta 3	15271.88	0.005757	0.1651	0.002032	0.0259	8.32
Probeta 4	14384.38	0.005319	0.1651	0.002006	0.0259	8.59
Probeta 5	14500	0.005209	0.1651	0.002006	0.0259	8.85
Promedio	14277.502	0.005703	0.1651	0.0020468	0.025952	7.85

4.3.2.5 Curva de esfuerzo-deformación

La gráfica 4.8 muestra las curvas de esfuerzo-deformación de los especímenes de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster, donde se muestra la superioridad de la probeta 3, a pesar que se observa la inferioridad de las probetas 1 y 2.



Gráfica 4.4: Curva esfuerzo-deformación de probetas de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster.

4.4 Comparación de Resultados

En esta sección del capítulo, se tiene como objetivo comparar las matrices poliméricas, matrices y con material compuesto y por último comparar ambos laminados de material compuesto. De esta manera se pretende conocer los porcentajes de diferencia de las propiedades mecánicas de cada comparación.

Finalmente, los valores obtenidos nos darán a conocer que material compuesto es más óptimo para la aplicación de una prótesis transtibial.

4.4.1 Matrices Poliméricas

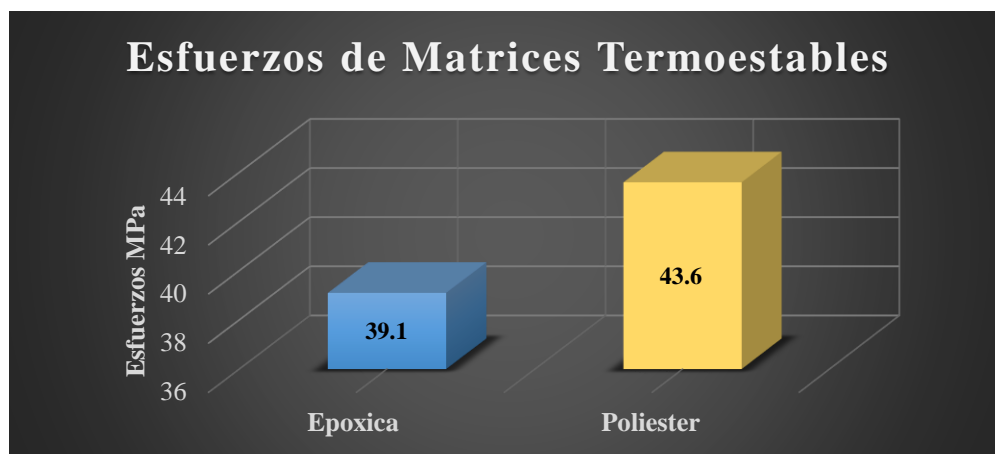
Las matrices poliméricas son comparadas en la tabla 4.13, en donde se muestran los valores promedios de las propiedades mecánicas. Resulta claro la superioridad de la resina poliéster, con un 10.32% por encima del esfuerzo de la resina epoxica. Mientras que el porcentaje de deformación es mayor en la resina epoxica un 18.5%, este dato puede ser

favorable o desafortunado dependiendo la aplicación del material, por el objetivo de este trabajo, es preferible utilizar materiales con menos porcentaje de deformación. Finalmente se compara el módulo elástico, en donde la resina poliéster presenta una superioridad del 28.96% por encima de la resina epoxica.

Tabla 4.13. Comparación de propiedades de mecánicas de matrices poliméricas termoestables

Propiedades mecánicas	Matrices		% Diferencia
	Epóxica	Poliéster	
Esfuerzo [Mpa]	39.1	43.6	10.3211
Elongación	5.19E-02	4.23E-02	18.5
Deformación [%]	5.19	4.23	18.5
Módulo Elástico [Gpa]	.753	1.06	28.96

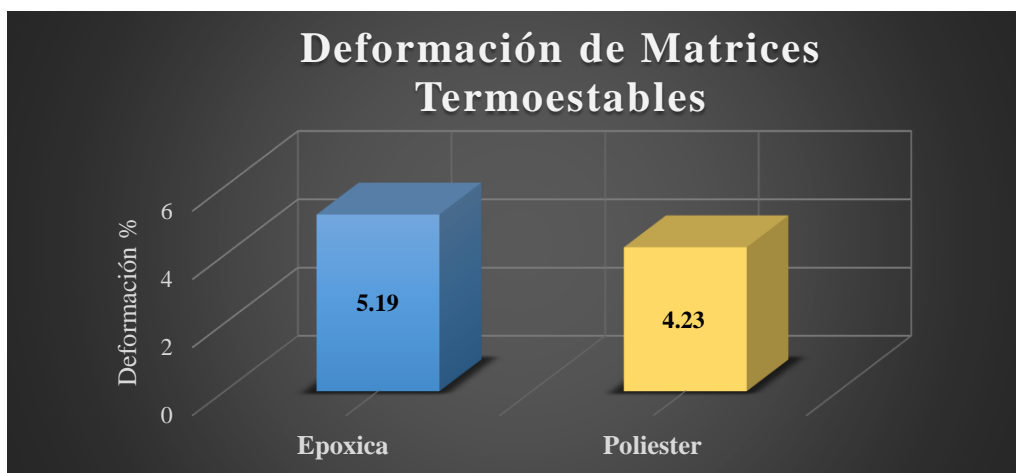
Los esfuerzos obtenidos de las matrices poliméricas muestran una diferencia de 4.5 MPa entre epoxica y poliéster. En cuanto a la matriz con el valor más alto se muestra en la gráfica 4.9, en donde se comparan los resultados. Por lo tanto, la resina poliéster presenta una mejora significativa.



Gráfica 4.5: Comparación de esfuerzos en MPa de resinas.

