

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
ESCUELA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
ÁREA DE INGENIERÍA**

LICENCIATURA EN INGENIERÍA



**Determinación de los parámetros óptimos para manufactura de una
horquilla con aplicación potencial en monoplazas de F1.**

T E S I S

**que presenta para obtener el grado de LICENCIADO EN INGENIERÍA
AEROESPACIAL**

Ilse Paola Jáuregui Bogarin

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Miriam Siqueiros Hernández

Tijuana, B. C.

JUNIO DE 2018

Agradecimientos

En estas líneas quisiera plasmar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su apoyo colaboraron en la culminación de mi carrera profesional en la Universidad Autónoma de Baja California, la cual me brindó la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura. Este trabajo me ha permitido aprovechar la competencia y experiencia de muchas personas a las que me gustaría agradecer, en especial a la Dra. Miriam Siqueiros Hernández, directora de ésta investigación, por la orientación, seguimiento y supervisión de la misma por la ayuda recibida a lo largo de estos años.

Quisiera hacer una extensión de mi gratitud al Maestro Benjamín González Vizcarra por su colaboración en el uso de maquinaria para las pruebas, asesoría y supervisión que me ayudaron a concluir este trabajo.

Todo esto no hubiera sido posible sin el amparo incondicional que me otorgaron y el cariño que me ofrecieron mis padres Yolanda y Ernesto y hermano que estuvieron conmigo a lo largo de mi carrera universitaria alentándome a dar lo mejor de mí, a mi tía Olga Jáuregui que me apoyó y orientó todos estos años para convertirme en la persona que soy. Se merece un reconocimiento especial

A todos ellos, muestro mi más profundo respeto y agradecimiento.

Dedico ésta tesis:

*A mi **madre**, quien sin su amor, apoyo y esfuerzo esto no hubiera sido posible.*

RESUMEN

La siguiente tesis desarrolla la propuesta de un método de manufactura para el área de materiales compuestos, específicamente fibra de carbono como material estructural para su aplicación mecánica como horquilla en un monoplaza de Formula 1.

Actualmente resulta bastante costoso el manufacturar piezas de fibra de carbono y resinas por lo que se propuso un método de manufactura utilizando fibra de carbono bidireccional 3K y resina epóxica utilizando la técnica de aplicación manual de 6 capas con orientación de $[0,90]$, ya que una de las metas que tiene ésta investigación es proponer un método de manufactura funcional que sea simple y de bajo costo comparado a los procesos y precios que se emplean en el mundo de la Formula 1 para promover el uso de los materiales compuestos se deben hacer pruebas para descubrir si los resultados arrojados son favorables o no para determinar los parámetros de manufactura óptima.

Una vez que se definió el método de manufactura utilizando el mismo material antes mencionado y basándose en la norma D7264 se crearon las probetas para realizar pruebas de flexión en ellas con una máquina de pruebas universales Shimadzu dentro de los talleres de la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Baja California, donde una vez concluidas las pruebas se obtuvieron los resultados de esfuerzo máximo en cada probeta, con lo que se creó una comparación de los diferentes comportamientos del material y se obtuvo un promedio que se comparó con un resultado real de esfuerzo máximo de una horquilla de un monoplaza de Formula 1 donde determinamos que la manufactura propuesta fue exitosa en unas áreas y se decidió realizar mejoras en otras.

ABSTRACT

The following thesis develops the proposal of a manufacturing method for the area of composite materials, specifically carbon fiber as a structural material for mechanical application as a wishbone in a Formula 1 car.

Nowadays it is quite expensive to manufacture pieces of carbon fiber and resins, so a manufacturing method was proposed using bidirectional carbon fiber 3K and epoxy resin using the 6-layer manual application technique with orientation [0.90]. One of the goals of this research is to propose a functional manufacturing method that is simple and low cost compared to the processes and prices used in the world of Formula 1 to promote the use of composite materials should be made tests to discover if the results are favorable or not to determine the optimal manufacturing parameters.

Once the manufacturing method was defined using the same material mentioned above and based on the ASTM D7264 standard, the test pieces were created to perform flexural tests on them with a Shimadzu universal testing machine inside the workshops of the School of Science of the Engineering and Technology of the Autonomous University of Baja California, where once the tests were completed the results of maximum effort in each test piece were obtained, which created a comparison of the different behaviors of the material and an average was obtained that was compared with a real result of maximum effort of a fork of a single-seat Formula 1 where we determined that the proposed manufacture was successful in some areas and decided to make improvements in others.

ÍNDICE DEL CONTENIDO.

ABREVIACIONES	XIV
SIMBOLOGÍA.....	XIV
OBJETIVO.....	XV
METAS.....	XV
JUSTIFICACIÓN.....	XVI
INTRODUCCIÓN	XVI
CAPÍTULO I ESTADO DEL ARTE.....	2
1.1 MATERIALES	3
1.2 MATERIAL COMPUESTO	3
1.2.1 Laminado	6
1.2.2 Fibra de Carbono	10
<i>1.2.2.1 Procesos de fabricación y composición química de la fibra de carbono. ..</i>	<i>10</i>
<i>1.2.2.2 Características y propiedades de las fibras de carbono.</i>	<i>12</i>
<i>1.2.2.3 Clasificación de la Fibra de carbono.</i>	<i>15</i>
<i>1.2.2.4 Orientación de la fibra.....</i>	<i>16</i>
1.2.3 Matriz.....	18
<i>1.2.3.1 Clasificación de la matriz.</i>	<i>18</i>
<i>1.2.3.2 Características y propiedades de las resinas</i>	<i>19</i>
<i>1.2.3.3 Resina Epóxica.....</i>	<i>20</i>
1.2.4 Gel Coat.....	22
1.3 PROCESOS DE MANUFACTURA DE MATERIALES COMPUESTOS.	22
1.3.1 Tipos de moldes.	23
<i>1.3.1.1 Molde Abierto.....</i>	<i>23</i>
<i>1.3.1.2 Molde Cerrado.</i>	<i>23</i>
1.3.2 Procesos de aplicación de resina.....	24
<i>1.3.2.1 Aplicado manual.....</i>	<i>24</i>
<i>1.3.2.2 Aplicado por aspersion.....</i>	<i>26</i>
1.4 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS COMPUESTOS.	27
CAPÍTULO II ANTECEDENTES HISTÓRICOS	29

2.1 NATURALEZA DE LOS MATERIALES	30
2.1.1 Materiales estructurales	30
2.1.2 Inicio de los materiales compuestos	31
2.2 FEDERACIÓN INTERNACIONAL DEL AUTOMÓVIL.....	33
2.3 CARRERAS DE FORMULA 1.	34
2.3.1 Aplicación de la Fibra de carbono en la Formula 1.....	35
CAPÍTULO III METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN.....	37
3.1 Etapas para el desarrollo de la investigación.....	38
3.1.1 ETAPA I: Revisión bibliográfica.....	42
3.1.2 ETAPA II: Caracterización de materia prima.	42
<i>3.1.2.1 Materiales utilizados.</i>	<i>42</i>
<i>3.1.2.2 Laminado.</i>	<i>46</i>
<i>3.1.2.3 Normativas utilizadas.</i>	<i>48</i>
3.1.2.3.1 ISO (Organización Internacional de Normalización).....	48
3.1.2.3.2 ASTM (Sociedad Americana de Pruebas en Materiales).....	49
<i>3.1.2.4 Modos de falla.</i>	<i>51</i>
<i>3.1.2.5 Pruebas de flexión</i>	<i>52</i>
3.1.3 ETAPA III: Fabricación de la horquilla.....	58
CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	80
4.1 ETAPA IV: Análisis y resultados.	81
4.1.1 Curva de Esfuerzo-Deformación.	81
4.1.2 Modos de falla.	83
4.2 CONCLUSIONES	89
4.3 TRABAJOS FUTUROS	91
4.4 BIBLIOGRAFÍA	92

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1. Fibra, matriz y material compuesto. (<i>Carmas Composites. 2007</i>).....	4
Figura 1.2. Ejemplo de a) lámina y b) laminado de material compuesto. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>).....	6
Figura 1.3. Comparación de las propiedades de tensión en fibra, matriz y compuesto. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>).	7
Figura 1.4. Acomodo de las capas de fibra en diferente dirección. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>). 7	
Figura 1.5. Microestructura de fibras de carbono PAN. (<i>Xiaosong Huang, 2009</i>).	11
Figura 1.6. Horno autoclave utilizado para curado de resina. (<i>carbon concrete. 2008</i>).	11
Figura 1.7. Relación entre la resistencia a la tensión y el diámetro para una fibra de carbono. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>).	15
Figura 1.8. Estructura y dirección de cristales de grafito. (<i>Dr. Domingo Escudero López. 2001</i>).....	16
Figura 1.9. Tipos de refuerzos en fibras. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>).....	17
Figura 1.10. Orientación de las fibras en materiales compuestos: a) fibras unidireccionales, b) fibras tejidas, c) fibras discontinuas. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>).	17
Figura 1.11. Tipos de fibras poliméricas. (<i>Robert Jones, 1999</i>).	19
Figura 1.12. Sección transversal de laminado epóxico/carbono. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>). ..	21
Figura 1.13. Clasificación de los procesos de manufactura para compuestos de FRP. (<i>Mikell P. Groover, 2007</i>).	22
Figura 1.14. Tipos de molde abierto: a) positivo y b) negativo. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>).	23
Figura 1.15. Procedimiento de aplicación manual: 1) se limpia el molde y agrega antiadherente, 2) recubrimiento delgado de gel coat, 3) se aplican capas sucesivas de fibra y resina, 4) se cura la pieza, 5) se retira del molde la pieza completamente curada. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>).	24
Figura 1.16. Esquemático del proceso de laminado manual. (<i>Suong V. Hoa, 2009</i>).	25
Figura 1.17. Método de aplicación por aspersión. (<i>Suong V. Hoa, 2009</i>).....	26
Figura 1.18. Comportamiento mecánico de diferentes materiales (<i>Robert M. Jones, 1999</i>).	28

Figura 2.1. Componentes del átomo. (<i>Carmen Herranz G., 2017</i>).....	30
Figura 2.2. Fragmentos de cartonaje encontrado en momia egipcia (<i>MBI Mar-Bal Incorporated, 2015</i>).....	31
Figura 2.3. Giuseppe Farina en la carrera inaugural de la FIA (<i>Federation Internationale de L'automobile, 2017</i>).....	33
Figura 2.4. Primera carrera de Formula 1, Silverstone. (<i>Federation Internationale de L'automobile, 2017</i>).....	35
Figura 2.5. Suspensión de Formula 1 de material compuesto. (<i>Brad Spurgeon. 2017</i>).....	36
Figura 3.1. Diagrama de flujo de etapas para el desarrollo de la caracterización de la manufactura propuesta.....	41
Figura 3.2. Resina epóxica y endurecedor ProGlass.	45
Figura 3.3. Fibra de carbono 3K utilizada para la fabricación de la horquilla.	45
Figura 3.4. Corte de fibra de carbono para la manufactura de probetas.....	46
Figura 3.5. Laminado envuelto en bolsa de vacío.	47
Figura 3.6. Vista posterior del laminado final.	47
Figura 3.7. (a) Probetas dimensionadas, (b) probetas cortadas.	48
Figura 3.8. Códigos de identificación para pruebas de flexión.	51
Figura 3.9. Máquina de pruebas universales de precisión Shimadzu AG-IC 1000 kN. (<i>Shimadzu, 2018</i>).....	52
Figura 3.10. Software Trapezium utilizado en la máquina de pruebas universales para las pruebas de flexión (<i>Shimadzu, 2018</i>).....	53
Figura 3.11. Probetas para pruebas de flexión.	54
Figura 3.12. Diagrama de los soportes en una prueba de flexión. (<i>ASTM D7264, 2007</i>)...	55
Figura 3.13. Probeta colocada para ensayo de flexión.	55
Figura 3.14. Ensayo de flexión en proceso.....	56
Figura 3.15. De laminación en probeta (a) zona de prueba (b) acercamiento a zona de de laminación.	56
Figura 3.16. Fractura en probeta.....	57
Figura 3.17. Probeta 6 posterior al ensayo.	57
Figura 3.18. Modelo creado en SolidWorks.....	59

Figura 3.19. Pieza en 3D con fibra de carbono.	59
Figura 3.20. Plano de la horquilla.	59
Figura 3.21. Planos impresos para creación de modelo.	60
Figura 3.22. (a) Recorte de planos y (b) perfiles de la horquilla.	60
Figura 3.23. Unión de plano y superficie de cartón para una mayor rigidez.	61
Figura 3.24. (a) Madera MDF de 1.27 cm, (b) medición del MDF.	61
Figura 3.25. Plantillas de la horquilla (a) sobre MDF, (b) recorte de MDF.	62
Figura 3.26. Horquilla recortada en MDF.	62
Figura 3.27. Trazo de perfiles en la horquilla.	63
Figura 3.28. Pieza de MDF en proceso de lijado.	63
Figura 3.29. a) Vista frontal, b) vista de los extremos del modelo posterior al proceso de lijado.	64
Figura 3.30. Modelo con pegamento.	64
Figura 3.31. Modelo con pintura acrílica en aerosol.	65
Figura 3.32. Modelo lijado.	65
Figura 3.33. Modelo (a) aplicación de cera (b) molde cubierto.	66
Figura 3.34. Relación de gel coat-secante a utilizar.	66
Figura 3.35. Aplicación de gel coat en modelo.	67
Figura 3.36. Preparación del modelo para el molde (a) aplicación de cinta adhesiva, (b) delineado con marcador.	67
Figura 3.37. Fibra de vidrio (a) recortada, (b) capas requeridas.	68
Figura 3.38. Resina poliéster y secante.	68
Figura 3.39. Mezcla de resina y secante.	69
Figura 3.40. Modelo de MDF, (a) colocación de fibra de vidrio, (b) aplicación de resina.	69
Figura 3.41. Molde de fibra de vidrio curado.	70
Figura 3.42. (a) Vista frontal posterior del modelo, (b) desmolde del modelo, (c) molde de la horquilla.	70
Figura 3.43. Molde lijado con superficie uniforme.	71
Figura 3.44. Delineado de bordes con marcador.	71
Figura 3.45. Remoción de material sobrante en el molde.	71

Figura 3.46. Resina epóxica utilizada.....	72
Figura 3.47. Prueba de resina epóxica con secante (a) al momento de la mezcla, (b) una vez finalizado el proceso de curado.....	72
Figura 3.48. Fibra de carbono 3K.....	73
Figura 3.49. Colocación de plástico sobre modelo.....	73
Figura 3.50. Plantilla para fibra marcada y sobre el molde.....	74
Figura 3.51. (a) Colocación de plantillas sobre fibra de carbono, (b) delineado de plantillas con cinta adhesiva.....	74
Figura 3.52. Mezcla de resina epóxica con secante (a) vaciado de secante sobre resina, (b) mezclado de ambas sustancias.....	75
Figura 3.53. Aplicación de resina epóxica sobre fibra de carbono (a) con brocha, (b) con rodillo.....	75
Figura 3.54. Modelo al finalizar la aplicación de fibra de carbono y resina epóxica.....	76
Figura 3.55. Molde con prensas en C.....	76
Figura 3.56. Pieza removida (a) vista frontal, (b) vista posterior.....	77
Figura 3.57. Proceso de lijado para eliminar exceso de resina en la pieza (a) manual, (b) con la ayuda de lijadora manual.....	78
Figura 3.58. Recorte de excedentes en la pieza.....	78
Figura 3.59. Prototipo de horquilla finalizado.....	79
Figura 4.1. (a) Vista posterior de probeta, (b) Vista frontal de probetas.....	84
Figura 4.2. Vista lateral de probetas fracturadas.....	85
Figura 4.3. Excedente de resina en el prototipo a causa del molde.....	88
Figura 4.4. Superficie del prototipo posterior al proceso de lijado.....	88

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1. Comparación de características de diferentes materiales (<i>Ronald Márquez</i>).	9
Tabla 1.2. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono (<i>Antonio Miravete. 2003</i>).	13
Tabla 1.3. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono 3K. (<i>Fibre glast. 2010</i>).	14
Tabla 1.4. Comparación de las propiedades comunes de los plásticos de fibra reforzada y aleaciones metálicas. (<i>F.C. Campbell. 2010</i>).	14
Tabla 1.5. Clasificación de la fibra de carbono dependiendo la temperatura de su tratamiento térmico. (<i>Dr. Domingo Escudero López. 2001</i>).	16
Tabla 1.6. Características mecánicas de diversas resinas. (<i>F.C. Campbel., 2010</i>).	20
Tabla 1.7. Propiedades mecánicas de las resinas utilizadas. (<i>Reichold, 2010</i>).	20
Tabla 1.8. Comparación de propiedades mecánicas de resina epóxica-poliéster (<i>Carmas Composites, 2007; Reichold, 2010</i>).	21
Tabla 3.1. Materiales utilizados.	42
Tabla 3.2. Herramientas utilizadas.	43
Tabla 3.3. Propiedades mecánicas de la resina epóxica utilizada. (<i>ProGlass 1300 epoxy resin, 2016</i>).	44
Tabla 3.4. Propiedades de la fibra de carbono utilizada. (<i>Fibre glast, 2010</i>).	46
Tabla 3.5. Especificaciones de la sierra de corte utilizada para las probetas (<i>Brands et al., 2015</i>).	48
Tabla 3.6. Normas utilizadas a lo largo de la investigación.	50
Tabla 3.7. Especificaciones de máquina universal de pruebas utilizada. (<i>Shimadzu, 2018</i>).	53
Tabla 3.8. Concentrado dimensional de las probetas.	54
Tabla 4.1. Promedio de resultados en probetas.	81
Tabla 4.2. Concentrado de resultados de probetas.	83
Tabla 4.3. Descripción de modo de falla por probeta.	85

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica 4.1. Comparación de esfuerzos máximos obtenidos de las probetas.....	83
---	----

ABREVIACIONES

FC – Fibra de carbono

PMC - Compuestos de matriz de polímero

PAN - Poliacrilonitrilo

FRP - Polímeros reforzados con fibra

GRP – (Glass fiber reinforced plastic) Plástico reforzado con fibra de vidrio

DFM – (Design for manufacturing) Diseño de manufactura

DFA – (Design for assembly) Diseño de ensamble

PITCH – Material viscoelástico compuesto de hidrocarburos.

FIA – (Federation Internationale de L’automobile) Federación internacional del automóvil.

FV – Fibra de vidrio.

MDF – (Medium Density Fibreboard) Tablero de fibra de densidad media.

SIMBOLOGÍA

E_f - Módulo de la fibra

V_f - Porcentaje de volumen de fibra

E_m - Módulo de matriz

V_m - Porcentaje de volumen de la matriz

S_{II} - Resistencia a la tracción longitudinal

σ - Esfuerzo

OBJETIVO

Determinar las configuraciones óptimas de manufactura de una horquilla para un monoplaza de Formula 1 en fibra de carbono y resina a un bajo costo y un proceso con un lapso de manufactura menor de los utilizados actualmente en el mercado para piezas con aplicaciones mecánica enfocado a la horquilla de un monoplaza de Formula 1.

La investigación está orientada al diseño de la horquilla elaborada con materiales ligeros, con el fin de disminuir peso y costo de manufactura del prototipo final, sin perder las propiedades mecánicas

HIPÓTESIS

Por medio de la configuración óptima de un material compuesto a base de fibra de carbono se logra manufacturar una horquilla para un monoplaza de Formula 1 soportados en la metodología de diseño y pruebas mecánicas.

METAS

1. Estudio bibliográfico de los materiales y métodos de manufactura, antecedentes y estado del arte en horquillas para monoplazas de Formula 1.
2. Propuesta de manufactura de laminado para la realización de pruebas mecánicas para la caracterización de los materiales.
3. Caracterización de laminado de acuerdo a la normativa ASTM D7264.
4. Diseño y manufactura propuesta de una horquilla

JUSTIFICACIÓN

Actualmente los materiales compuestos tienen un amplio campo de investigación pero desafortunadamente la manufactura de estos tiene costos elevados y maquinaria costosa y que no se encuentra en laboratorios comunes, por lo que se decidió crear una propuesta de manufactura en el área de materiales con menores costos de manufactura y reducción de tiempos de maquinado para que se encuentre al alcance de alumnos y personas en general para la realización de proyectos e investigaciones. Además de realizar una aportación en el área de materiales compuestos donde actualmente no se cuenta con suficiente información sobre la caracterización de estos materiales.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el ser humano ha ido evolucionando para mejorar su calidad de vida valiéndose de los materiales que lo rodean. Sin duda, uno de los inventos más importantes para el hombre fue la rueda ya que cambió la manera en que se transportaban objetos. Actualmente hablando de vehículos, los materiales compuestos particularmente la fibra de carbono ha comenzado a revolucionar desde hace algunos años las carreras de autos. Desde el año de 1894 en Francia comenzaron las carreras de automóviles, a consecuencia se buscaron autos más veloces, ésta búsqueda conllevó a vehículos más ligeros que aprovecharan al máximo la aerodinámica llevando así al desarrollo de nuevas tecnologías en procesos de manufactura y diseño, para tener un vehículo veloz lo más ligero posible. Los vehículos aprovechan las propiedades de los materiales como el aluminio 7000, la fibra de carbono y el titanio dada su alta resistencia y su peso ligero para un desempeño excepcional en la pista que combina la velocidad y la estabilidad que los monoplaza de Formula 1 deben tener (*Dr. Domingo Escudero López, 2001*).

En ésta investigación se realizaron pruebas de flexión a probetas fabricadas bajo la norma ASTM D7264 donde se propone la manufactura de una horquilla para un monoplaza de Formula 1 utilizando fibra de carbono y resina epóxica en la que no sea necesario el uso de

maquinaria para la fabricación de moldes, teniendo un bajo costo de fabricación, dónde se determinará si la manufactura es factible para su uso en un monoplaza de Formula 1.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1 MATERIALES

En términos generales, cualquier material que consista en dos o más componentes con propiedades mecánicas diferentes se puede denominar material compuesto. Además, la idea de combinar varios componentes para producir un material con propiedades que no se logran con los componentes individuales ha sido utilizada por el hombre durante miles de años. En consecuencia, la mayoría de los materiales naturales que han surgido como resultado de un proceso de evolución prolongado se pueden tratar como materiales compuestos (*Valery V. Vasiliev & Evgeny V. Moronzov, 2007*).

1.2 MATERIAL COMPUESTO

Material compuesto significa que dos o más materiales se combinan en una escala microscópica para formar un tercer material útil. Se pueden combinar diferentes materiales a escala microscópica, tal como en la aleación de metales, pero el material resultante es, para los fines prácticos, macroscópicamente homogéneo, es decir, el componente no se puede distinguir a simple vista y actúa esencialmente en conjunto. La ventaja de los materiales compuestos, si están bien diseñados, exhiben las mejores cualidades de sus componentes o constituyentes. (*Robert M. Jones. 1999*).

Los materiales se pueden clasificar como isotrópicos o anisotrópicos. Los materiales isotrópicos tienen las mismas propiedades materiales en todas las direcciones, y las cargas normales crean sólo cepas normales. En comparación, los materiales anisótropos tienen propiedades de material diferentes en todas las direcciones en un punto del cuerpo. No hay planos materiales de simetría, y las cargas normales crean tensiones normales y tensiones cortantes. Un material es isotrópico si las propiedades son independientes. Las propiedades del material en un punto en un cuerpo anisotrópico son diferentes para cada orientación de un material de muestra tomado en este punto. Por lo tanto, no hay planos de simetría material en este tipo de material, y todas las propiedades del material son una función de la orientación (*Carmas Composites. 2007*). Los compuestos son una subclase de materiales anisotrópicos que se clasifican como ortotrópicos. Los materiales ortotrópicos tienen

propiedades que son diferentes en tres direcciones mutuamente perpendiculares. Tienen tres ejes de simetría mutuamente perpendiculares y una carga aplicada paralelamente a estos ejes produce sólo tensiones normales. Por lo tanto, las propiedades mecánicas ortotrópicas son una función de la orientación. Por lo tanto, cuando las fibras están alineadas paralelas (0°) o perpendiculares (90°) a la dirección de la tensión aplicada, la lámina se conoce como una lámina especialmente ortotrópica ($\theta = 0^\circ$ o 90°). Una lámina que no está alineada en paralelo o perpendicular a la dirección del esfuerzo aplicado se denomina lámina ortotrópica general ($\theta \neq 0^\circ$ o 90°) en la figura 1.1 se observa un laminado a 0° y 90° . (F.C. Campbell. 2010).

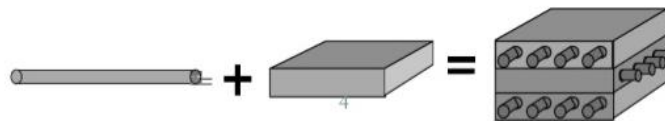


Figura 1.1. Fibra, matriz y material compuesto. (Carmas Composites. 2007).

Las características mecánicas del material compuesto pueden preverse, como el de cualquier material anisótropo, conociendo las características de la matriz y de la fibra y la proporción de ésta en cada sección (Dr. Domingo Escudero López. 2001). Un material heterogéneo se compone de materiales distintos y separados. En los compuestos, consiste en dos o más regiones materiales físicamente distintas a nivel macroscópico. Las cantidades de los materiales se combinan de manera controlada para conseguir una mezcla que tiene características de comportamiento más útiles que cualquiera de los materiales constituyentes lograría por sí mismos. Los materiales compuestos son heterogéneos (Carmas Composites. 2007).

Otra clasificación de los materiales compuestos es la diferencia entre los compuestos 1) tradicionales y 2) los sintéticos. Los compuestos tradicionales son aquellos que ocurren en la naturaleza o que han sido producidos por las civilizaciones durante muchos años. La madera es un material compuesto que se da en la naturaleza, en tanto que el concreto y el asfalto mezclado con grava son compuestos tradicionales que se usan en la construcción. Los compuestos sintéticos son sistemas de materiales modernos que se asocian

normalmente con las industrias manufactureras, en los que primero se producen los componentes por separado y después se combinan de manera controlada para alcanzar la estructura, propiedades y forma de las piezas que se desea.

Dentro de los materiales compuestos existe una clasificación para los diferentes tipos de compuestos que existen, los más comúnmente utilizados son:

1. Materiales compuestos fibrosos que consisten de fibras en una matriz.
2. Materiales compuestos laminados que consiste en capas de varios materiales.
3. Materiales compuestos particulados compuestos de partículas en una matriz.
4. Combinaciones de los tres primeros tipos.

En ésta investigación se utilizará un material compuesto fibroso y laminado para la manufactura de la horquilla de Formula 1.

Una fibra se caracteriza geoméricamente no solo por su muy alta relación de longitud a diámetro, sino también por su diámetro casi de cristal (*Robert M. Jones. 1999*).

Las fibras que se emplean en los materiales compuestos son continuas o discontinuas. Los compuestos estructurales se pueden clasificar básicamente en dos clases: multifásica y laminada.

A) El compuesto multifásico consta de dos o más fases constituyentes, aunque la mayoría de los materiales compuestos disponibles contienen dos fases. Ejemplos de compuestos de dos fases incluyen agregado de cemento, carburo de tungsteno en cobalto, barbas de alúmina en metal, entre otros.

B) Los compuestos laminados consisten en muchas capas de materiales multifásicos o homogéneos unidos entre sí. Ejemplos de compuestos laminados incluyen madera contrachapada, construcción en sándwich y plásticos reforzados (*Stephen W. Tsai. 1964*).

1.2.1 Laminado

Cuando hay una sola capa o una capa en la que todas las capas se apilan en la misma orientación, la disposición se llama una lámina. Cuando las capas se apilan en varios ángulos, la disposición se llama un laminado. Los materiales compuestos de fibras continuas son normalmente materiales estratificados (ver figura 1.2) en los que las capas o láminas están orientadas en direcciones que aumentarán la resistencia en la dirección de carga primaria.

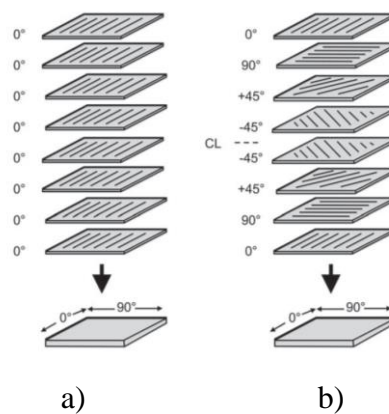


Figura 1.2. Ejemplo de a) lámina y b) laminado de material compuesto. (F.C. Campbell. 2010).

Las láminas unidireccionales (0°) son extremadamente fuertes y rígidas en la dirección 0° . Sin embargo, son muy débiles en la dirección de 90° porque la carga debe ser transportada por la matriz polimérica mucho más débil. Mientras que una fibra de alta resistencia puede tener una resistencia a la tracción de 500 ksi (3500 MPa) o más, una matriz polimérica típica normalmente tiene una resistencia a la tracción de sólo 5 a 10 ksi (35 a 70 MPa). La tensión longitudinal y las cargas de compresión son soportadas por las fibras, mientras que la matriz distribuye las cargas entre las fibras en tensión y estabiliza las fibras e impide su pandeo en compresión. La matriz es también el portador de carga principal para el cizallamiento interlaminar (es decir, cizallamiento entre las capas) y la tensión transversal (90°) como lo muestra la figura 1.3 (F.C. Campbell. 2010).

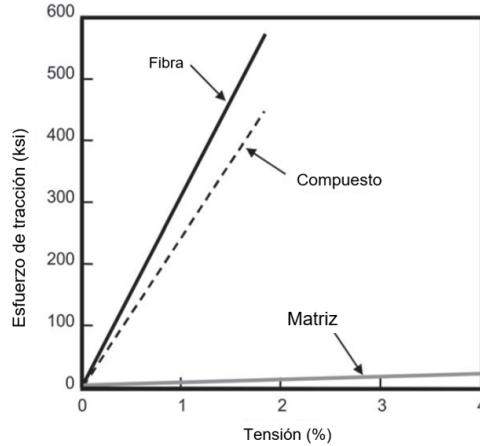


Figura 1.3. Comparación de las propiedades de tensión en fibra, matriz y compuesto. (F.C. Campbell. 2010).

El laminado equilibrado que tiene igual número de capas en las direcciones de 0°, +45°, -45° y 90° es llamado laminado cuasi isotrópico, porque lleva cargas iguales en las cuatro direcciones (ver figura 1.4).

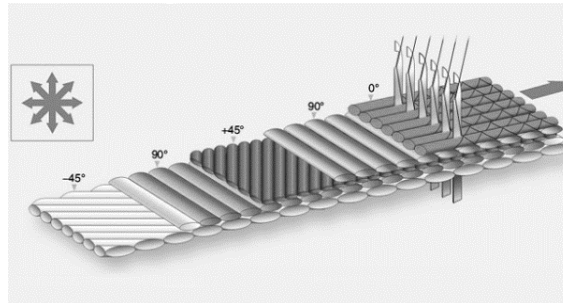


Figura 1.4. Acomodo de las capas de fibra en diferente dirección. (F.C. Campbell. 2010).

Cuando se carga una lámina o laminado unidireccional de fibras continuas en una dirección paralela a sus fibras (dirección 0° o 90°), el módulo longitudinal E_{11} se puede estimar a partir de sus propiedades constituyentes utilizando lo que se conoce como regla de mezclas:

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m \dots \dots \dots \text{(Ec. 1)}$$

Donde E_f es el módulo de fibra, V_f es el porcentaje de volumen de fibra, E_m es el módulo de matriz y V_m es el porcentaje de volumen de la matriz. La resistencia a la tracción longitudinal S_{11} también puede estimarse por la regla de las mezclas:

$$S_{11} = S V_f + S_m V_m \dots \dots \dots \text{(Ec. 2)}$$

Secuencia de apilamiento: Es el orden en que las capas de orientación variable se apilan una encima de la otra.

Laminado en capas transversales y laminado de capas cruzadas: Un laminado en capas cruzadas se fabrica apilando capas a 90° y 0° alternas.

Código de orientación del laminado: El siguiente código está diseñado para especificar compuestos laminados tan concisamente como sea posible relacionados con: (a) la orientación de cada capa en relación con el eje de referencia laminado (eje x), (b) el número de laminado en cada orientación, Y (c) la secuencia de apilamiento de las láminas en el laminado. Las principales características del código se presentan a continuación:

- 1.- Cada lámina se denotará por un número que representa su ángulo de orientación en grados.
- 2.- Las láminas adyacentes individuales se separan en el código mediante una barra inclinada si sus ángulos de orientación son diferentes. Las láminas adyacentes que tienen el mismo ángulo se indican mediante un subíndice numérico apropiado.
- 3.- Las láminas se enumeran en secuencia de un laminado al otro, con los corchetes que indican el principio y el final del código.
- 4.- Laminados que son simétricos respecto a su plano mediano geométrico requerido para listar sólo las capas situadas en un lado del plano de simetría. Si el laminado simétrico tiene un número impar de capas, entonces se coloca una barra sobre el último número en el código que representa la capa que es compartida por ambas mitades del laminado.
- 5.- Las secuencias repetitivas de láminas dentro de un laminado se denominan subconjuntos y se entregan entre paréntesis para indicar el número de repeticiones (*Carmas Composites. 2007*).

Cuando se combinan dos o más materiales de fibra en el compuesto FRP, se denomina compuesto híbrido (*Mikell P. Groover. 2007*).