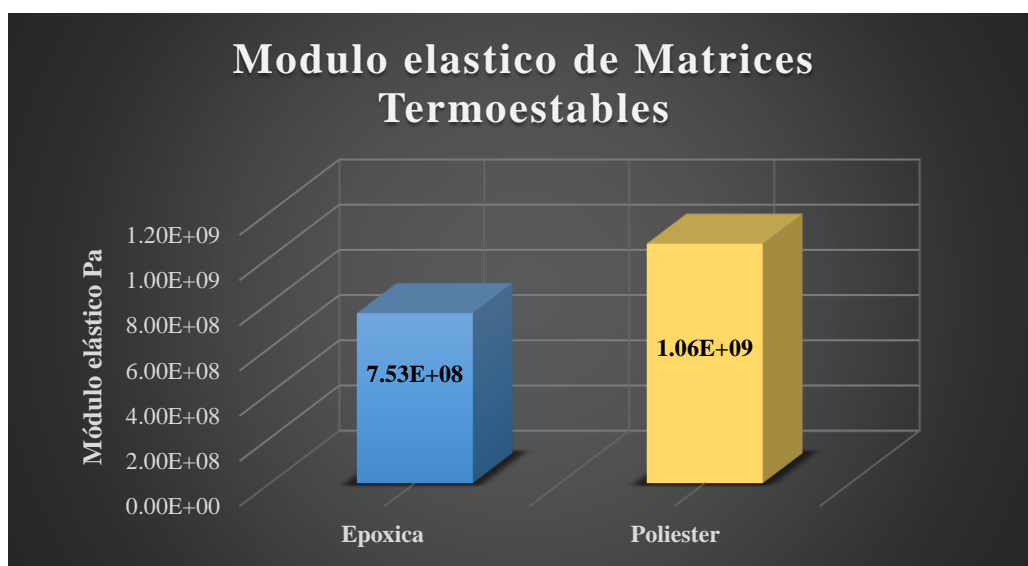
Respecto a los porcentajes de deformación obtenidos entre ambas matrices, la resina epóxica cuenta con un 0.19% de deformación superior en comparación de la resina poliéster, así como se observa en la gráfica 4.10. A pesar que es un valor mínimo, ambas resinas no presentan el valor de porcentaje de deformación dentro de los rangos citados en las fichas

técnicas de los capítulos 2 y 3. El comportamiento de elongación de los materiales es semejante por el hecho de que ambas matrices son termoestables.



Gráfica 4.6: Comparación de porcentajes de deformación en matrices.

Finalmente, la diferencia de los módulos de elasticidad de las matrices epóxica y poliéster dan un valor de 0.307 GPa o 307 MPa. Evidentemente como se muestra en la gráfica 4.11 la matriz de resina poliéster cuenta con una superioridad en comparación de la matriz epóxica. Por consiguiente, el módulo de Young analizado se contradice los datos experimentales con los teóricos, ya que en teoría la resina epóxica cuenta con mejores propiedades mecánicas que otras resinas, entre ellas incluida la resina poliéster.



Gráfica 4.7: Comparación de módulos de elasticidad de matrices poliméricas.

4.4.2 Material Compuesto y matrices

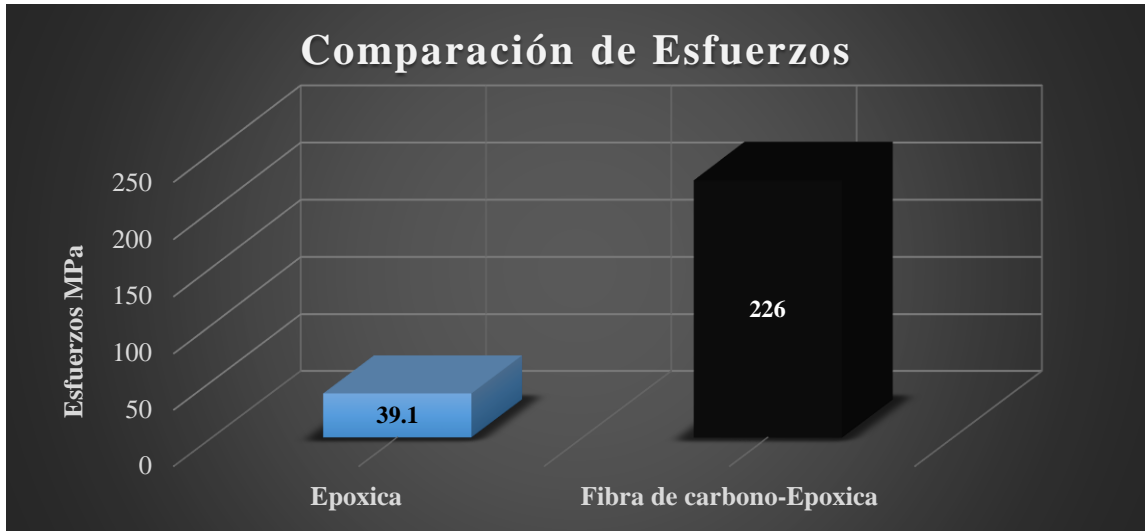
4.4.2.1 Laminado de fibra de carbón-matriz epóxica y resina epóxica

La comparación del laminado de material compuesto de fibra de carbono y matriz epoxica con respecto a la resina epoxica expone el porcentaje de mejora de las propiedades mecánicas. De tal manera que la presencia de la fibra de carbono en la matriz epoxica aumenta significativamente el material, obteniendo así un 82.3% en comparación de esfuerzos, donde evidentemente el material compuesto es el más fuerte, tal como se exhibe en la tabla 4.14. Dado que el porcentaje de deformación disminuye en el material compuesto se comprueba que la fibra de carbono es utilizada como el refuerzo del material, disminuyendo la deformación un 33.52% en comparación de las probetas tipo I D638. Además del esfuerzo y la elongación, el módulo de elasticidad se incrementa en el material compuesto un 88.64%. En este sentido se comprende que la presencia de la fibra carbono 3K y su configuración de laminado aumentan significativamente las propiedades de la matriz epoxica.

Tabla 4.14. Comparación de propiedades mecánicas de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica con respecto a matriz epóxica.

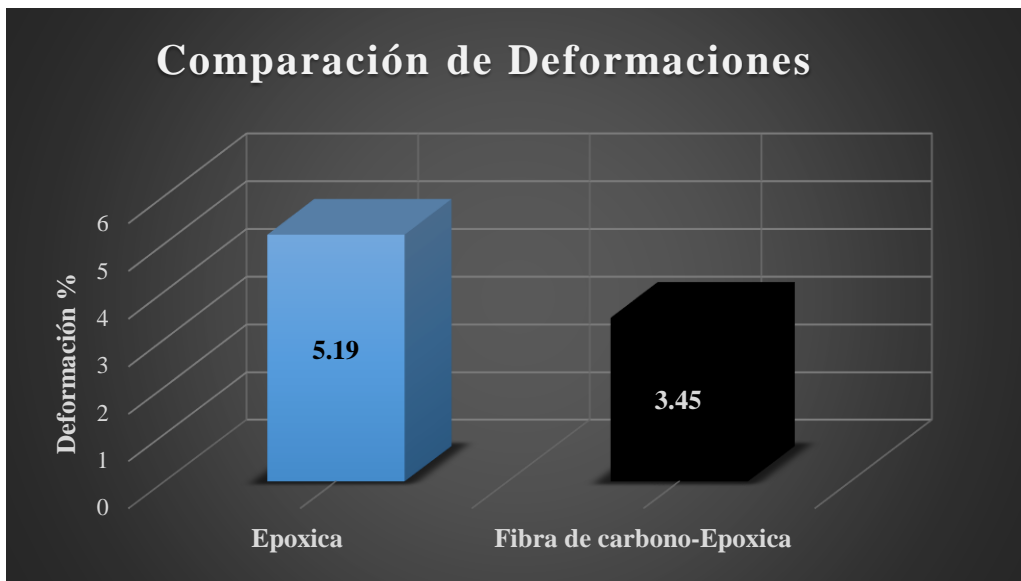
Propiedades mecánicas	Materiales		% Diferencia
	Resina Epóxica	Fibra de Carbono-Epóxica	
Esfuerzo [Mpa]	39.1	226	82.7
Elongación	5.19E-02	3.45E-02	34.48
Deformación [%]	5.19	3.45	33.52
Módulo Elástico [Gpa]	.753	6.63	88.64

Al comparar los esfuerzos del material compuesto de fibra de carbono y matriz epoxica con respecto al de la resina epoxica, se obtuvo una diferencia de 186.9 MPa. Tal como se muestra en la gráfica 4.12, el material compuesto presenta superioridad en análisis.