Las principales ventajas de los materiales compuestos son su alta resistencia y rigidez, combinada con baja densidad, en comparación con los materiales a granel, lo que permite una reducción de peso en la pieza terminada, podemos observar las propiedades de diferentes materiales en la tabla 1.1 (*Mikell P. Groover. 2007*).

Tabla 1.1. Comparación de características de diferentes materiales (*Ronald Márquez*).

MATERIAL	DENSIDAD (g/cm ³)	RESISTENCIA A LA TENSION (kPa)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C)
POLÍMEROS				
Kevlar	1.44	4481.59	0.124	500
Nylon	1.14	827.37	0.002	249
Polietileno	0.97	3309.48	0.172	147
METALES				
Be	1.83	1275.53	0.303	1277
Boro	2.36	3447.37	0.379	2030
W	19.40	3998.95	0.406	3410
VIDRIO				
Vidrio E	2.55	3447.37	0.072	<1725
Vidrio S	2.50	4481.59	0.086	<1725
CARBONO				
HS (alta resistencia)	1.75	5653.70	0.275	3700
HM (alto módulo)	1.90	1861.58	77.0	3700
CERÁMICOS				
Al₂O₃	3.95	2068.42	0.530	2015
B₄C	2.36	2275.26	0.482	2450
SiC	3.00	3930.01	0.482	2700
ZrO₂	4.84	2068.42	0.344	2677
WHISKERS				
Al₂O₃	3.96	20684.27	0.427	1982

Cr	7.20	8894.23	0.241	1890
Grafito	1.66	20684.27	0.703	3700
SiC	3.18	20684.27	0.482	2700
Si ₃ N ₄	3.18	13789.51	379	-

1.2.2 Fibra de Carbono

La fibra de carbono se define como una fibra que contiene al menos 92% en peso de carbono, mientras que la fibra que contiene al menos 99% en peso de carbono se denomina usualmente una fibra de grafito, es un material compuesto. Uno de los materiales entrega las propiedades mecánicas, mientras que el otro lo protege de agentes corrosivos y le proporciona la fuerza de cohesión para que se mantenga unido como un todo (*Christian M. Julio 2011, Dr. Domingo Escudero López. (2001)*). Un material compuesto consiste en dos o más fases distintas. El término fase indica un material homogéneo, como metal o cerámico en los que todos los granos tienen la misma estructura cristalina. Al combinar las fases se crea un material nuevo con rendimiento agregado que supera al de sus partes. Para la industria automotriz, los compuestos poliméricos reforzados con fibra ofrecen un peso reducido y un estilo superior. Las fibras de carbono pueden encontrar aplicaciones en partes del cuerpo del carro (puertas, campanas, tapas de la cubierta, extremo delantero, paragolpes, etc.), chasis y sistemas de suspensión (por ejemplo, resortes de lámina), ejes de transmisión y así sucesivamente (*Dr. Domingo Escudero López. (2001)*).

Comenzó a utilizarse en el área de las carreras de autos por McLaren en el año de 1981 con el monoplaza MP4/1 (*Sebastián Lorenzo. 06/2013*). La fibra de carbono se clasifica por el número de filamentos, en miles, de que consta la hebra, en Formula 1 se utilizan fibras de 12k.

1.2.2.1 Procesos de fabricación y composición química de la fibra de carbono.

Las fibras de grafito y carbono están producidas a partir de dos tipos de materias primas:

- Fibras PAN (poliacrilonitrilo), es una fibra polimérica de origen textil.

- Fibras PITCH, se obtienen de la brea de alquitrán de hulla o bien petróleo purificado.

Las primeras, son las más extendidas en la producción de fibras de carbono, mientras que las fibras pitch aportan mayor rigidez, aunque son más frágiles (y se rompen con menores elongaciones). Durante el proceso de fabricación, las materias primas se exponen a la oxidación, empleando para ello temperaturas extremadamente altas. Posteriormente, pasan por procesos de carbonización y grafitización. Durante estos procesos, las fibras originales sufren una serie de cambios a nivel químico que les aportan mayores proporciones de rigidez-peso y de resistencia a tracción-peso. Para conseguir una fibra de alta resistencia se recurre al tratamiento térmico de carbonización: donde el PAN (poliacrilonitrilo) (ver figura 1.5) se calienta a 2500-2000 °C en atmósfera sin oxígeno en un horno como el que se observa en la figura 1.6 y se logra una resistencia a la tracción de 5.650 N/mm² (*carbon concrete. 2008*).

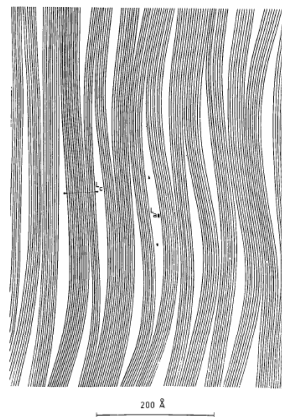


Figura 1.5. Microestructura de fibras de carbono PAN. (*Xiaosong Huang, 2009*).



Figura 1.6. Horno autoclave utilizado para curado de resina. (*carbon concrete. 2008*).

En general, las fibras de carbono se fabrican mediante una pirolisis controlada de fibras precursoras estabilizadas. Fibras precursoras se estabilizan en primer lugar a aproximadamente 200-400°C en el aire mediante un proceso de oxidación. Las fibras infusibles estabilizadas se someten entonces a un tratamiento a alta temperatura a aproximadamente 1000°C en una atmósfera inerte para eliminar hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y otros elementos distintos del carbono. Este paso a menudo se llama carbonización. Las fibras carbonizadas pueden grafitizarse adicionalmente a una temperatura incluso superior hasta alrededor de 31000°C hasta lograr un mayor contenido de carbono y mayor módulo de Young en la dirección de la fibra (*Dr. Domingo Escudero López. 2001*).

En algunos procesos los filamentos son continuos, mientras que en otros se trozan en fibras cortas. En la forma continua, se dispone de filamentos individuales en forma de mechas. Una mecha es una colección no torcida de fibras continuas (paralelas); es una forma conveniente para manejar y procesar. Las mechas típicas contienen de 12 a 120 fibras individuales. Por el contrario, un hilo es una colección torcida de filamentos. Las mechas continuas se usan en varios procesos, incluidos el bobinado de filamentos y la pultrusión (*F.C. Campbell. 2010*).

1.2.2.2 Características y propiedades de las fibras de carbono.

Las fibras poseen diferentes grados de resistencia, dependiendo del tratamiento que se aplicó al final de la fabricación de las fibras. A continuación se muestran algunos de los tratamientos más comunes y sus propiedades:

- Alto módulo (HM). Más rígida y requiere más temperatura. Tiene un módulo específico 70 veces superior al de las aleaciones de aluminio, el módulo específico es una propiedad de los materiales que consiste en el módulo de elasticidad por la densidad de masa de un material, también conocido como la rigidez en relación al peso o rigidez específica. Es más fuerte y se carboniza a una temperatura que proporciona mayor resistencia tensil. Tiene 8 micrómetros de

diámetro de hilo, una densidad entre 1740 y 1760 kg/m³, un módulo de elasticidad de 230 GPa, resistencia a la tracción entre 2.6 y 5 GPa, elongación a la rotura del 2%, un módulo específico de 130 y un coeficiente de expansión térmica igual que el de HM.

- Fibras de módulo intermedio, es más económica, menos rígida, de buena resistencia, y usa la temperatura más baja en el tratamiento. Tiene de 7 a 8 micrómetros de diámetro de hilo, una densidad de 1820 kg/m³, un módulo de elasticidad de 290 GPa, resistencia a la tracción de 3.1 GPa, elongación a la rotura del 1.1%, un módulo específico de 160 y un coeficiente de expansión térmica igual a la de HM Bajo modulo (menor a 70 GPa) con una baja resistencia a la tracción (menor a 1 GPa), son producidas a partir del alquitrán isótropo. Se pueden transformar en alto modulo mediante tracción de grafitización, que es un método de alto costo.
- Las fibras de modulo elevado (mayores a 800 GPa) se obtienen a partir de la mesofase del alquitrán (con las mismas características de un cristal líquido en una estructura similar a la del grafito) (Antonio Miravete. 2003). Los diversos tipos de módulos se observan a continuación en la tabla 1.2, adicionalmente se agrega la tabla de propiedades de la fibra de carbono utilizada en la tesis (tabla 1.3).

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono (Antonio Miravete. 2003).

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE CARBONO	FIBRA DE ULTRA ALTO MÓDULO (UHM)	FIBRAS DE ALTO MÓDULO (HM)	FIBRAS DE ALTA FUERZA (HT)	FIBRAS DE MÓDULO INTERMEDIO (IM)	FIBRAS DE BAJO MÓDULO	FIBRAS DE CARBONO ACTIVADAS
Módulo de elasticidad	500 GPa (i.e. < 50% del módulo elástico del monocristal de grafito, 1050 GPa)	300 GPa, pero con una relación resistencia a la tracción/ módulo de tensión menor del 1%.	3 GPa y con relaciones resistencia a la tracción/ módulo de 0.015-20.	300 GPa y relaciones de resistencia a la tracción/ módulo del orden de 0.01.	Bajos del módulo y resistencia a la tensión.	Se caracterizan por presentar una gran superficie específica, tamaño de poros muy uniforme y velocidades de adsorción/ desorción unas 100 veces superior a la de los carbones activos.

Tabla 1.3. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono 3K. (*Fibre glast. 2010*).

PROPIEDADES MECÁNICAS FIBRA DE CARBONO 3K	
Peso por unidad de área	4.51-4.93 m ²
Deformación de hilos/pulgada	12.5±1.0
Espesor nominal	0.030 cm
Ancho de tela	127 ± 0.635 cm
Longitud de yarda	91.44 m
Resistencia de tracción	4.205- 4.378 kN

Hay cierto número de características atractivas que distinguen a los plásticos reforzados con fibra entre los materiales de la ingeniería. Las más notables son: 1) relación elevada resistencia a peso, 2) razón grande módulo a peso y 3) gravedad específica baja. Un FRP común pesa sólo la quinta parte que el acero, pero su resistencia y módulo son similares en la dirección de la fibra. En la tabla 1.4 se comparan las propiedades para varios FRP, aceros y aleaciones de aluminio. Las propiedades que se listan en ella dependen de la proporción de fibras en el compuesto (*F.C. Campbell. 2010*). También nos muestra la relación entre el grosor de la fibra y la resistencia en la figura 1.7.

Tabla 1.4. Comparación de las propiedades comunes de los plásticos de fibra reforzada y aleaciones metálicas. (*F.C. Campbell. 2010*).

MATERIAL	RESISTENCIA A	MÓDULO DE
	LA TENSIÓN	ELASTICIDAD
	MPa	GPa
Acero al bajo carbono	345	207
Aleación de acero (tratada térmicamente)	3450	207
Aleación de aluminio (tratada térmicamente)	415	69
FRP: fibra de vidrio en poliéster	205	69
FRP: carbono en epóxico	1500	140
FRP: carbono en epóxico	1200	214
FRP: kevlar en matriz epóxica	1380	76

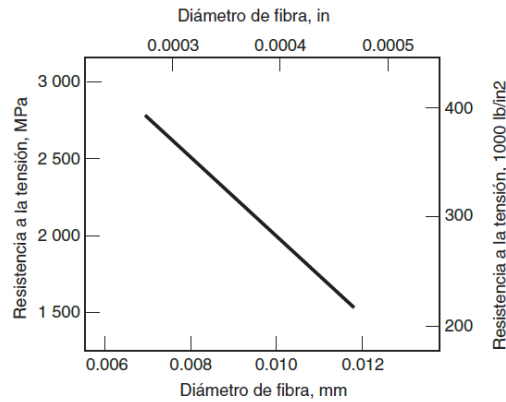


Figura 1.7. Relación entre la resistencia a la tensión y el diámetro para una fibra de carbono. (*F.C. Campbell. 2010*).

1.2.2.3 Clasificación de la Fibra de carbono.

La forma más familiar de fibra continua es una tela o trama tejida de hilos. El tejido de mechas, muy similar a una tela, pero distinguido en este contexto, consiste en filamentos no torcidos en lugar de hilos. Los tejidos de mechas se pueden producir con números desiguales de fibras en dos direcciones, de manera que su resistencia sea más grande en una dirección que en la otra. Dicho tejido unidireccional de mechas se prefiere muchas veces para los compuestos laminados de FRP. Las fibras pueden prepararse también en forma de esteras, un fieltro que consiste en fibras cortas orientadas aleatoriamente y aglomeradas holgadamente con un aglutinante, algunas veces en una tela portadora. Las esteras se pueden cortar y conformar para usarse como preformas en algunos procesos en molde cerrado. Otra forma prefabricada para operaciones de formado de FRP son los productos pre-impregnados, que consisten en fibras impregnadas con resinas termofijas parcialmente curadas para facilitar el proceso de formado. Los productos pre-impregnados se disponen en forma de cintas, láminas o telas aplicadas transversalmente (*F.C. Campbell. 2010*).

La fibra de carbono puede clasificarse basados en la temperatura aplicada al momento del tratamiento térmico final (ver tabla 1.5). Las propiedades de las fibras de carbono / grafito resultantes son afectadas por muchos factores tales como cristalinidad, distribución, orientación molecular, contenido de carbono y la cantidad de defectos. Antes del

empaquetado del material, las superficies relativamente inertes de las fibras de carbono / grafito se tratan posteriormente para mejorar su adhesión a matrices compuestas.

Tabla 1.5. Clasificación de la fibra de carbono dependiendo la temperatura de su tratamiento térmico. (Dr. Domingo Escudero López. 2001).

CLASIFICACIÓN	TEMPERATURA
Tipo I	Tratamiento térmico a 2,000 °C
Tipo II	Tratamiento térmico a 1,500 °C
Tipo III	Tratamiento térmico a 1,000 °C

La estructura atómica de una fibra de carbono es similar a la del grafito, y consiste en capas de átomos de carbono (hojas de grafeno) dispuestas en un patrón hexagonal regular, como se muestra en la figura 1.8 (Dr. Domingo Escudero López. 2001).

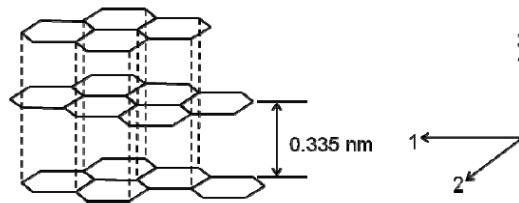


Figura 1.8. Estructura y dirección de cristales de grafito. (Dr. Domingo Escudero López. 2001).

Sin embargo, la unidad estructural básica de muchas fibras de carbono consiste en una pila de capas turbostráticas. En una estructura turbostrática, las hojas paralelas del grafeno se apila de manera irregular o al azar, plegada, inclinada o dividida (Dr. Domingo Escudero López. 2001).

1.2.2.4 Orientación de la fibra.

Una fibra tiene una longitud que es mucho mayor que su diámetro. La relación longitud-diámetro (l / d) se conoce como relación de aspecto y puede variar enormemente. Las fibras continuas tienen relaciones de aspecto largas, mientras que las fibras discontinuas tienen relaciones de aspecto cortas. Los compuestos de fibra continua tienen normalmente una

orientación preferida, mientras que las fibras discontinuas generalmente tienen una orientación aleatoria como se muestra en la figura 1.9 y figura 1.10).

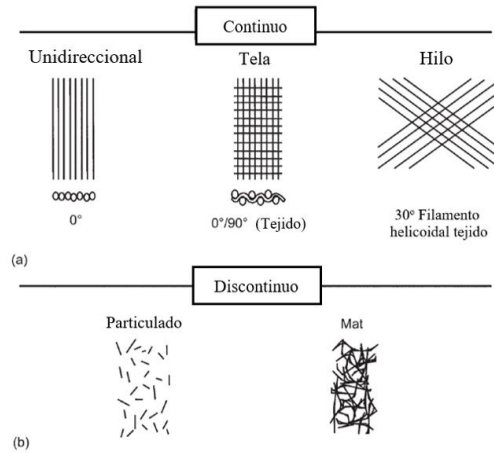


Figura 1.9. Tipos de refuerzos en fibras. (F.C. Campbell. 2010).

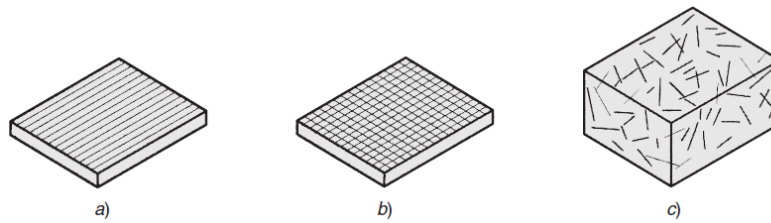


Figura 1.10. Orientación de las fibras en materiales compuestos: a) fibras unidireccionales, b) fibras tejidas, c) fibras discontinuas. (F.C. Campbell. 2010).