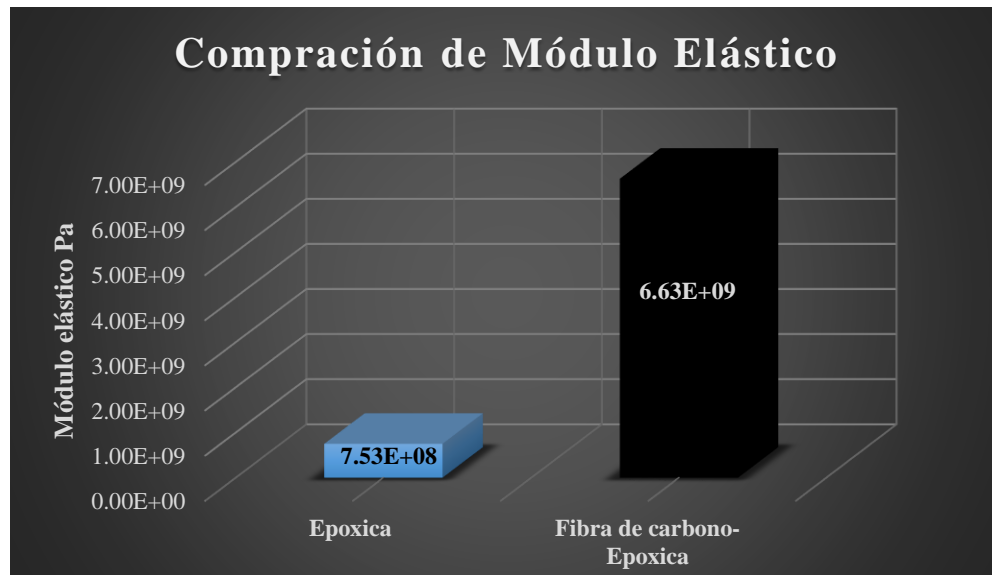
Gráfica 4.8: Comparación del esfuerzo de laminado de fibra de carbono con resina epóxica y esfuerzo de matriz epóxica.

Las deformaciones evaluadas del laminado y de la resina epóxica, registran una diferencia de 1.74% de deformación. De acuerdo a la gráfica 4.13 se expone claramente la inferioridad del material compuesto, lo cual se relaciona con el refuerzo de fibra y la configuración de laminado incorporada al a resina epóxica. En todo caso es preferible obtener una deformación menor en el material para la aplicación de una prótesis transtibial o para otras aplicaciones industriales.



Gráfica 4.9: Comparación del porcentaje de deformación de laminado de fibra de carbono con resina epóxica y porcentaje deformación de matriz.

De igual modo los módulos de elasticidad promedios son evaluados, obteniendo una diferencia de 5.88 GPa en favor al material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica (ver grafica 4.14). En este sentido se comprende la teoría de los materiales compuesto, en donde se comprueba que el refuerzo reside en la fibra de carbono.



Gráfica 4.10: Comparación del módulo de elasticidad de laminado de fibra de carbono con resina epóxica y módulo de elasticidad de matriz epóxica.

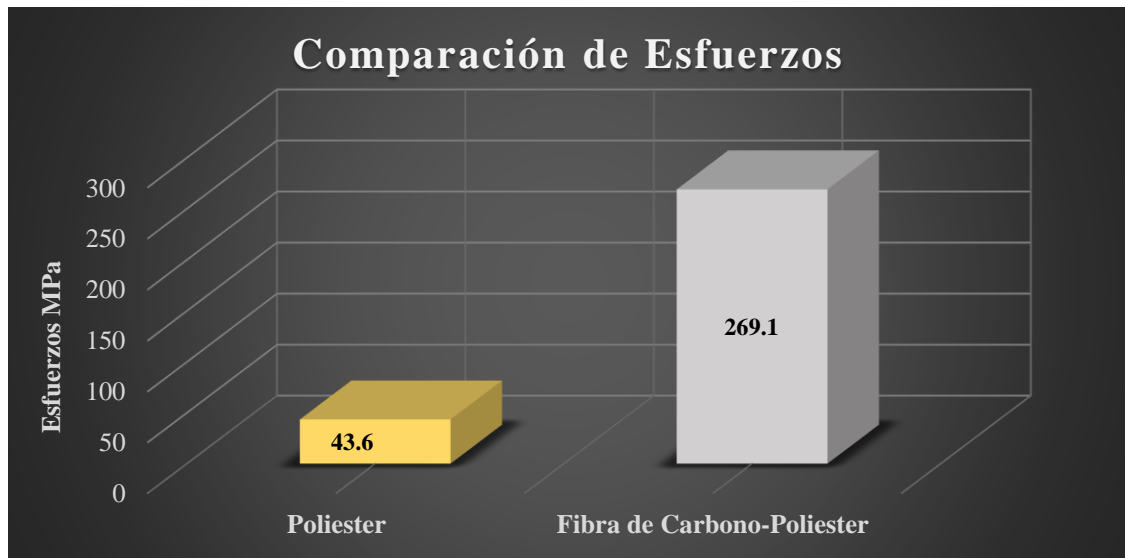
4.4.2.2 Laminado de fibra de carbón-matriz poliéster y resina poliéster

De igual manera en que se realizó la comparación de resultados en el apartado 4.4.2.1, también se muestra el análisis del laminado de material compuesto por fibra de carbono y matriz poliéster con respecto a la resina poliéster. En la tabla 4.15 se identifican las propiedades mecánicas, en donde el esfuerzo del laminado del material compuesto registra un 83.8% de superioridad en comparación al refuerzo de la matriz poliéster. Este dato identifica la incorporación de la fibra de carbono en el material, así como su configuración de laminado. Por otra parte, el porcentaje de deformación de la resina poliéster es mayor 18.43% con respecto al material compuesto, en efecto se relaciona a que la fibra de carbono funciona como el refuerzo que distribuye las cargas internas del material evitando de tal manera una elongación mayor. Con respecto a módulo de elasticidad, el material compuesto presenta un incremento del 86.5% en comparación al módulo elástico de la resina poliéster del muestreo de las probetas tipo I. Este incremento favorable se debe a las propiedades mecánicas de la fibra de carbono y a la configuración de laminado cuasi-isotrópico.

Tabla 4.15. Comparación de propiedades de mecánicas de material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster con respecto a matriz poliéster.

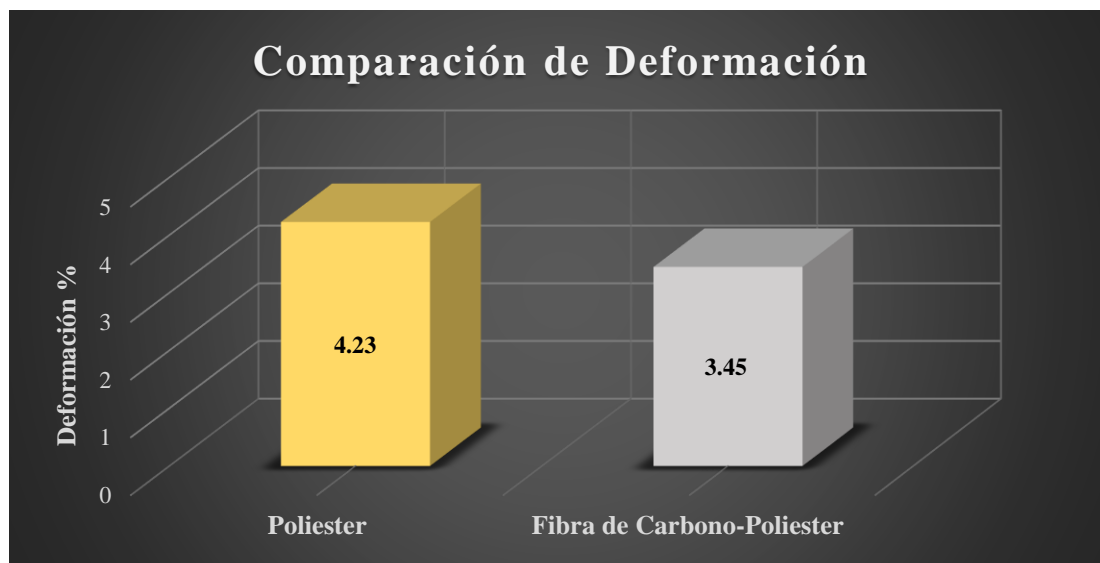
Propiedades mecánicas	Materiales		% Diferencia
	Resina Poliéster	Fibra de Carbono-Poliéster	
Esfuerzo [Mpa]	43.6	269.1	83.8
Elongación	4.23E-02	3.45E-02	18.43
Deformación [%]	4.23	3.45	18.43
Módulo Elástico [Gpa]	1.06	7.85	86.5

A continuación, en la gráfica 4.15, se presentan los esfuerzos promediados de cada material analizado. Los esfuerzos presentan una diferencia de 225.5 MPa, donde claramente el material compuesto de fibra de carbono y resina poliéster presenta esta superioridad. Por lo tanto, es notable la implicación del refuerzo de fibra de carbono en la comparación de resultados de esfuerzos máximos soportados.



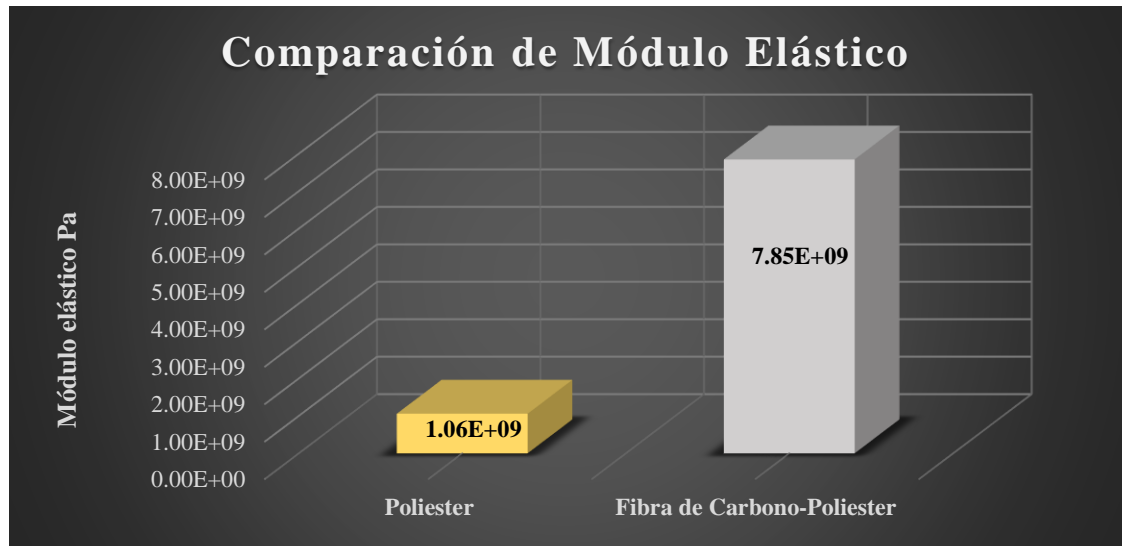
Gráfica 4.11: Comparación del esfuerzo de laminado de fibra de carbono con resina poliéster y esfuerzo de matriz poliéster.

Otra propiedad mecánica importante se exhibe en la gráfica 4.16, en donde se presentan el porcentaje de deformación de ambos materiales analizados. Como se puede observar la resina poliéster esta un 0.78% por encima del material compuestos. De tal manera que la configuración de fibra de carbono utilizada en el material compuesto disminuye la elongación del material.



Gráfica 4.12: Comparación del porcentaje de deformación de laminado de fibra de carbono con resina poliéster y porcentaje de deformación de matriz poliéster.

Así mismo se presenta la comparación del módulo elástico de ambos materiales analizados. En la gráfica 4.17 el material compuesto por fibra carbono y resina poliéster muestra una superioridad de 6.79 GPa en comparación a la resina poliéster. Este incremento significativo del módulo elástico se debe a la implementación del refuerzo en fibra, así como su configuración de laminado cuasi-isotrópico.



Grafica 4.13: Comparación del módulo de elasticidad de laminado de fibra de carbono con resina poliéster y módulo de elasticidad de matriz poliéster.