Existe un límite práctico de aproximadamente 70 por ciento en volumen de refuerzo que se puede añadir para formar un compuesto. A porcentajes más altos, hay muy poca matriz para soportar eficazmente las fibras. Por lo tanto, los compuestos de fibra continua se usan cuando se requiere mayor resistencia y rigidez (pero a un costo más alto), en los compuestos de fibra discontinua se usan cuando el costo es el principal impulsor, también donde la resistencia y rigidez son menos importantes (F.C. Campbell. 2010).

1.2.3 Matriz.

Naturalmente las fibras son de poca utilidad a menos que estén unidas entre sí para tomar la forma de un elemento estructural que pueda transportar cargas. El material que funge como cubierta y sostiene las fibras es llamado generalmente matriz.

La matriz es el elemento que proporciona la capacidad de resistir los esfuerzos de compresión del fibroplástico, y facilita el trabajo de las fibras en los esfuerzos de tracción. La función de la matriz en el material compuesto, en relación con las fibras, es, además de protegerlas contra las condiciones ambientales como la humedad o agentes mecánicos como flexibilidad, que pudieran dañarlas o desgastarlas, permitir la transferencia de tensiones entre ellas, en esfuerzos de tracción, y soportarlas, para evitar su pandeo, a fin de que puedan trabajar con la resina, en los esfuerzos de compresión. En consecuencia, la resina es determinante en la resistencia a compresión del fibroplástico y muy importante en los esfuerzos cortantes. Los esfuerzos de tracción son soportados, fundamentalmente, por las fibras (*Xiaosong Huang. 12/2009*).

Las resinas termofijas son los polímeros de mayor uso como PMC. Es común mezclar epóxicos y poliéster con fibras de refuerzo.

El material de la matriz desempeña varias funciones en el compuesto. En primer lugar, proporciona la forma general de la pieza o producto hecho del material compuesto. En segundo, mantiene la fase incrustada en su lugar, por lo general la encierra y con frecuencia la oculta. En tercer lugar, cuando se aplica una carga, la matriz comparte la carga con la fase secundaria, y en ciertos casos se deforma de modo que la fuerza la soporta en esencia el agente reforzador (*F.C. Campbell. 2010*).

1.2.3.1 Clasificación de la matriz.

A) Poliméricas

A. 1 Termoestables: Un termoestable comienza como una resina de baja viscosidad que reacciona y cura durante el procesamiento, formando un sólido intratable (*F.C. Campbell. 2010*).

Poliéster isoftálico, éster vinílico, resina de poliéster modificado, resina epóxica, resina fenólica, poliamidas.

A. 2 Termoplásticas: Nylon, policarbonato, poliacetato, poliamida, imida, poliéster, polisulfonato.

La palabra polímero proviene de su escritura en inglés *poly* = *muchos* y *mer* = unidad o molécula, y existen tres tipos diferentes: lineal, ramificado y reticulado. Los polímeros lineares son prácticamente una cadena de moléculas, los ramificados consisten en una cadena primaria de moléculas unida en tres dimensiones como lo muestra la figura 1.11, y los reticulados tienen un gran número de cadenas tridimensionales interconectadas (*Robert M. Jones. 1999*).

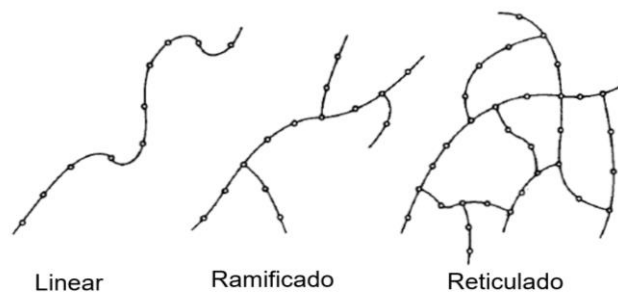


Figura 1.11. Tipos de fibras poliméricas. (*Robert Jones, 1999*).

B) Cerámicas

Alúmina (Al₂O₃) carbo-silicona (CSi), nitrato de silicón (Si₃N₄).

C) Metálicas

Aluminio, titanio, magnesio, súper aleaciones de níquel, acero inoxidable.

1.2.3.2 Características y propiedades de las resinas

Las características normales de las resinas más empleadas: poliéster, éster vinílico y resina epóxica, se presentan en la tabla 1.6 y en la tabla 1.7 las propiedades de la resina poliéster utilizada en esta investigación.

Tabla 1.6. Características mecánicas de diversas resinas. (F.C. Campbel., 2010).

MATRIZ	DENSIDAD g/cm ³	RIGIDEZ GPa	ELONGACIÓN %	CURADO %
Epóxica	1.2-1.2	2.7-4.1	2.0-3.2	1.0-5.0
Poliéster	1.1-1.4	2.1-4.1	1.0-5.0	5.0-12.0
Ester	1.1-1.3	3.0-3.5	3.5-5.5	5.4-10.3

Tabla 1.7. Propiedades mecánicas de las resinas utilizadas. (Reichhold, 2010).

PROPIEDADES	RESINA POLIÉSTER
Viscosidad	300-400 cPs
Tiempo de gel*	15-18 min
Resistencia a la tensión	54136.94 kPa
Módulo de tensión	3552.17 kPa
Elongación hasta ruptura	1.8%
Resistencia a la flexión	117181.22 kPa
Módulo de flexión	3636.29 kPa

1.2.3.3 Resina Epóxica

Un compuesto con matriz polimérica (PMC, por sus siglas en inglés para polymer matrix composite) es un material compuesto que consiste en un polímero incorporado a una fase de refuerzo como fibras o polvos (F.C. Campbell. 2010).

Las moléculas de resina epóxica son relativamente pequeñas, de aproximadamente 20 - 30 átomos de carbono - carbono (C - C). Esto es relativamente corto en comparación con el orden de unas pocas centenas o miles de enlaces C-C para moléculas termoplásticas. Dado que la longitud de las moléculas termoendurecidas es corta el material que las compone usualmente tiene baja viscosidad y aparece en forma de líquido a temperatura ambiente o moderadamente alta temperatura (alrededor de 100°C). Dado que el material aparece en forma líquida, para hacer un sólido fuera de él, las moléculas deben ser atadas junto con moléculas de algún otro tipo. Las moléculas de enlace se llaman los enlazadores o agentes de curado, en la tabla 1.8 se observa la comparación de la resina epóxica con el poliéster.

Tabla 1.8. Comparación de propiedades mecánicas de resina epóxica-poliéster (*Carmas Composites, 2007; Reichold, 2010*).

PROPIEDADES Y ASPECTOS DE LA RESINA	CARACTERÍSTICAS DE RESINA EPÓXICA	PROPIEDADES MECÁNICAS DE RESINA EPÓXICA	CARACTERÍSTICAS DE LA RESINA POLIÉSTER	PROPIEDADES MECÁNICAS DE RESINA POLIÉSTER
Costo	Elevado	-	Bajo	-
Facilidad de uso	Fácil	-	Difícil	-
Impermeabilidad al agua	Muy buena	-	No recomendable	-
Módulo de flexión	Excelente	60 MPa	Muy bueno	117.181 MPa
Módulo de tensión	Excelente	73 MPa	Muy bueno	3.552 MPa
Uso en compuestos avanzados con Carbono o Kevlar	Excelente	-	No recomendable	-
Rellenado en compuestos	Excelente	-	Bueno	-
Curado en superficies finas	Polimeriza en superficies finas	48 hrs	Generalmente debe ayudarse con un anti-tacking	24 hrs

En la figura 1.12 podemos observar el resultado de la unión de la matriz polimérica y el material compuesto.

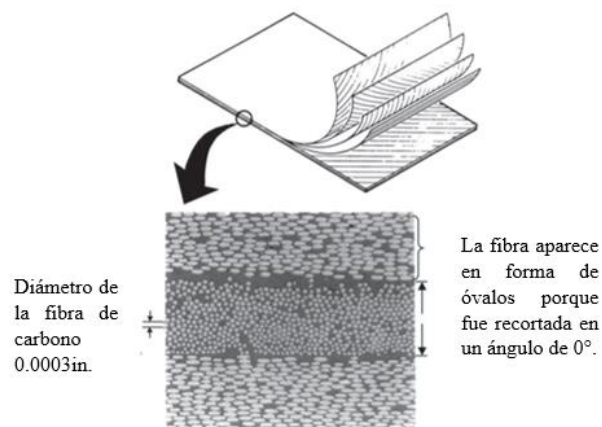


Figura 1.12. Sección transversal de laminado epoxico/carbono. (*F.C. Campbell. 2010*).

1.2.4 Gel Coat

La capa de gel mejora la calidad del acabado superficial y proporciona coloración según sea necesario. Una capa de gel de poliéster se utiliza comúnmente e incluye un aditivo tixotrópico y la pigmentación para el acabado de color deseado. La capa de gel se cura después para evitar la impresión a través del laminado.

El revestimiento de gel proporciona un acabado superficial en la superficie del casco. Una vez que la capa de gel se endurece, se aplica una capa de piel usando un proceso de pulverización para obtener una resistencia mejorada a la corrosión y a los productos químicos (*Sanjay K. Mazumdar, Ph.D. 2000*).

1.3 PROCESOS DE MANUFACTURA DE MATERIALES COMPUESTOS.

Los procesos de formación de compuestos de FRP pueden dividirse en categorías, como se muestra en la figura 1.13.

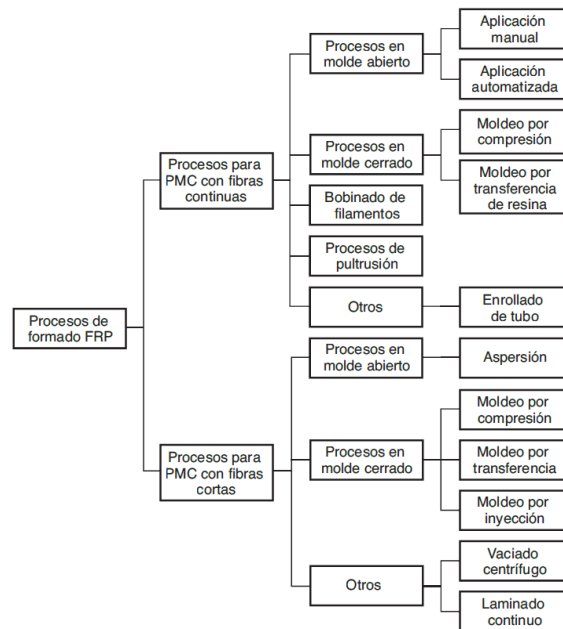


Figura 1.13. Clasificación de los procesos de manufactura para compuestos de FRP. (*Mikell P. Groover, 2007*).

La pultrusión es un proceso de formado para producir secciones largas y rectilíneas de sección transversal constante; es similar a la extrusión, solamente que adaptada para incluir refuerzos de fibra continua.

En el bobinado de filamentos se enrollan filamentos continuos que han sido sumergidos en resina líquida alrededor de un mandril giratorio; cuando la resina es el agente de curado, se genera una forma cilíndrica rígida y hueca. (Mikell P. Groover, 2007).

1.3.1 Tipos de moldes.

1.3.1.1 Molde Abierto.

El proceso en molde abierto también se conoce con otros nombres, como laminación por contacto y moldeo por contacto. Los materiales iniciales (resinas, fibras, esteras y mechas tejidas) se aplican al molde en capas para constituir el espesor deseado. Después continúa el curado y el retiro de la pieza. Las resinas comunes para estos procesos son poliésteres insaturados y epóxicos, usando fibra de vidrio como refuerzo. Las piezas moldeadas generalmente son grandes, El molde debe ser muy liso para un mejor acabado de la superficie de la pieza (F.C. Campbell. 2010). A su vez, existen 2 tipos de molde abierto, el negativo y positivo como se muestra en la figura 1.14.

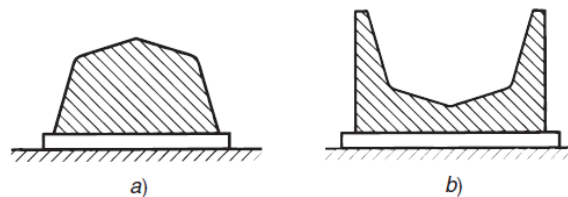


Figura 1.14. Tipos de molde abierto: a) positivo y b) negativo. (F.C. Campbell. 2010).

1.3.1.2 Molde Cerrado.

Estas operaciones de moldeo se realizan en moldes que consisten en dos secciones que se abren y cierran durante cada ciclo de moldeo y es más caro que el de molde abierto.

Los procesos de molde cerrado se dividen en tres clases con base en sus equivalentes en el moldeo de plásticos convencional, a pesar de que la terminología puede diferir cuando se moldean compuestos en matriz polimérica: 1) moldeo por compresión, 2) moldeo por transferencia y 3) moldeo por inyección (F.C. Campbell. (2010).

1.3.2 Procesos de aplicación de resina.

1.3.2.1 Aplicado manual.

Como su nombre indica, el aplicado manual es un método en el cual se aplican manualmente capas sucesivas de resina y refuerzo en un molde abierto para construir la estructura compuesta del FRP laminado. El procedimiento básico consiste en cinco pasos. Cada capa de refuerzo de fibra está seca en el paso 3 de la figura 1.12, cuando se coloca sobre el molde. Se vacía entonces la resina líquida (no curada), o se aplica con brocha o por aspersión. El impregnado de la tela de fibra se hace con rodillos de mano. A ésta operación se le conoce como aplicación húmeda.

La producción requiere generalmente moldes metálicos. Se usa algunas veces el aluminio, el acero y el níquel con las superficies de la cara del molde endurecidas, para resistir el desgaste. La aplicación manual se presta generalmente para productos de gran tamaño fabricados en baja cantidad (ver figura 1.15).

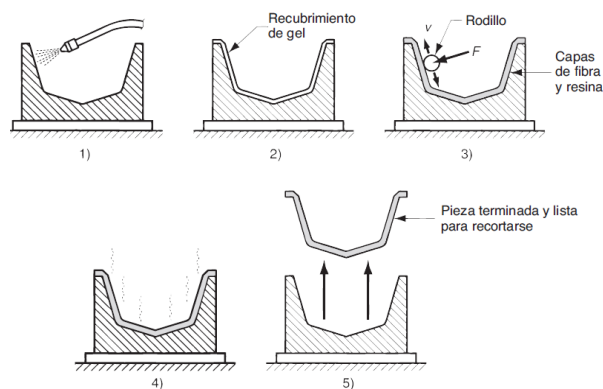


Figura 1.15. Procedimiento de aplicación manual: 1) se limpia el molde y agrega antiadherente, 2) recubrimiento delgado de gel coat, 3) se aplican capas sucesivas de fibra y resina, 4) se cura la pieza, 5) se retira del molde la pieza completamente curada. (F.C. Campbell. 2010).

La laminación a mano, que se muestra en la figura 1.16, es un método primitivo pero eficaz que sigue ampliamente utilizado para la creación de prototipos y la producción de pequeños lotes. Los materiales más comunes son fibra de vidrio E y resina de poliéster, aunque también se pueden utilizar en materiales de mayor rendimiento. La principal limitación de la laminación manual es que el molde tiene sólo una superficie lisa. La ausencia de control directo sobre el grosor parcial, la fibra el contenido, la fracción de huecos y la calidad de la superficie en la otra superficie. La precisión de la dimensión no es crítica. Aunque los costos de capital son bajos, la producción es laboriosa y el control de calidad es relativamente difícil. La calidad de la parte final depende en gran medida de la habilidad del operador (*Suong V. Hoa, 2009*).

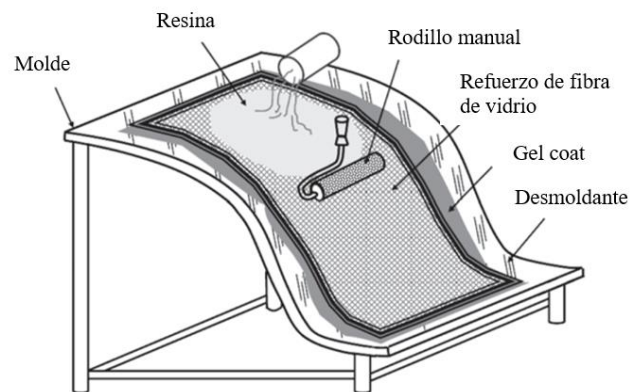


Figura 1.16. Esquemático del proceso de laminado manual. (*Suong V. Hoa, 2009*).

Ventajas:

1. Se requiere muy poca inversión de capital para este proceso porque hay un costo de equipo insignificante comparado con otros procesos.
2. El proceso es muy simple y versátil. Cualquier material de tipo fibra puede seleccionarse con cualquier orientación de fibra.
3. El costo de fabricar una pieza de prototipo es bajo porque se puede usar un molde simple para fabricar la pieza. Además, la materia prima utilizada para este proceso es resina líquida, estera y material de tela, que son menos costosos que los materiales pre-impregnados.