4.4.3 Materiales Compuestos

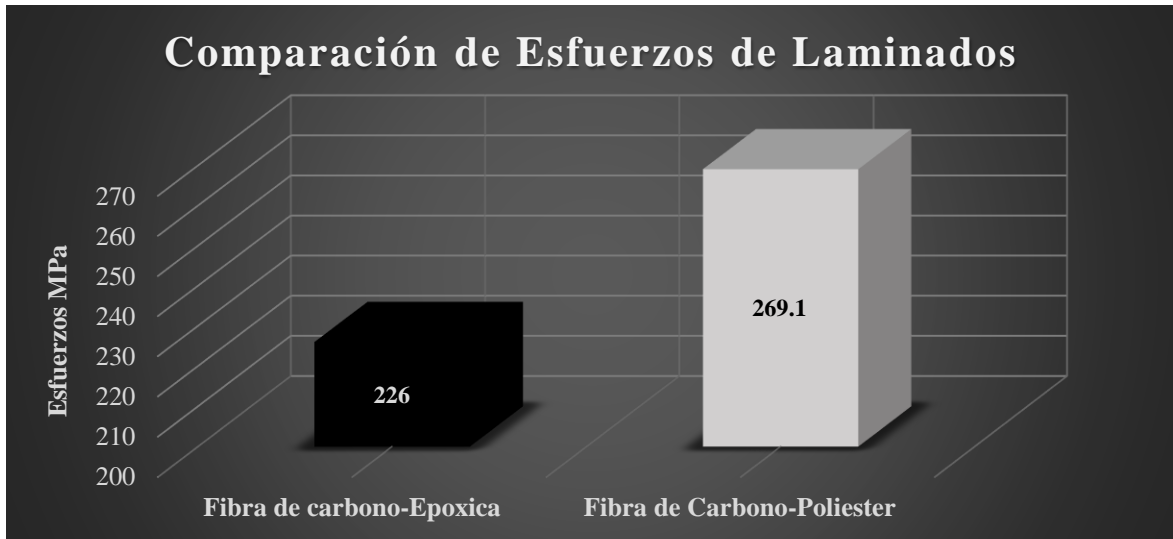
Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos analizados se muestran en tabla 4.16. Ambos laminados cuentan con el mismo refuerzo de fibra de carbono y misma configuración de lamiando. Al comparar los resultados de ambos materiales, los esfuerzos soportados por el laminado de fibra de carbono y resina poliéster están un 16% por encima del laminado de fibra de carbono y resina epoxica. Por otra parte, el porcentaje de deformación es el mismo para ambos laminados, esto se debe a la configuración empleada y al refuerzo de fibra de carbono, la cual permite distribuir las cargas uniformemente a través de los filamentos de la fibra de carbono. En este análisis las fracturas ocasionadas en los especímenes se dieron en puntos similares dentro de la zona calibrada y a un ángulo de 45°, por la configuración de laminado empleado en ambos materiales [0/±45] s. El esfuerzo máximo soportado en los materiales compuestos no da lugar a una fractura abrupta y a una separación completa de las muestras. Vinculando los conceptos anteriores, el módulo de elasticidad también es favorable para el material compuesto de fibra de carbono y resina poliéster, presentando un 15.54% superior con el laminado de fibra de carbono y resina epoxica.

A pesar que teóricamente la resina epoxica cuenta con mejores propiedades mecánicas en comparación a resina poliéster, en esta investigación se contradice.

Tabla 4.16. Comparación de propiedades de mecánicas laminados de material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica con respecto a fibra de carbono y resina poliéster.

Propiedades mecánicas	Laminados		% Diferencia
	Fibra de Carbono-Epóxica	Fibra de Carbono-Poliéster	
Esfuerzo [Mpa]	226	269.1	16
Elongación	3.45E-02	3.45E-02	0
Deformación [%]	3.45	3.45	0
Módulo Elástico [Gpa]	6.63	7.85	15.54

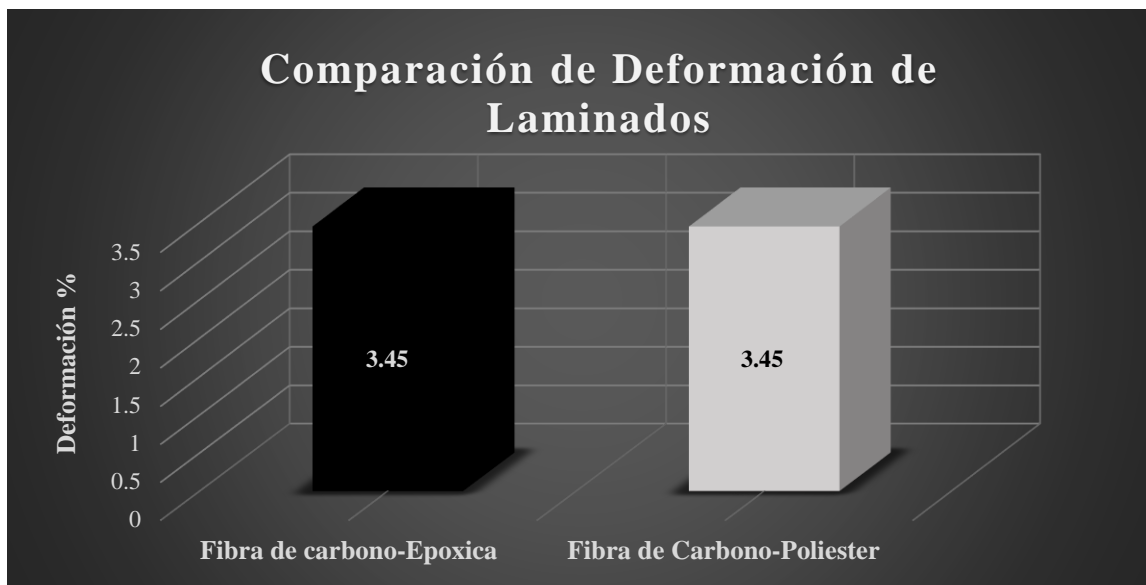
De acuerdo a la gráfica 4.18, en donde se muestra la comparación de esfuerzos de cada laminado de material compuesto, resulta evidente la superioridad del material compuesto por fibra de carbono y resina epóxica, asimismo el laminado de fibra de carbono y resina epóxica presenta una diferencia de 43.1 MPa. A pesar que ambos materiales cuentan con la misma configuración de refuerzo, la matriz juega un papel importante en esta propiedad mecánica.



Gráfica 4.14: Comparación del esfuerzo de laminados de fibra de carbono con resina epóxica y fibra de carbono y resina poliéster.

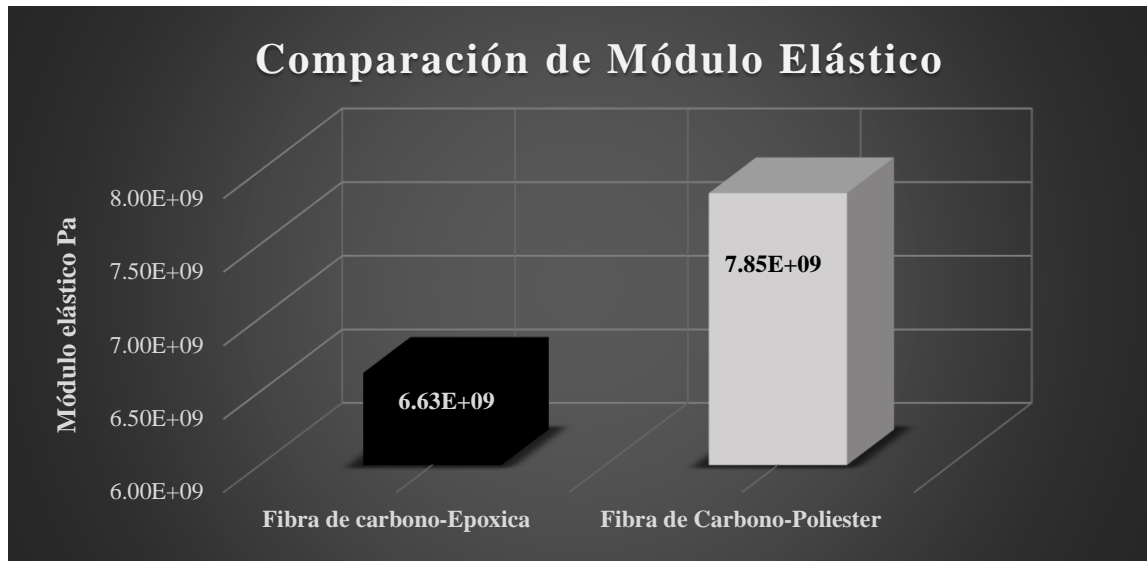
Ahora bien, ya como se mencionó al principio de este apartado, ambos materiales cuentan el mismo refuerzo de fibra de carbono 3k y la misma configuración de laminado [0/±45]s; los especímenes presentaron el mismo efecto de ruptura a un ángulo de 45°, por ello

en la gráfica 4.19 se exhibe el mismo porcentaje de deformación de ambos materiales compuestos. En efecto a lo mencionado, el resultado de esta propiedad mecánica se le atribuye a la presencia y configuración utilizada de fibra de carbono, ya que sin duda este material es que soporta las cargas aplicadas durante los ensayos de tracción,



Gráfica 4.15: Comparación del porcentaje de deformación de laminados de fibra de carbono con resina epóxica y de fibra de carbono con resina poliéster.

Unas de las propiedades mecánicas importante es la del módulo de elasticidad o módulos de Young, en la gráfica 4.20 se presentan los módulos de elasticidad de los materiales compuestos con una diferencia de 1.22 GPa entre ellos. Tal como se observa, es evidente la superioridad del material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster. Respecto a estos resultados, se puede decir que por la configuración de laminado cuasi-isotrópico, el módulo de elasticidad de ambos laminados se comportaría de la misma manera bajo esfuerzos de compresión. Ya que esta propiedad mecánica mejora o disminuye significativamente con el refuerzo empleado en un material compuesto, dependiendo si las configuraciones de laminados dan como resultado un material anisotrópico, ortotrópico o isotrópico.



Gráfica 4.16: Comparación de los módulos de elasticidad de laminados de fibra de carbono con resina epóxica y fibra de carbono con resina poliéster.

A pesar que teóricamente los laminados de resina epoxica presentan mejores propiedades mecánicas en comparación con laminados de resina poliéster, en este trabajo se comprueba lo contrario respecto a las matrices. Sin embargo, el comportamiento del refuerzo de fibra de carbono se destaca en los valores obtenidos de las pruebas. En otras palabras, la fibra de carbono es la que mejora las matrices poliméricas, creando materiales compuestos con propiedades aceptables para diferentes aplicaciones futuras en la industria.

CONCLUSIONES

El conocer las propiedades de los materiales compuestos a utilizar en una aplicación requerida es muy importante, en el caso de la implementación para prótesis de miembro inferior es necesario conocer las principales propiedades mecánicas referentes a esfuerzos, deformaciones del material y módulos de elasticidad. Puesto que, los materiales son sometidos a cargas de tensión y compresión, dependiendo el favorable diseño protésico de su aplicación,

Por otra parte, se sabe que los materiales utilizados en esta investigación son los más factibles en la utilización de laminados de materiales compuesto, dado que la fibra de carbono es uno de los refuerzos más empleados en la industria ortopédica por su fuerza, rigidez y excelente relación de resistencia-peso.

Al comprar primeramente cada una de las resinas termoestables sugeridas en la implementación del laminado, se logró conocer que la matriz de resina poliéster obtuvo mejores propiedades mecánicas en comparación con la resina epóxica, ya que se obtuvo un incremento en esfuerzos, pero una disminución en la deformación en el módulo de elasticidad. De tal manera que las pruebas aplicadas en las matrices poliméricas contradicen los datos teóricos que apoyan la selección de la resina epóxica. Es decir que a pesar que ambas pruebas se llevaron a cabo bajo los mismos estándares de manufactura, se plantean factores que influyen en este análisis:

- 1) Existe la probabilidad de que el proveedor de la resina epóxica no sea el adecuado de utilizar en comparación con otras marcas del mercado, debido a que la ficha técnica del material no coincide con los datos obtenidos.
- 2) Se presentaron defectos en la manufactura que no pudieron ser controlados.
- 3) La creación de microhuecos o concentradores de esfuerzos que se forman en las resinas termoplásticas, son el principal debilitador del material. Es decir, que la resina epóxica obtuvo mayor número de concentradores de esfuerzos durante su proceso de curado.

Ahora bien, los composites analizados se comportaron de manera similar, ya que en ambos se emplea el mismo refuerzo de fibra de carbón; de esta manera el porcentaje de diferencia entre cada uno de ellos se debe a la matriz utilizada. A pesar que en esta investigación la resina poliéster cuenta con un módulo de tracción más alto que el de la resina epóxica, los resultados

de los materiales compuestos no varían significativamente entre ellos, ya que la fibra de carbono es el material de refuerzo encargado de soportar cargas aplicadas debido a la orientación de laminado. Aunque el material compuesto por fibra de carbono y resina poliéster obtuvo un módulo de elasticidad mayor en comparación del laminado de fibra de carbono y resina epóxica, ambos laminados cuentan con el mismo porcentaje de deformación. Sin duda la configuración de laminado de fibra carbono es un factor importante en la deformación del material compuesto.

En síntesis ambas resinas pueden ser utilizadas para la aplicación del material compuesto en una prótesis transtibial, respecto a las necesidades del paciente.

Finalmente el laminado propuesto para esta investigación es factible, ya que al ser comparado con laminados [$\pm 45^\circ$] muestra un incremento en las propiedades mecánicas al incorporar láminas de 0° para crear un laminado simétrico balanceado. De manera que conocer la orientación de fibras y la aplicación apropiada de matrices incrementa la eficiencia de los materiales compuestos, lo cuales pueden lograr una infinidad de aplicaciones en la industria ortopédica.