Desventajas:

1. El proceso es intensivo en mano de obra.
2. El proceso es principalmente adecuado para la creación de prototipos, así como para la fabricación de grandes estructuras.
3. Debido a su naturaleza de molde abierto, la emisión de estireno en la aplicación de fibra es una preocupación importante.
4. La calidad de la pieza producida no es consistente de parte a parte.
5. No se pueden fabricar piezas de fracción de alto volumen de fibra utilizando este proceso.
6. El proceso no es limpio.

1.3.2.2 Aplicado por aspersión.

La aspersión es un intento de mecanizar la aplicación de capas de resina y fibra, así como para reducir el tiempo de la operación. Es una alternativa para el paso 3 en el procedimiento manual. En el método por aspersión la resina líquida y las fibras cortadas se rocían sobre un molde abierto para construir capas sucesivas de FRP (figura 1.17).

La pistola aspersora está equipada con un mecanismo de corte alimentado con una mecha de filamentos que corta en fibras cuyas longitudes van de 25 a 75 mm aproximadamente, los cuales se incorporan a la corriente de resina a la salida de la boquilla. La acción mezcladora genera una orientación aleatoria de las fibras en la capa, a diferencia de la aplicación manual en la cual los filamentos pueden orientarse como se quiera.

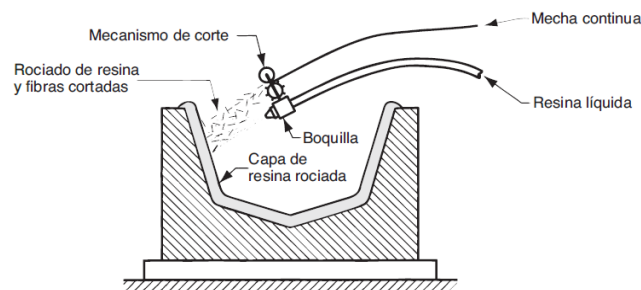


Figura 1.17. Método de aplicación por aspersión. (Suong V. Hoa, 2009).

1.4 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS COMPUESTOS.

Los materiales compuestos tienen muchas características de comportamiento mecánico que son diferentes de las de los materiales de ingeniería más convencionales. Algunas características son meramente modificaciones del comportamiento convencional; otros son totalmente nuevos y requieren nuevos procedimientos analíticos y experimentales, los materiales más comunes utilizados en ingeniería son homogéneos e isotrópicos, mientras que los compuestos son heterogéneos o anisotrópicos. A continuación se muestra la definición y ejemplos de algunos de estos tipos de materiales.

- A) **Materiales heterogéneos:** Un cuerpo heterogéneo tiene propiedades no uniformes en todo el cuerpo, ya que, las propiedades dependen de la posición del cuerpo, los diferentes materiales pueden observarse a simple vista en la mayoría de los casos, algunos de estos materiales son agua y aceite, el granito, concreto, entre otros.

- B) **Materiales anisotrópicos:** El material que tiene 21 constantes elásticas independientes en un punto se denomina material anisotrópico. Un cuerpo anisotrópico tiene propiedades que son diferentes en todas las direcciones de un punto en el cuerpo, por lo que no existe un plano de simetría en el material, un ejemplo es el diamante.

- C) **Materiales isotrópicos:** Estos materiales (o no cristalinos) son estrictamente isotropos y presentan siempre el mismo comportamiento independientemente de la dirección. Ejemplos de estos son el acero, aluminio, materiales policristalinos, etc.

- D) **Materiales ortotrópicos:** Un material es ortotrópico cuando sus propiedades mecánicas o térmicas son únicas e independientes en 3 direcciones perpendiculares entre sí. Algunos ejemplos son la madera, algunos cristales y metales laminados.

Todas estas variables se presentan por la estructura atómica que posee el material, ya que la dirección de respuesta de los átomos a las fuerzas aplicadas define el comportamiento que tendrá el material. La figura 1.18 nos muestra el comportamiento de algunos de los materiales mencionados anteriormente.

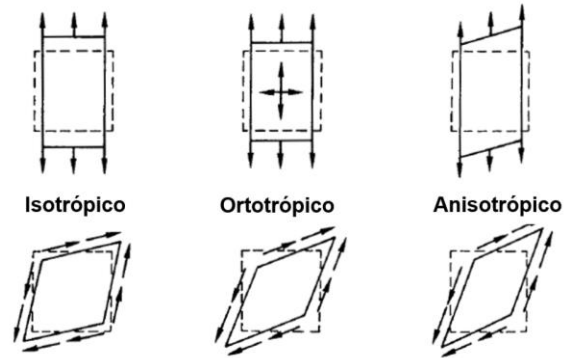


Figura 1.18. Comportamiento mecánico de diferentes materiales (*Robert M. Jones, 1999*).

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

HISTÓRICOS

2.1 NATURALEZA DE LOS MATERIALES

La unidad estructural fundamental de la materia es el átomo, cada átomo está compuesto de un núcleo con protones con carga positiva y neutrones con carga neutra, rodeado por un número suficiente de electrones con carga negativa de modo que las cargas quedan balanceadas como muestra la figura 2.1.

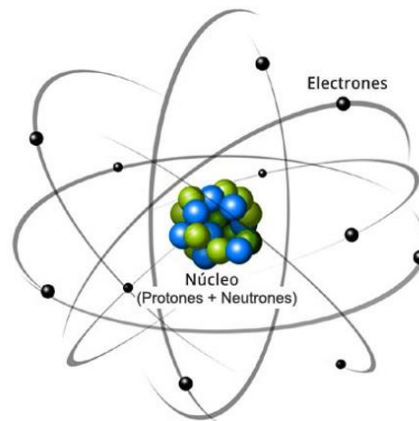


Figura 2.1. Componentes del átomo. (*Carmen Herranz G., 2017*).

Muchas de las similitudes y diferencias entre los elementos pueden explicarse por sus respectivas estructuras atómicas (*Molly Glleeson. 2015*).

2.1.1 Materiales estructurales

Los materiales son los elementos básicos de todas las estructuras naturales y artificiales. Usualmente surgen nuevos materiales debido a la necesidad de mejorar la eficiencia y el rendimiento estructural. Además, los nuevos materiales en sí mismos como regla general, a su vez proporcionan nuevas oportunidades para desarrollar estructuras y tecnología actualizadas.

Los materiales estructurales poseen una gran cantidad de propiedades físicas, químicas y de otro tipo, pero al menos dos características principales son de primordial importancia, como la rigidez y fuerza que proporcionan a la estructura, su capacidad de mantener su forma y

dimensiones bajo carga o cualquier otra acción externa (*Valery V. Vasiliev & Evgeny V. Moronzov. 2007*).

2.1.2 Inicio de los materiales compuestos

Los avances tecnológicos a lo largo de la historia han estado íntimamente ligados a descubrimiento y/o desarrollo de nuevos materiales. La edad de piedra o la del bronce, la revolución del silicio hace unas décadas, etc. son ejemplos evidentes de esta afirmación. Las nuevas tecnologías siempre han exigido una continua mejora de las prestaciones de los materiales para que sean capaces de soportar cada vez más y más carga y garanticen su integridad durante su vida útil en servicio (*Carlos González. 2011*).

Los materiales compuestos tienen varios años de uso. Se desconoce su comienzo preciso, pero toda la historia registrada contiene referencias a algún tipo de material compuesto (*Robert M. Jones. 1999*).

Los humanos han usado materiales compuestos desde tiempos antiguos. Uno de los primeros usos del material compuesto fue realizado por los antiguos mesopotámicos alrededor de 3400 a.C., cuando pegaron listones de madera en diferentes ángulos para crear madera contrachapada. Los egipcios usaban Cartonnage (Cartonaje), capas de lino o papiro empapados en yeso, para las máscaras mortuorias datan del 2181-2055 a.C., éstas se muestran en la figura 2.2.



Figura 2.2. Fragmentos de cartonaje encontrado en momia egipcia (*MBI Mar-Bal Incorporated, 2015*).

Los arqueólogos han descubierto que los materiales de construcción compuestos naturales se usaban en Egipto y Mesopotamia, ya que los constructores y los artesanos antiguos

usaban paja para reforzar los ladrillos de barro, la cerámica y los barcos alrededor de 1500 a.C. (*MBI Mar-Bal Incorporated. 2015*).

Posterior al uso de estos materiales por los egipcios, comenzaron a ser utilizados por diferentes culturas a lo largo de los años hasta la actualidad, donde, en cada período de tiempo se realizaban mejoras y se hacían nuevos descubrimientos.

Éstos son algunos de los años más significativos en el campo del desarrollo de materiales compuestos:

1200: Los mongoles inventan los primeros arcos de material compuesto con una combinación de madera, bambú, hueso, tendones de ganado y seda, todo esto unido con resina de pino natural.

1935: Owens Corning lanzó la industria del polímero de refuerzo de fibra, introduciendo a su vez la fibra de vidrio.

1936: Se patentaron las resinas de poliéster insaturadas.

1940: La Segunda Guerra Mundial provoca que la industria del FRP migre de la investigación a la producción real.

1940: Se descubre que los compuestos de fibra de vidrio son transparentes a las frecuencias de radio y se adaptan para domos de radares y otros equipos electrónicos.

1950: Se desarrollan métodos de fabricación como la pultrusión, moldeo de bolsas de vacío y bobinado de filamentos a gran escala.

1960: El bobinado de filamentos se convierte en la base de motores cohetes a gran escala que impulsaron la exploración del espacio desde la década de los 60's.

1961: Se patenta la primera fibra de carbono, pero pasan varios años hasta que se comercialice.

1980: Comienza la investigación y uso de Kevlar.

2000: Los compuestos entran al mercado de la transmisión eléctrica.

2000: Inicia la implementación de materiales compuestos en los Boeing 787 Dreamliner para aplicaciones rígidas y de alta resistencia como parte de las alas y fuselaje.

2.2 FEDERACIÓN INTERNACIONAL DEL AUTOMÓVIL.

Fundada en 1904 la FIA (por sus siglas del francés Federation Internationale de L'automobile), la FIA se ha convertido en una organización global que no solo promueve el deporte del motor, sino también una movilidad segura, sostenible y accesible para todos los usuarios de la carretera en todo el mundo. Como tal, la federación trabaja en tres áreas clave de actividad interrelacionadas: Deporte, Campañas y Movilidad. La figura 2.3 nos muestra los monoplazas utilizados en la inauguración de la FIA en Formula 1 en 1950.



Figura 2.3. Giuseppe Farina en la carrera inaugural de la FIA (*Federation Internationale de L'automobile, 2017*).

La participación de la FIA en el deporte del motor es casi tan antigua como el automóvil en sí. Con las carreras de ciudad a ciudad cada vez más populares a principios del siglo XX, pero sin reglas que rijan la seguridad o la competencia leal, el Automobile Club de France se alió con 12 clubes de todo el mundo para formar la Asociación Internacional de Automóviles Reconnus, la antecedente directo de la FIA. En 1950, la federación inauguró el Campeonato Mundial de Formula 1 y así comenzó la evolución de la FIA en una fuerza mundial del deporte del motor. Desde la Formula 1 hasta el Campeonato Mundial de Rally y desde carreras de resistencia hasta el nuevo estadio de campeonatos de energía alternativa, la pasión de la FIA por el deporte del motor y su dedicación para garantizar el juego limpio y la seguridad para todos los competidores no han disminuido (*Federation Internationale de L'automobile, Diciembre 2017*).

Ésta asociación que regula actualmente el mundo de Formula 1 nos describe en sus manuales de regulación los materiales, dimensiones, geometrías, diseños, componentes, entre otros, que son seguros para utilizarse en los monoplazas de Formula 1. En el artículo 15 “Construcción del carro” y en el subíndice 15.1 “Materiales permitidos”, podemos observar que la fibra de carbono es uno de los materiales aceptados para la carcasa del monoplaza, ésta se especifica que sea unidireccional y pre impregnada, así también nos dice su módulo de elasticidad entre otros aspectos del material.

2.3 CARRERAS DE FORMULA 1.

Formula 1 (la Formula en el nombre se refiere a un conjunto de reglas a las que todos los participantes y los coches deben cumplir y fue conocido originalmente y brevemente como Formula A) puede remontarse a sus raíces a los primeros días de carreras de motor, y surgió de la boyante Escena de carreras europeas de los años entre guerras. Los planes para un campeonato de pilotos de Formula 1 fueron discutidos a finales de la década de 1930, pero fueron archivados con el inicio de la Segunda Guerra Mundial. En 1946 la idea se reavivó y en esa temporada se celebraron las primeras carreras y al año siguiente se tomó la decisión de lanzar un campeonato de pilotos. Se tardó hasta 1950 para los detalles a ser martillado y en mayo de 1950 la primera carrera del campeonato del mundo se celebró en Silverstone -

la primera carrera de Formula 1 había tenido lugar un mes antes en Pau (*Martin Williamson*).

Aunque la primera carrera oficial de "Formula 1" fue en Silverstone, Inglaterra, en 1950, los orígenes se remontan a las primeras carreras por carretera que tuvieron lugar en Francia a principios de siglo (ver figura 2.4). Las distancias eran imposiblemente largas según los estándares modernos y los conductores y los espectadores a menudo eran asesinados (*Rainer Schlegelmilch*).



Figura 2.4. Primera carrera de Formula 1, Silverstone. (*Federation Internationale de L'automobile, 2017*).

2.3.1 Aplicación de la Fibra de carbono en la Formula 1.

Los autos de carreras solían ser del mismo tipo de materiales que los autos de carretera, es decir, acero, aluminio y otros metales. Sin embargo, a principios de los 80, la Formula 1 experimentó el comienzo de una revolución que se ha convertido en su sello: el uso de materiales compuestos de carbono para partes como el chasis (ver figura 2.5), monocasco y suspensión. (*Brad Spurgeon. 2017*).

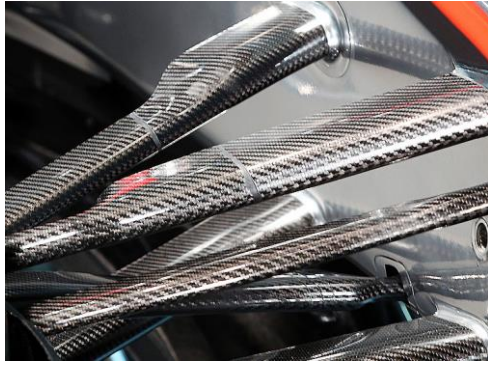


Figura 2.5. Suspensión de Formula 1 de material compuesto. (*Brad Spurgeon. 2017*).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y

EXPERIMENTACIÓN.

En este capítulo se describen los materiales utilizados en la fabricación de las probetas y horquilla de fibra de carbono y resina epóxica, así como sus propiedades mecánicas y técnicas de manufactura con el fin de obtener la caracterización en base a las propiedades de los materiales compuestos utilizados.

3.1 Etapas para el desarrollo de la investigación.

Como se mencionó anteriormente de las 4 etapas que se conforma la manufactura de la horquilla, se mostrarán y explicará cada una de éstas para tener una mejor comprensión del tema.

❖ ETAPA I: Revisión bibliográfica.

Ésta etapa es la base de la investigación, ya que fue donde se comenzó a buscar la información de mayor relevancia y credibilidad para iniciar con la búsqueda de métodos, materiales, pruebas, manufactura, etc., que ayudasen a la realización de ésta tesis.

❖ ETAPA II: Caracterización de materia prima.

Dentro de ésta etapa se llevará a cabo la selección de los materiales utilizados en el laminado del prototipo de la horquilla, dónde se realizará la caracterización de los materiales bajo la norma ASTM D7264 para determinar si las características mecánicas y de manufactura de los materiales son viables para su aplicación en un monoplaza de Formula 1. En base al estudio realizado para la selección de materiales se decidió utilizar un laminado $[0^\circ \pm 90^\circ]$ de 6 capas de fibra de carbono bidireccional y resina epóxica para el prototipo, mientras que fibra de vidrio y resina poliéster para el molde, gracias a su bajo costo y sencilla manufactura.

❖ ETAPA III: Fabricación de horquilla.

A) Manufactura de molde de MDF.

En base al modelo en 3D diseñado en el software SolidWorks se realizó la impresión de los planos para tomar las dimensiones, geometría y comenzar la manufactura de un modelo en MDF que sirvió como base para el prototipo final de la horquilla.

B) Manufactura de molde en fibra de vidrio y resina poliéster.

Se fabricó un molde de fibra de vidrio y resina epóxica con el que se busca obtener una mayor sujeción para compactar el laminado del prototipo de manera uniforme.