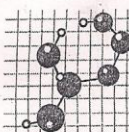
TRABAJOS FUTUROS

Conviene destacar, que con los resultados obtenidos, esta investigación termina aquí, ya que se planea continuar en análisis de materiales compuestos para la aplicación ortopédica. A continuación se enlista los principales trabajos a futuro que se planean continúan en un postgrado:

- ✓ Realizar pruebas con otro proveedor de resina epóxica.
- ✓ Realizar pruebas de compresión.
- ✓ Realizar pruebas fatiga.
- ✓ Utilizar análisis del elemento finito para la simulación de esfuerzos en distintos tipos de prueba.
- ✓ Manufacturar un laminado simétrico balanceado, incorporando láminas de 90° [0° , 90° , $\pm 45^\circ$]_s para comparar con el laminado del presente estudio.
- ✓ Implementar el laminado en la manufactura de un primer prototipo para analizar el comportamiento del laminado en dicha pieza.

ANEXOS

Anexo 1- Ficha técnica de proveedor de resina epóxica



F. Parrilla y Cía., S.A. de C.V.

AV. DE LAS GRANJAS 103-A. COL. JARDIN AZPEITIA MEXICO, D.F. 02530 TELS: 5341- 0285 5341-0138 FAX: 5341-0078

RESINAS POLIESTER
Y EPOXI

FIBRA DE VIDRIO

ACELERADORES

CATALIZADORES

GEL COATS

DESMOLDANTES

ADHESIVOS

DISPERSIONES

CARGAS

HULES DE SILICON

ASESORIA TECNICA

CAPACITACION

RESINA EPOXICA PARA FIBRA DE VIDRIO

RESINA EPOOXICA LIQUIDA, NO MODIFICADA DE VISCOSIDAD MEDIA

APLICACIONES:

RECUBRIMIENTOS Y ENCAPSULADOS EN GENERAL, EN EL AREA DE CONSTRUCCION SE USA COMO BASE PARA PISOS EN DIVERSOS COLORES, LAMINADOS, ADHESIVOS, EMBOBINADOS DE FILAMENTO.

CARACTERISTICAS:

- EXCELENTES PROPIEDADES MECANICAS Y ELECTRICAS
- BUENA RESISTENCIA QUIMICA.
- CURA CON UNA GRAN VARIEDAD DE ENDURECEDORES.
- COMPATIBLE CON DIVERSOS TIPOS DE CARGAS, DILUYENTES Y ACELERADORES.
- PRESENTA UNA ADHESION EXTRAORDINARIA.
- VISCOSIDAD BAJA Y POR LO TANTO FACIL MANEJO.

PROPIEDADES:

PROPIEDADES	ESPECIFICACIONES	UNIDADES
APARIENCIA	LIQUIDO DE VISCOSIDAD BAJA TRANSPARENTE	
VISCOSIDAD BROOKFIELD	7,500 - 9,500	CPS @ 25°C
COLOR	1 MAX	GARDNER - HELDIGE
DENSIDAD	1.10 - 1.20	g/cm ³
EQUIVALENTE EPOXICO EN PESO	182 - 196	g/eq.
PUNTO DE INFLAMACION	199	C
TIEMPO DE VIDA **	1	AÑO
** @ 25°C TAMBOR CERRADO Y LUGAR SECO		

1/1

MAS DE 40 AÑOS DE EXPERIENCIA A SU SERVICIO
"CONSULTENOS"

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Stupenengo, F. (2011). *Materiales y materias primas* (Vol. Capitulo 10). Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Educación y Tecnología. Recuperado el Septiembre de 2015, de <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>
- [2]. Fernandez, A. L. (Noviembre de 2006). Comportamiento ante impacto de materiales compuestos de carbono e híbridos carbono/vidrio. *Universidad Politecnica de madrid*, 6. Recuperado el Septiembre de 2015
- [3]. Castillo, S. K. (2007). Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto. 13,15,16,17. Recuperado el Septiembre de 2015.
- [4]. Askeland, D. R., & Phulè, P. P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales* (4 ed.). Mexico: Thomson.
- [5]. Smith, W. F. (1998). *Fundamentos de la ciencia e Ingeniería de Materiales*. Madrid: McGraw-Hill.
- [6]. Toscano, O. (s.f.). Materiales mas utilizados en ortesis y prótesis. Obtenido de <https://es.slideshare.net/osvaldoeltoch/materiales-mas-utilizados-en-ortesis-y-protesis>
- [7]. UNAM. (s.f.). Reseñas Historicas de Prótesis. 1. Obtenido de <http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/art01-1a.htm>
- [8]. Duffo, G. (2011). *Materiales y Materias primas Biomateriales*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- [9]. William D. Callister, J. (2007). *Materials Science and Engineering, an Introcution*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [10]. Barriga, L. D. (2014). *Estudio de polimeros híbridos estratificados de matriz epóxica reforzada con tejido mixto elaborado con fibras de carbono y kevlar y su incidencia en las propiedades mecánicas de partes externas de autos*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- [11]. Universitarios, A. s. (2016). *Resinas Epoxi*. Obtenido de Allstudies.com Estudios, Grados, Universidades: <http://allstudies.com/resinas-epoxi.html>
- [12]. BRICOBLOG. (23 de Octubre de 2013). Obtenido de Bricoblog: <https://www.bricoblog.eu/todo-sobre-las-resinas-epoxi-o-poliepoxido/>
- [13]. EcuRed conocimiento de todos y para todos. (s.f.). *Resina Epoxidica*. Recuperado el 2016, de EcuRed conocimiento de todos y para todos: http://www.ecured.cu/Resina_Epox%C3%ADdica