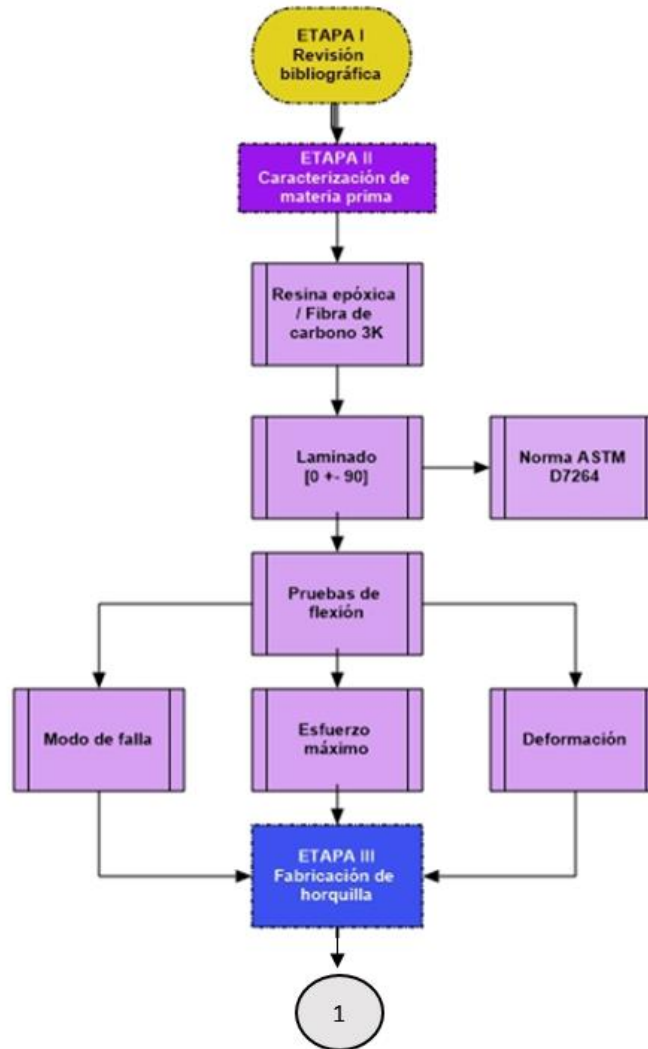
C) Manufactura de prototipo de horquilla en fibra de carbono y resina epóxica.

Se utilizaron el modelo y molde mencionados anteriormente para la fabricación del prototipo de una horquilla para un monoplaza de Formula 1 mediante el laminado propuesto en la etapa II para la obtención de la pieza final.

❖ **ETAPA IV: Análisis y resultados.**

Dentro de esta etapa se desarrolló un análisis en base a los resultados obtenidos en la etapa II de pruebas de flexión bajo la norma ASTM D7264 a las probetas de material compuesto donde se hará una comparación entre el comportamiento del material en cada una de ellas, así como las conclusiones finales de esta investigación.

A continuación se muestra el diagrama de flujo dónde se describen las 4 etapas, 6 sub etapas y derivados de éstas 11 sub etapas más que abarcan desde la búsqueda bibliográfica hasta los análisis de resultados mecánicos que se reflejan en la figura 3.1. Finalmente se tendrá un procedimiento de manufactura y pruebas mecánicas de flexión de las probetas para posteriormente ser analizados y comparados.



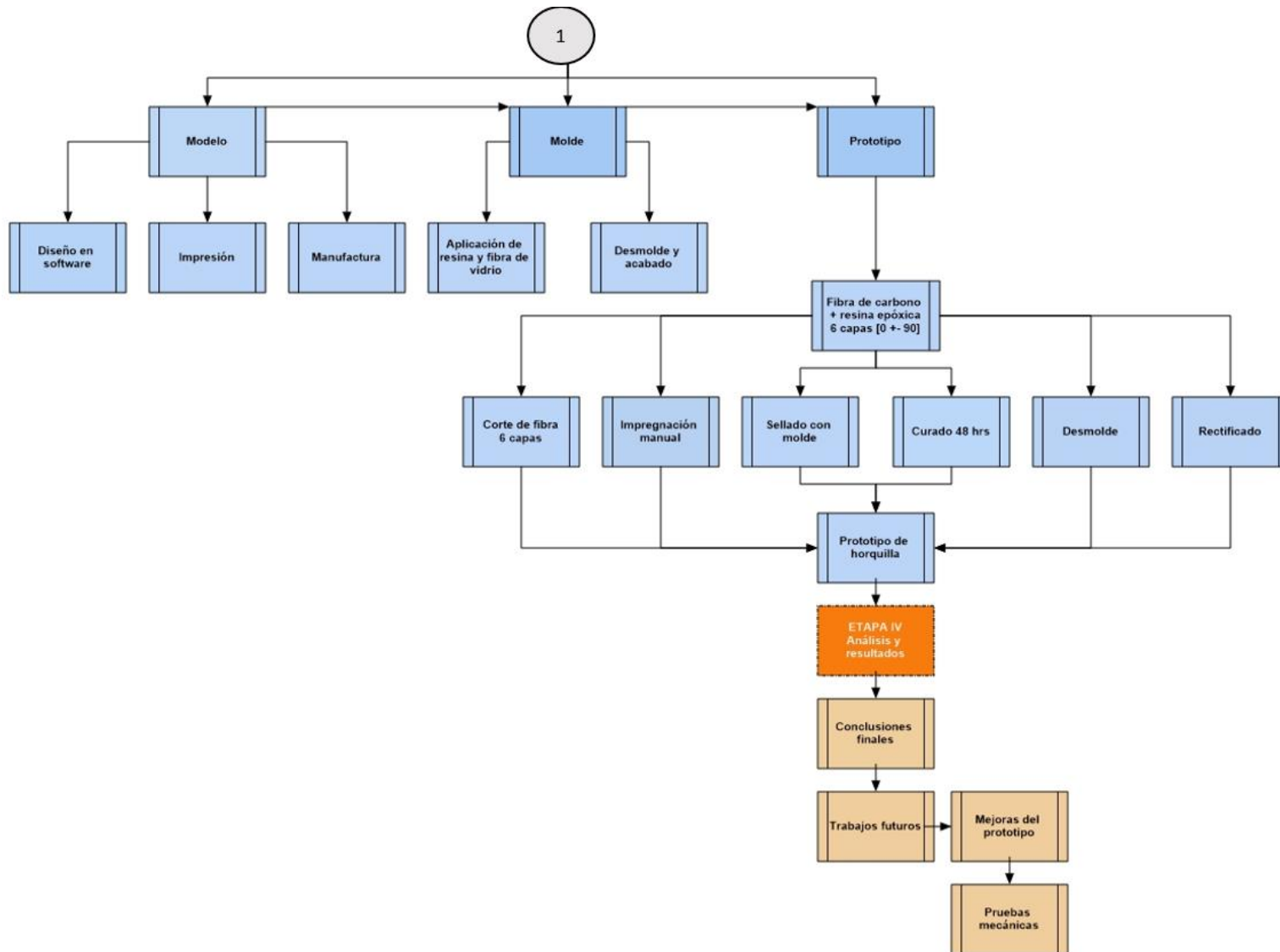


Figura 3.1. Diagrama de flujo de etapas para el desarrollo de la caracterización de la manufactura propuesta.

3.1.1 ETAPA I: Revisión bibliográfica.

Dentro de esta primera etapa se seleccionaron los trabajos de investigación más representativos para utilizar información precisa y fundamentada. Una vez que se seleccionaron las fuentes se comenzó a dividir la información por temas para plasmarla de una manera entendible y ordenada que le resultara más sencillo de comprender al lector.

En ésta etapa también se describirán los tipos de fibras y métodos de manufactura que existen actualmente seleccionando el que sea mejor para las metas de ésta investigación.

3.1.2 ETAPA II: Caracterización de materia prima.

Dentro de ésta etapa conoceremos los materiales, herramientas y equipo de protección que se utilizó a lo largo de la investigación, veremos las tablas de cantidades utilizadas y las características de las herramientas a utilizar. Estos elementos son de suma importancia ya que son la clave para la obtención de los mismos resultados en caso de querer replicar o modificar algún punto de la investigación. Durante la experimentación se tomaron cantidades de todas las sustancias utilizadas y métodos de manufactura para poder mostrar el desarrollo de la manufactura en las etapas siguientes.

3.1.2.1 Materiales utilizados.

A continuación se presenta la tabla 3.1 con los materiales utilizados durante la investigación, los cuales abarcan las probetas utilizadas en las pruebas de flexión, el modelo, el molde y la pieza final. Cada uno de los materiales fue seleccionado en base a la sus propiedades mecánicas y comportamiento con otros materiales y pruebas.

Tabla 3.1. Materiales utilizados.

MATERIAL	CANTIDAD
Resina epóxica	1892.71 ml
Fibra de carbono bidireccional	1 ½ m

Resina poliéster	1892.71 ml
Fibra de vidrio tejida	1.828 m
Gel coat	1 kilo
Secante para resina poliéster y gel coat	15 ml
Pintura acrílica en aerosol	1 lata
Pegamento	40ml
Madera MDF	½ hoja de 1.27 cm
Desmoldante	100 gr

Una vez que se seleccionaron los materiales, se comenzó a crear un concentrado (ver tabla 3.2) de las herramientas que requería cada uno de ellos para una manufactura óptima, estas herramientas se seleccionaron en base a las referencias bibliográficas sobre experimentación y manufactura con materiales compuestos y en base a experimentaciones previas.

Tabla 3.2. Herramientas utilizadas.

HERRAMIENTA	CANTIDAD
Lijas 30, 120, 220, 330	1 c/u
Brochas 1in.	5
Rodillo metálico	1
Estopa	¼ bolsa
Cinta adhesiva	1
Tijeras	1
Marcador permanente	1
Recipientes para mezcla	5
Máquina de Pruebas Universales Shimadzu	1

Además de las herramientas en base a las características y modos de uso mostrados en las fichas técnicas de los materiales de la tabla 3.1 se muestra el equipo de protección utilizado, esto es necesario por el tipo de sustancias químicas que se manejan, ya que algunas de ellas pueden ser dañinas si se aspiran, consumen o tienen contacto directo con la piel.

1. Resina epóxica ProGlass 1300.

Se utilizó la resina ProGlas 1300 Epoxy Resin para el laminado y la horquilla, es una resina líquida a base de bisfenol A de baja viscosidad diluida con cresil glicidil éter. Algunas de sus características son:

- ✓ Baja viscosidad para un fácil bombeo y manejo.
- ✓ Reacciona con una amplia gama de agentes de curado a bajas temperaturas.
- ✓ Produce sistemas curados de alta resistencia resistentes al ataque químico.
- ✓ Menor olor.
- ✓ Menos propenso a la cristalización que otras resinas epoxídicas diluidas.

La tabla 3.3 nos muestra algunas de las propiedades mecánicas de la resina.

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas de la resina epóxica utilizada. (*ProGlass 1300 epoxy resin, 2016*).

RESINA EPÓXICA PROGLASS 1300	
Flexión	60 MPa
Tensión	73 MPa
Tiempo de curado	48 hrs
Densidad	1.14 g/ml

Se utilizó una relación de 3:1 de resina secante, cantidad que se muestra en la ficha técnica de la resina. Tiene un tiempo aproximado de inicio de curado de 20 minutos y para curado final aproximadamente 48 horas dependiendo propiedades como clima y humedad del área. (*ProGlass epoxy resin, 2016*).



Figura 3.2. Resina epóxica y endurecedor ProGlass.

2. Fibra de carbono bidireccional 3K.

La fibra de carbono de tejido liso bidireccional 3K como muestra la figura 3.3, llamada así por el número de filamentos que posee por hilo, tiene un peso de 164.42 gr/m^2 , 127 cm de ancho, 0.030 cm de espesor, 31.75 x 37.75 cm de tejido liso. Las fibras de grafito contienen hasta 95% de carbono y producen la mayor resistencia a la tracción en la industria de FRP. Estas fibras tejidas juntas forman tela de grafito. Estas telas ofrecen una mayor resistencia y una relación rigidez / peso que cualquier otro refuerzo comúnmente disponibles. Esta tela es adecuada para uso en carreras, aviones, competición marina e industrias ligeras. Para maximizar las propiedades de la fibra, recomendamos usar resina epóxica o viniléster, aunque los poliésteres se unirán a las telas. Esta fibra de carbono de tejido liso es el tipo más comúnmente utilizado para piezas aerodinámicas livianas (*Fibre glast 2010*).



Figura 3.3. Fibra de carbono 3K utilizada para la fabricación de la horquilla.

En la tabla 3.4 se observan las propiedades de la fibra de carbono 3K, que hicieron de esta la fibra ideal para sus propósitos de manufactura.

Tabla 3.4. Propiedades de la fibra de carbono utilizada. (*Fibre glast, 2010*).

PROPIEDADES DE FIBRA DE CARBONO 3K	
Patrón de tejido	Simple
Peso de la tela	0.000200231- 0.000218771 gr/cm ³
Grosor nominal	0.03 cm
Ancho de la tela	127 cm
Longitud del rollo	91.44 m
Resistencia a la tracción	4.205- 4.378 kN
Módulo de tracción	4205.80 kN
Elongación	1.4 - 1.95 %

3.1.2.2 Laminado.

Se utilizó un laminado de 6 capas con inclinación $[0^\circ \pm 90^\circ]$ de fibra de carbono bidireccional 3K como se muestra en la figura 3.4.

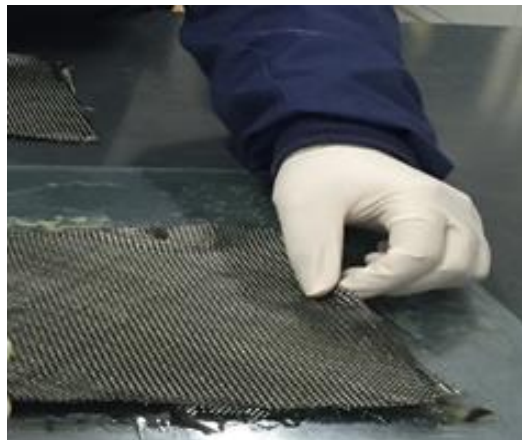


Figura 3.4. Corte de fibra de carbono para la manufactura de probetas.

Posteriormente se utilizó un kit de vacío para la aplicación de resina epóxica ProGlass a la fibra de carbono 3K mediante un sistema de mangueras que transporta la resina desde un

contenedor hasta el interior de la bolsa donde se encuentra la fibra para ser impregnada (ver figura 3.5).

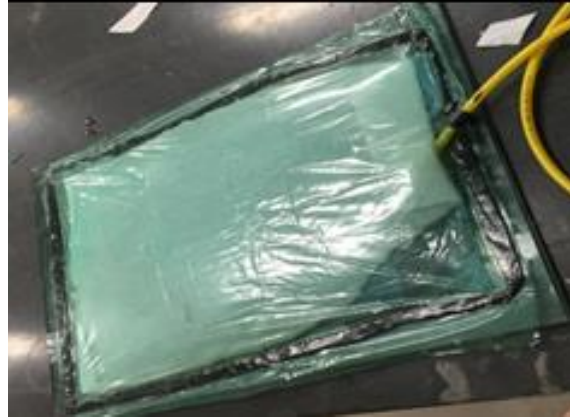


Figura 3.5. Laminado envuelto en bolsa de vacío.

Después de un lapso de 48 horas que fue el tiempo que se dejó curar la resina epóxica, se retiró la bolsa de vacío del laminado dónde se obtuvo un resultado como el que se muestra en la figura 3.6.



Figura 3.6. Vista posterior del laminado final.

Una vez curada la resina se prosiguió a dimensionar (ver figura 3.7 (a)) y a cortar las probetas utilizando como referencia las dimensiones que establece la norma ASTM D7264 para materiales compuestos sometidos a pruebas de flexión.

Posterior a la obtención del laminado se procedió a utilizar una sierra de banco, con un disco liso para realizar el corte de las probetas para las pruebas de flexión y así no dañar el

tejido, podemos observar las probetas en la figura 3.7 (b) y las especificaciones de la sierra de corte en la tabla 3.5.

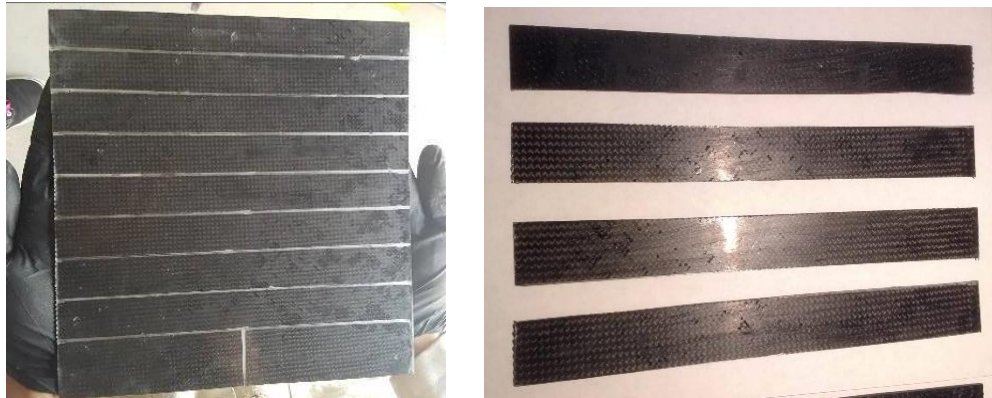


Figura 3.7. (a) Probetas dimensionadas, (b) probetas cortadas.

Tabla 3.5. Especificaciones de la sierra de corte utilizada para las probetas (*Brands et al., 2015*).

SIERRA DE CORTE	
Velocidad	3500 rpm
Potencia	550 W

3.1.2.3 Normativas utilizadas.

3.1.2.3.1 ISO (Organización Internacional de Normalización)

ISO (la Organización Internacional de Normalización) es una federación mundial de organismos nacionales de normalización (organismos miembros de ISO). El trabajo de preparación de Normas Internacionales normalmente se lleva a cabo a través de comités técnicos de ISO. Cada organismo miembro está enfocado en un tema para el cual se ha establecido un comité técnico que lo representa. Las organizaciones internacionales, gubernamentales y no gubernamentales, en colaboración con ISO, también participan en el trabajo. ISO colabora estrechamente con la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en todos los asuntos de normalización electrotécnica. Los proyectos de normas internacionales aprobados por los comités técnicos se distribuyen a los órganos miembros para votación. La

publicación como Norma Internacional requiere la aprobación de al menos el 75% de los organismos miembros que emiten (ISO. 1998).

- ISO 14125 Compuestos plásticos reforzados con fibra – Determinación de propiedades de flexión.

Los ensayos de flexión son una parte importante del proceso de caracterización de cualquier material debido a que estos ensayos proporcionan una valiosa información sobre cómo estos materiales se van a comportar en condiciones reales. Especialmente en materiales compuestos, muy utilizados en aplicaciones aeroespaciales, automotriz y energéticas es crítico conocer cuánto podrá flexionarse un material manteniendo su rigidez. La norma ISO 14125 describe el proceso para determinar las propiedades de flexión a tres o cuatro puntos de materiales compuestos reforzados con fibras (ISO 14125. 1998).

- ISO 178 Ensayos de flexión para plásticos.

El ISO 178 cubre la determinación de las propiedades de flexión de los plásticos reforzados y no reforzados, incluidos los compuestos de alto módulo y los materiales aislantes eléctricos en forma de barras rectangulares moldeadas directamente o cortadas a partir de láminas, placas o formas moldeadas. Estos métodos de prueba son generalmente aplicables tanto a materiales rígidos como semirrígidos. ISO 178 utiliza un sistema de carga de tres puntos aplicado a un haz simplemente compatible.

Las propiedades de flexión según lo determinado por estos métodos de prueba son especialmente útiles para el control de calidad y propósitos de especificación (Touchstone. 2015).

3.1.2.3.2 ASTM (Sociedad Americana de Pruebas en Materiales)

ASTM International es un líder mundialmente reconocido en el desarrollo y la entrega de estándares de consenso voluntarios. Hoy en día, más de 12,000 normas de ASTM se

utilizan en todo el mundo para mejorar la calidad de los productos, mejorar la salud y la seguridad, fortalecer el acceso al mercado y el comercio, y aumentar la confianza del consumidor.

Los estándares de ASTM International son las herramientas de satisfacción del cliente y competitividad para las empresas en una amplia gama de mercados. A través de más de 140 comités técnicos de redacción de normas, atendemos a una amplia gama de industrias: metales, construcción, petróleo, productos de consumo y muchas más. Cuando nuevas industrias, como la nanotecnología, la fabricación aditiva y la biotecnología industrial, buscan avanzar en el crecimiento de tecnologías de vanguardia a través de la estandarización, muchas de ellas llegan a ASTM International. Las normas de ASTM son pasaportes para una estrategia comercial global exitosa. Nuestros estándares de alta calidad y relevantes para el mercado, desarrollados de acuerdo con los principios rectores de la Organización Mundial del Comercio, impulsan el comercio al abrir nuevos mercados y crear nuevos socios comerciales para empresas de todo el mundo. Para las empresas que van desde los líderes de Fortune 500 hasta las nuevas empresas emergentes, nuestros estándares ayudan a nivelar el campo de juego para fomentar la competencia en la economía global. La tabla 3.6 nos muestra las normas utilizadas para la manufactura y pruebas dentro de esta investigación.

Tabla 3.6. Normas utilizadas a lo largo de la investigación.

NÚMERO	NOMBRE
ASTM D7264	Método de pruebas estándar para propiedades de flexión de materiales compuestos de matriz polimérica.
ASTM D3878	Terminología estándar para materiales compuestos.

- **ASTM D7264 Método de pruebas estándar para propiedades de flexión de materiales compuestos de matriz polimérica.**

Este método de prueba determina la rigidez a la flexión y las propiedades de resistencia de los compuestos de matriz polimérica.

Para obtener una resistencia a la flexión válida, es necesario que la falla de la muestra se produzca en cualquiera de sus superficies externas, sin una falla de corte interlaminar precedente o una falla por aplastamiento debajo de un soporte o nariz de carga. Fracaso en la superficie de tensión puede ser una grieta mientras que la superficie de compresión puede ser pandeo local. El pandeo puede manifestarse como microfibramiento de la fibra o pandeo del nivel de la capa. El pandeo a nivel de capa puede resultar en, o estar precedido por, de laminación de la capa exterior (ASTM international).

3.1.2.4 Modos de falla.

Para saber que se tiene un resultado válido en una prueba de flexión, es necesario que la falla ocurra en cualquier superficie de la probeta sin una falla precedente o una falla por aplastamiento de los soportes de la máquina. Para clasificar los diferentes tipos de falla que pueden ocurrir la ASTM D7264 posee códigos de identificación de fallas donde se revisa el modo, área, y ubicación de la falla en cada probeta. A continuación la figura 3.8 muestra los códigos de identificación de probetas en pruebas de flexión.

Primer caracter		Segundo caracter		Tercer caracter	
Modo de falla	Código	Área de falla	Código	Locación de la falla	Código
Tensión	T	En la punta de carga	A	Arriba	T
Compresión	C	Entre extremos de carga	B	Abajo	B
Pandeo	B	En el área de soporte	S	Izquierda	L
Corte interlaminar	S	Entre el área de carga y la punta de soporte	L	Derecha	R
Modo múltiple	M(xyz)	Desconocido	U	En medio	M
Otro	O			Varios	V
				Desconocido	U

Figura 3.8. Códigos de identificación para pruebas de flexión.

3. ASTM D3878 Terminología estándar para materiales compuestos.

Estas definiciones abarcan términos genéricos, incluidos los términos de importancia comercial, que aparecen en una o más normas sobre materiales compuestos que contienen fibras de alto módulo (más de 20 GPa). (ASTM international).

Las definiciones cubren, en la mayoría de los casos, los significados especiales utilizados en la industria de los materiales compuestos. No se ha intentado incluir significados comunes de los mismos términos que se usan fuera de la industria de los compuestos.

3.1.2.5 Pruebas de flexión

El estándar de la ASTM D7264 “Método de prueba estándar para propiedades de flexión de materiales compuestos de matriz polimérica” fue utilizado para las pruebas de flexión realizadas a las probetas, donde obtuvimos las dimensiones, número de probetas, velocidad utilizada, tipo de máquina, procedimiento y cálculos.

Se utilizó la máquina universal para pruebas Shimadzu AG-IC1000 kN (ver figura 3.9) para las pruebas de flexión, las tecnologías de alto nivel que incorporan precisión, electrónica, control, óptica, sensores y procesamiento de información se concentran en estas máquinas de prueba e inspección, produciendo el sistema de evaluación más adecuado para el objetivo de uso. (Shimadzu, 2018)



Figura 3.9. Máquina de pruebas universales de precisión Shimadzu AG-IC 1000 kN. (Shimadzu, 2018).

La tabla 3.7 muestra las propiedades de la máquina de pruebas universales que puede utilizarse para diversos tipos de pruebas dependiendo de los resultados que deseen obtenerse. Gracias a estos datos podemos saber si este tipo de máquina en específico es factible para las pruebas que deseamos realizar.

Tabla 3.7. Especificaciones de máquina universal de pruebas utilizada. (Shimadzu, 2018).

MODELO	AG-IC 100 kN
Capacidad de carga máxima	100 kN
Precisión de fuerza en pruebas	Entre $\pm 0.5\%$ de la fuerza indicada en la prueba
Velocidad de prueba (mm/min)	De 0.0005 mm/min a 1000 mm/min

La máquina de pruebas universales se utiliza mediante el software TRAPEZIUM que se observa en la figura 3.10, el software nos permite introducir datos como peso, dimensiones, número de probetas y material utilizado para posteriormente crear gráficas del comportamiento del material utilizado durante la prueba, así como los valores máximos y mínimos obtenidos.

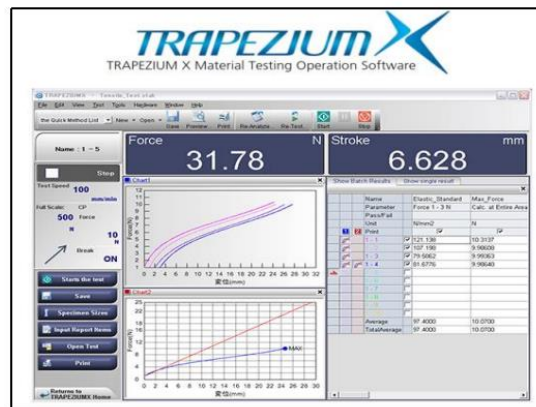


Figura 3.10. Software Trapezium utilizado en la máquina de pruebas universales para las pruebas de flexión (Shimadzu, 2018).

Se tomaron las dimensiones de cada una de las probetas teniendo un total de 6 para la caracterización del laminado. En la tabla 3.8 se encuentran los datos de las probetas (ver figura 3.11). Se numeró cada una de las probetas para poder identificarlas y se colocó una línea en el centro y en los límites de la zona de pruebas.

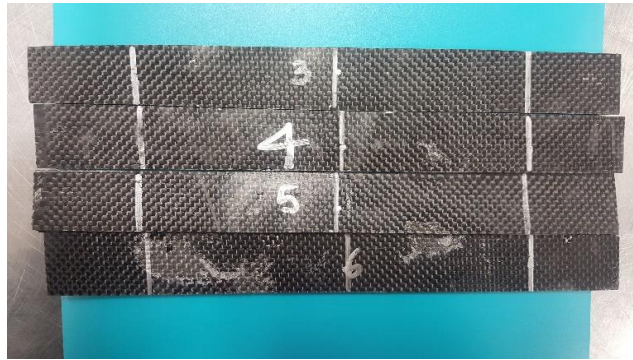


Figura 3.11. Probetas para pruebas de flexión.

Tabla 3.8. Concentrado dimensional de las probetas.

PROBETA	ESPEJOR mm [in]	ANCHO mm [in]	LONGITUD mm [in]	ÁREA mm [in]
1	3.048 [0.120]	27.190 [1.070]	164.84 [6.49]	82.78 [0.128]
2	3.098 [0.122]	27.914 [1.099]	167.48 [6.594]	86.47 [0.134]
3	2.946 [0.116]	25.984 [1.023]	165.58 [6.519]	76.54 [0.118]
4	3.106 [0.122]	26.365 [1.038]	165.83 [6.52]	81.88 [0.126]
5	2.750 [0.108]	26.924 [1.06]	166.52 [6.556]	74.04 [0.114]
6	2.641 [0.104]	26.797 [1.055]	171.45 [6.75]	70.77 [0.109]

Con los datos que mostrados en la tabla 3.6 se pude obtener el esfuerzo máximo de flexión en cada una de ellas gracias a las ecuaciones proporcionadas en el apartado 1.3 de la norma ASTM D7264 (*ASTM International, 2007*), el cual nos dice que el esfuerzo máximo puede ser calculado en cualquier punto de la curva esfuerzo-deformación por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma = (3PL)/(4bh^2) \dots \dots \dots \text{(Ec. 4)}$$

Dónde σ es el esfuerzo en la superficie exterior en la región del área de carga, P es la fuerza aplicada (N), L el área de apoyo (mm), b el ancho de la probeta (mm), y h el grosor de la probeta (mm).

La norma ASTM D7264 nos muestra en la figura 3.12 el diagrama del comodo de los soportes de apoyo y de carga utilizados para una prueba de flexión en 3 puntos. (*ASTM D7264, 2007*).

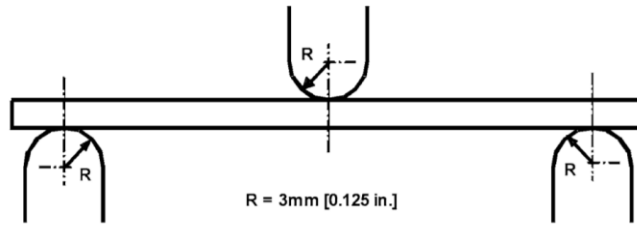


Figura 3.12. Diagrama de los soportes en una prueba de flexión. (ASTM D7264, 2007).

Al colocar el equipo para pruebas de flexión se realizó una calibración para obtener resultados correctos, posteriormente se colocó la probeta no. 1 (ver figura 3.13) y se comenzó la prueba donde se habían ingresado los datos de las probetas en la computadora anteriormente, así como la velocidad establecida en la norma que es de 1mm/min [0.5 in/min].



Figura 3.13. Probeta colocada para ensayo de flexión.

Una vez que comienza la prueba la carga comienza a descender y al primer contacto con la probeta la máquina de pruebas universales junto con el software comienza a recopilar datos del comportamiento del material durante la prueba. Ya que la fuerza comienza a disminuir nos indica que la probeta se ha fracturado y es momento de retirarla (ver figura 3.14) y colocar la siguiente.

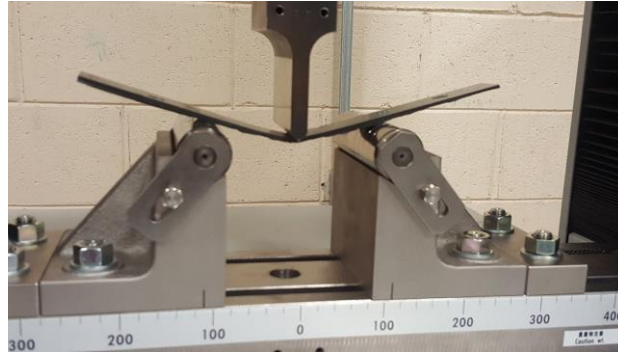


Figura 3.14. Ensayo de flexión en proceso.

Aun cuando se utiliza el mismo material en las probetas la ruptura de estas puede ser diferente en cada una, la figura 3.15 a y b nos muestran la de laminación que ocurrió en la probeta no. 1 al momento de llegar a su esfuerzo máximo cuando todavía se encontraba colocada en los puntos de soporte.



(a)

(b)

Figura 3.15. De laminación en probeta (a) zona de prueba (b) acercamiento a zona de de laminación.

La figura 3.16 por otro lado nos muestra la misma probeta de la figura 3.15 una vez que fue removida de la máquina. Podemos observar en la probeta pequeñas líneas blancas causadas por la fractura de la resina epóxica al momento de llegar a su máximo esfuerzo.



Figura 3.16. Fractura en probeta.

El pandeo a nivel de capa puede resultar en, o estar precedido por de laminación de la capa exterior, como lo menciona la norma ASTM D7264 (2007). En la figura 3.17 podemos observar la probeta 6 que resultó con el mayor nivel de pandeo.



Figura 3.17. Probeta 6 posterior al ensayo.

En esta etapa se propuso como determinar las propiedades mecánicas de las probetas de material compuesto en un laminado de 6 capas con orientación $[0^\circ \pm 90^\circ]$ mediante pruebas de flexión bajo la norma ASTM D7264, también se describió el método para clasificar en función de la ruptura de las probetas su modo de falla en cada una de ellas.

En la siguiente etapa se mostrará la manufactura de la horquilla.

3.1.3 ETAPA III: Fabricación de la horquilla.

Para la realización de la propuesta de manufactura de la horquilla, se evaluaron previamente los procesos, métodos y materiales que conllevaba la fabricación de una pieza de este tipo y, en base a ellos se decidió proponer mejoras con la finalidad de manufacturar una pieza funcional en un menor tiempo y con una reducción de costos.

A) Fabricación de modelo.

Una vez realizados los bocetos de la horquilla se generaron los modelos tridimensionales en el software de ingeniería SolidWorks con la finalidad de dimensionar y parametrizar la geometría. La parametrización permite realizar modificaciones de la geometría de manera más eficiente disminuyendo el tiempo de diseño.

En esta etapa se muestra la metodología a seguir de una manera más detallada, ya que se desarrollan dimensiones e instrumentos agregando imágenes para tener una idea más clara de la transformación de los planos hasta la horquilla de fibra de carbono y resina epóxica.

Diseño en software SolidWorks.

Se inició con la creación de un modelo por medio del software paramétrico SolidWorks para observar las dimensiones y forma de la pieza propuesta, se observa en la figura 3.18 en 3D.