- [14]. *Productos*. (s.f.). Recuperado el 2016, de Direct Industry:
<http://www.directindustry.es/prod/sika-deutschland/product-50583-454957.html>
- [15]. Gil, A. (30 de 03 de 2012). *Resina De Poliéster*. Obtenido de
<http://www.eafit.edu.co/servicios/centrodelaboratorios/infraestructura/laboratorios/Documents/Guia%20de%20manejo%20de%20resinas.pdf>
- [16]. *Pinturas Alavana*. (s.f.). Obtenido de <http://pinturasalvana.es/resinas-y-diluyentes/220-resina-de-poliéster-catalizador-peroxido.html>
- [17]. Bnedezu Reyes, J. H. (s.f.). *Introducción a las resinas poliéster y afines*. Obtenido de
http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/bendezu_r_j/cap2.pdf
- [18]. (s.f.). Obtenido de Resina de poliéster y fibra de vidrio:
http://usuaris.tinet.cat/jaranda/Poliéster_archivos/Page396.htm
- [19]. *Fibra de carbono*. (2015). Obtenido de Carbosystem: www.carbosystem.com
- [20]. Mariano, Tecnología de los plásticos. (18 de Noviembre de 2011). *Fibra de carbono*. Obtenido de Tecnología de los plásticos:
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/11/fibra-de-carbono.html>
- [21]. Advameg, I. (2015). *Carbon Fiber*. Obtenido de How Products are Made:
www.madehow.com
- [22]. Duffo, G. (2011). *Materiales y Materias primas Biomateriales*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- [23]. Torres, A. (s.f.). Evaluación de Materiales Compuestos para Prótesis y Otesis de Miembro Inferior. *IFMBE Proceedings Vol.33*.
- [24]. Dale A. Berry, C. (1987). Composite Materials for Orthotics and Prosthetics. *The American Orthotic and Prosthetic Association* , 35-43.
- [25]. Jose Antonio Garci Merino, C. E. (2012). *Diseño de una prótesis transtibial amortiguada*. Mexico D.F: IPN. Obtenido de
<http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/11823/1/15.pdf>
- [26]. Sanchez, A. N. (2004). *Prótesis Transtibial*.
- [27]. Norton, K. (2017). Un breve recorrido por la historia de la protesica. *InMotion*.
- [28]. Añó, P. S. (s.f.). *Protesis*. Universidad de Valencia, Módulo Ortoprotésica. Obtenido de <http://www.uv.es/mpisea/5f54656d615f365f5072c3b37465736973.pdf>
- [29]. Antonio Roriguez Valadez. (2013). *Protesis Monterrey*. Obtenido de <http://protesismonterrey.com/>
- [30]. Median, U. R. (2006). *Diseño y construcción de una prótesis ortopedica modula para amputado transtibial*. Sartajena: Universidad Simon Bolivar.

- [31]. Barbero, E. J. (2011). *Intriduction to Composite Materials Design*. Nueva York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [32]. Naval Composites. (29 de Marzo de 2016). *Naval Composites*. Obtenido de <http://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos/>
- [33]. Diez, S. G. (2011). Fibras y Materiales de reuferzo: Los polièsteres reforzados aplicados a la realización de piezas en 3D. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 277,278,279,180.
- [34]. Hernández, M. S. (2013). *Análisis comparativo de una seccion estructural del fuselaje de una aeronave entre material compuesto ortogonal simétrico balanceado y aluminio Nomalizado 6061 T6*. UABC. Mexicali: UABC Área de posgrado.
- [35]. Obtencion de los parámetros generales para una sola capa de material compuesto sometida a tensión. (s.f.). Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/viladoms_w_jj/capítulo2.pdf
- [36]. Linkedl Corporation. (11 de Diciembre de 2012). Recuperado el 2016, de SlideShare: <http://es.slideshare.net/DAVIDLUZURIAGA/exposicion-cap6>.
- [37]. Martínez, S. P. (s.f.). Materiales compuestos. Obtenido de http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/MATERIALES/materialescompuestos.pdf
- [38]. Ing. Cristian Bottero, I. G. (s.f.). *Estructura de materiales compuesto, Procesos de fabricacion*. Facultad de ingeniería U.N.L.P, Departamento de aeronáutica.
- [39]. Escuela Superior de Ingenieros. (s.f.). *Fabriacion Materiales compuestos*. Escuela superior de ingenieros , San sebastian. Obtenido de <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Matcomp/Transparencias/Cap11.pdf>
- [40]. MAROSO. (s.f.). *Nautic Expo* . Obtenido de <http://www.nauticexpo.es/prod/maroso/product-39316-294880.htm>
- [41]. *bashy.net* . (s.f.). Obtenido de Algunos métodos de fabricación de productos de materiales compuestos: <http://bashny.net/t/es/295145?page=2>
- [42]. Manufactura de plásticos reforzados S.L. (s.f.). *El proceso de pultrusión y características de los perfiles PRFV*. Barcelona. Obtenido de http://www.mplr.net/wp-content/uploads/2012/03/MP_Caracteri%CC%81ticas-PRFV-perfiles1.pd
- [43]. Dale A. Berry, C. (1987). *Composite Materials for Orthotics and Prosthetics. The American Orthotic and Prosthetic Association* , 35-43

- [44]. C. Carrollo, A. G. (s.f.). Diseño y Fabricación de una prótesis de pie de respuesta dinámica de fibra de carbono. *IFMBRE Proceedings*.
- [45]. Sam L. Philips, W. C. (2015). Material Properties of selected Prosthetics Laminates. *JPO*, 27.
- [46]. Scholz, M.-S. (2011). The use of composite material in modern orthopedic medicine and prosthetic devices: a review. *Composites Science and technology*, 1791-1803.
- [47]. *Sobre el carbono*. (s.f.). Obtenido de Schmolke Carbon, custom lightweight products: http://www.schmolke-carbon.com/carbon/carbon_es/mater.php#5
- [48]. Fibre Glast Developments Corporation. (2010). *Product Data Sheet 3k, Plain Weave Carbon Fiber*. Brookville, Ohio. Obtenido de Product Data Sheet 3k, Plain weave carbon : <https://s3.amazonaws.com/cdn.fibreglast.com/downloads/00095-C.pdf>
- [49]. F.Parrilla. (s.f.). *F. Parrilla y Compañía S.A. de C.V.* Obtenido de <http://www.fparrilla.com.mx>
- [50]. REICHHOLD. (2010). *Polylite 33004-00 Resina Poliéster Tereftalica Modificada*. Mexico. Obtenido de <http://www.plastiformas.com.mx/pdf/resinas/Resina%20Polylite%2033004.pdf>
- [51]. ASTM. (s.f.). D3039/D 3039M-00 Standart Test Method for Tensile Propetiesof Polymer Matrix Composite Materials
- [52]. International, A. (s.f.). D 638-03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- [53]. Barriga, L. D. (2014). *Estudio de Polímeros Híbridos Estratificados de Matriz epóxica reforzada con tejido mixto elaborado con fibras de carbono y kevlar y si incidencia en las propiedades mecanicas de partes externas de autos*. Ambato Ecuador: Universidad tecnica de ambato.
- [54]. M. Siqueiros Hernandez, V.-N. M. (2015). Comparative Analysis in a straight section of an Orthogonal Symmetric Balanced Composite with Aluminium 6061 T6. *Journal of Applied Sciences*, 1223.
- [55]. SHIMADZU. (s.f.). *Modelos AG-IC Autograph*. Tokyo: SIMADZU COPORATION. International Marketing Division.
- [56]. Mecánica, F. (2014). Full Mecánica para todos los amantes de la tecnología mecánica . Obtenido de <http://www.fullmecanica.com/definiciones/r/1206-resistencia-a-la-fluencia>
- [57]. Wikipedia. (s.f.). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Fluencia#/media/File:Fluencia.jpg>