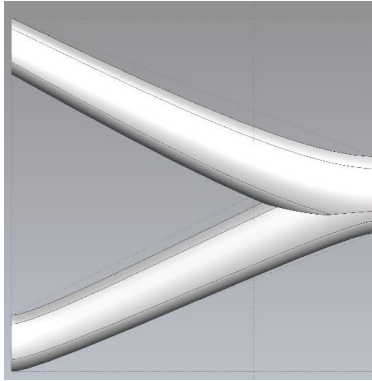


Figura 3.18. Modelo creado en SolidWorks

Una vez terminado el modelo se seleccionó el material (en este caso fibra de carbono) y se obtuvo una vista renderizada como la que se muestra en la figura 3.19 para tener una muestra de cómo se vería la pieza una vez terminada.



Figura 3.19. Pieza en 3D con fibra de carbono.

Posteriormente se prosiguió a convertir el modelo en 3D a un plano (ver figura 3.20) para poder ser impreso en tamaño real y obtener las dimensiones reales de la pieza.

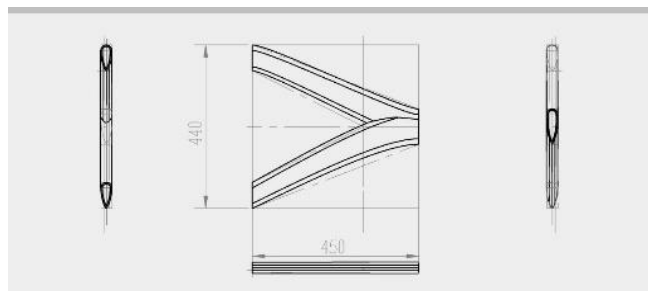


Figura 3.20. Plano de la horquilla.

Impresión de los planos.

Se realizó la impresión de los planos de la horquilla que se muestran en la figura 3.21 a tamaño real para ser utilizados como base en la fabricación del molde.

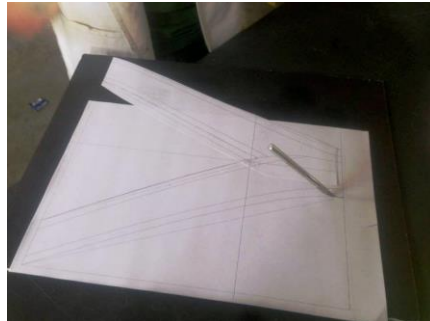
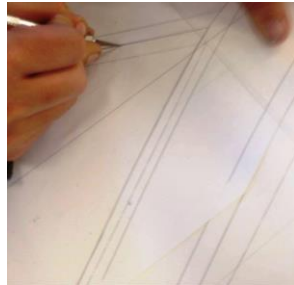


Figura 3.21. Planos impresos para creación de modelo.

Los planos impresos fueron recortados (ver figura 3.22 (a)) tratando de que los cortes fuesen lo más exactos posibles para evitar alteraciones en la geometría y dimensiones de la pieza. En la figura 3.22 (b) podemos observar en los planos los perfiles que se colocarán en el centro de la horquilla para definir su grosor.



(a)



(b)

Figura 3.22. (a) Recorte de planos y (b) perfiles de la horquilla.

En la figura 3.23 podemos observar el plano de la horquilla recortado por completo. En la parte posterior del plano se adhirió una base de cartón para darle firmeza y que no sufriera algún daño en los próximos procesos a los que sería sometido.



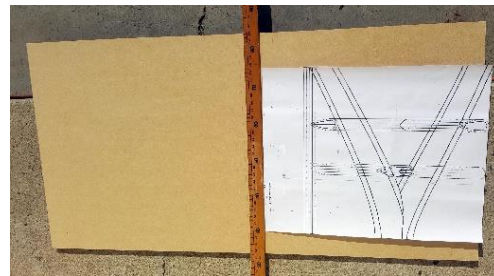
Figura 3.23. Unión de plano y superficie de cartón para una mayor rigidez.

Manufactura.

Se utilizó madera MDF de 1.27 cm como se muestra en la figura 3.24 (a) para realizar el primer modelo, ya que su grosor era muy pequeño se prosiguió a tomar medidas como en la figura 3.24 (b) y recortar un cuadrado con el espacio suficiente para la horquilla, finalmente se unieron dos piezas de madera obteniendo el grosor deseado de 2.54 cm en base a los perfiles de la horquilla recortados previamente del plano.



(a)



(b)

Figura 3.24. (a) Madera MDF de 1.27 cm, (b) medición del MDF.

Debido a la complejidad y exactitud de la geometría se utilizó una cortadora manual tomando como base los planos y adhiriéndolos a la madera MDF, dónde posteriormente se cortó la forma de la horquilla y de los perfiles en el MDF como se muestra en la figura 3.25 a y b.

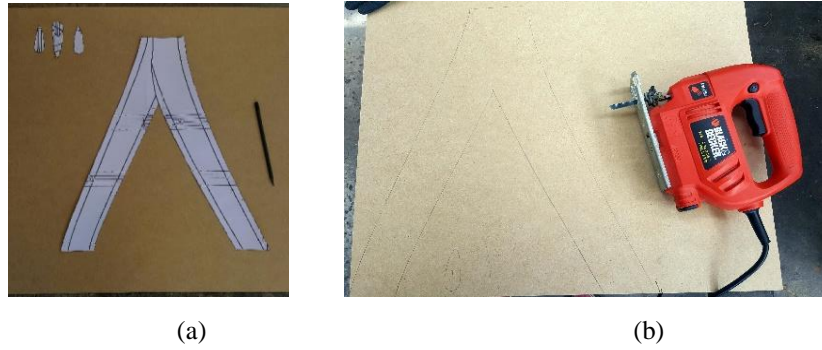


Figura 3.25. Plantillas de la horquilla (a) sobre MDF, (b) recorte de MDF.

Una vez recortada la horquilla en base a la plantilla en el MDF, se obtuvo la pieza que se observa en la figura 3.26, la cual posee las dimensiones deseadas.



Figura 3.26. Horquilla recortada en MDF.

Se colocaron los perfiles previamente recortados para definir el grosor de la horquilla en cada extremo (2 en la parte superior y 1 en la parte inferior) y el plano de la horquilla entre ellos para conocer las medidas de la pieza (ver figura 3.27).

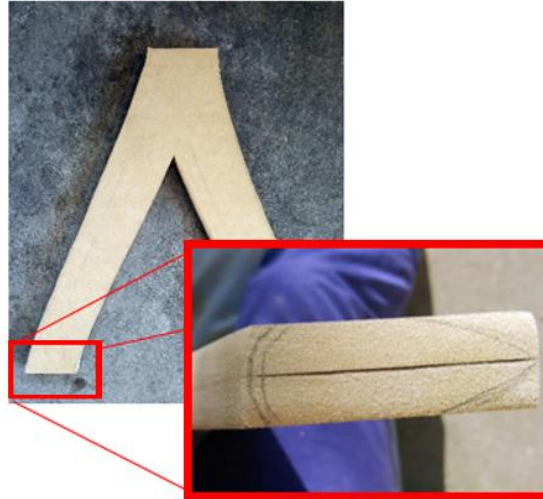


Figura 3.27. Trazo de perfiles en la horquilla.

Ya que se definió el grosor de la pieza con un marcador se comenzó a lijar los bordes del modelo con las medidas de los perfiles ubicados en los extremos como muestra la figura 3.28.



Figura 3.28. Pieza de MDF en proceso de lijado.

Se utilizó una lijadora de banda para acelerar el proceso de lijado y posteriormente se inició un proceso de lijado manual con diferentes tamaños de grano para obtener una superficie lo menos porosa posible. Al terminar de lijar los bordes se utilizó una lija No.220 para que se obtuviera una pieza con superficie suave, la cual se puede observar la figura 3.29.

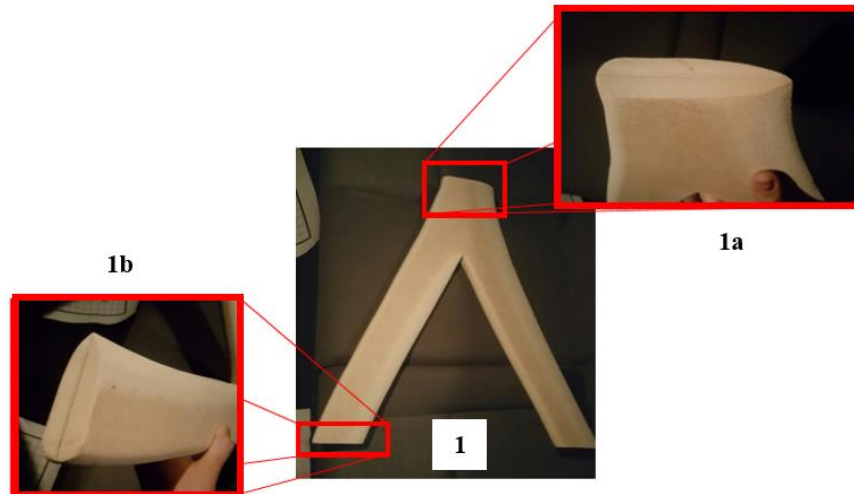


Figura 3.29. a) Vista frontal, b) vista de los extremos del modelo posterior al proceso de lijado.

Al obtener completamente lijado el modelo, se agregó una capa de pegamento para sellar la superficie (ver figura 3.30) y no estuviera porosa.

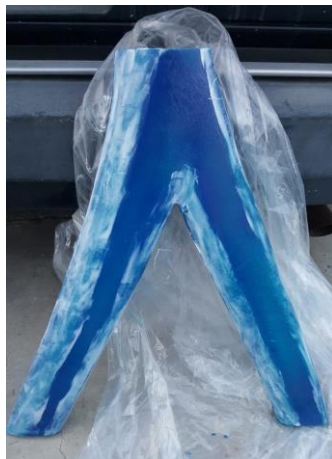


Figura 3.30. Modelo con pegamento.

Al secarse por completo el pegamento se agregaron 5 capas de pintura acrílica en aerosol al modelo. Las capas se colocaron esperando que se secase por completo la primera capa para añadir la segunda y así sucesivamente (figura 3.31) hasta colocar las 5 capas.



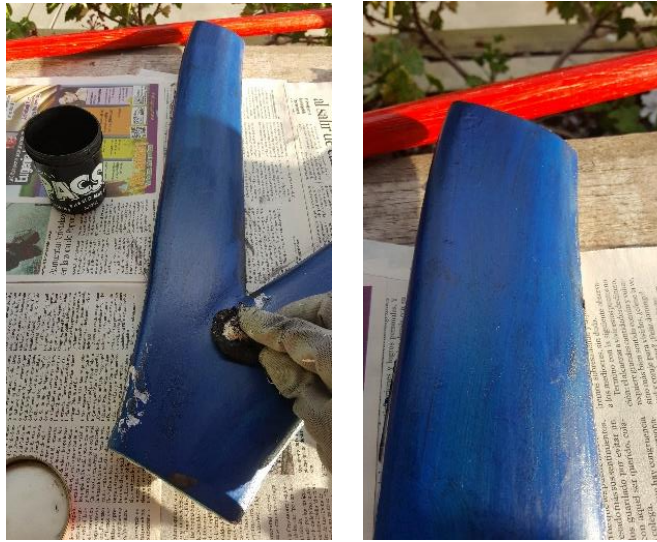
Figura 3.31. Modelo con pintura acrílica en aerosol.

Una vez que la pintura se encontraba seca por completo se le dio un acabado al modelo con una lija fina para remover el exceso de pintura y pegamento y obtener una superficie uniforme como la mostrada en la figura 3.32. La importancia de una superficie uniforme se debe a que sobre esta superficie se fabricará el molde de la pieza final, por lo que si el modelo presenta irregularidades en la superficie éstas estarán presentes también en el molde.



Figura 3.32. Modelo lijado.

Después de pintar y lijar el modelo se añadió con estopa una capa gruesa de cera en toda la superficie, la cual fue utilizada como desmoldante, la cual se observa en la figura 3.33 (a) y (b)).



(a)

(b)

Figura 3.33. Modelo (a) aplicación de cera (b) molde cubierto.

B) Fabricación del molde.

Cuando el modelo estaba cubierto por completo se utilizó una relación de 1L de gel coat con 0.235L de secante, ésta relación fue establecida por el fabricante. El gel coat utilizado se muestra en la figura 3.34.



Figura 3.34. Relación de gel coat-secante a utilizar.

Ya que se conoció la relación de mezcla a utilizar, se aplicó gel coat sobre el modelo con la ayuda de una brocha dejando una capa gruesa que cubra por completo el modelo como se observa en la figura 3.35.

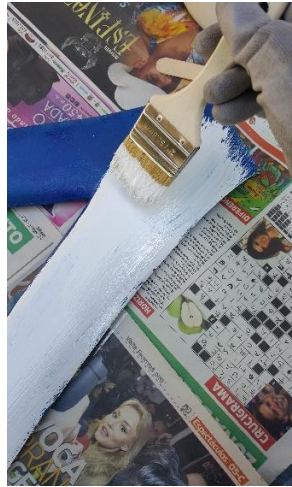


Figura 3.35. Aplicación de gel coat en modelo.

Aplicación de fibra de vidrio y resina de poliéster.

Durante el tiempo de secado del gel coat se recortó la fibra de vidrio utilizando cinta adhesiva y un marcador para delinear el contorno del modelo (figura 3.36). La cinta adhesiva se colocó en los extremos de la fibra para que al momento de cortar el tejido no sufriera un daño.

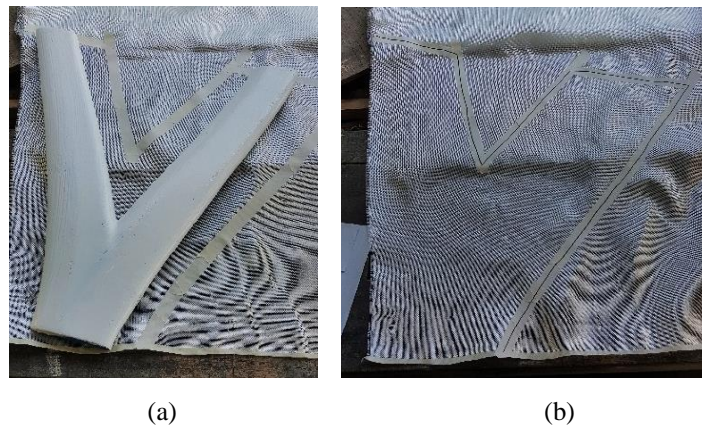


Figura 3.36. Preparación del modelo para el molde (a) aplicación de cinta adhesiva, (b) delimitado con marcador.

Al recortar los trazos se obtuvo un total de 6 plantillas de fibra de vidrio para las 3 capas que se aplicarán al modelo como muestra la figura 3.37 a y b).

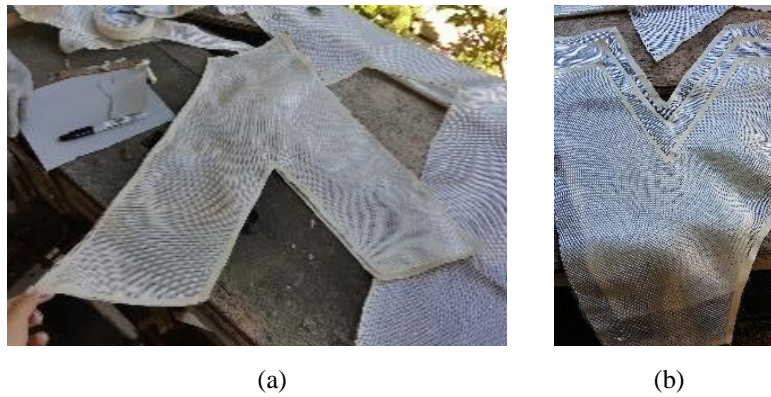


Figura 3.37. Fibra de vidrio (a) recortada, (b) capas requeridas.

Se utilizó una relación de resina poliéster-secante de .946 L por .125 ml para conocer la cantidad a utilizar (ver figura 3.38), la cual fue establecida por el fabricante. Se realizó una prueba antes de utilizarla sobre el modelo para conocer su tiempo de curado, las pruebas se llevaron a cabo en contenedores de plástico y se utilizaron guantes de nitrilo para evitar el contacto directo de la resina y secante directamente con la piel.



Figura 3.38. Resina poliéster y secante.

Una vez que se conoció el tiempo de curado se incorporó la resina y el secante en un contenedor plástico y se mezcló hasta que fuera homogénea (ver figura 3.39), ésta fue utilizada en la fabricación del molde.



Figura 3.39. Mezcla de resina y secante.

Posteriormente se colocó la fibra de vidrio sobre el modelo y se incorporó resina poliéster con una brocha cuidando el no dañar el tejido y esparciendo la resina por la superficie superior (figura 3.40). Al finalizar la aspersion de resina se utilizó sobre la fibra un rodillo de metal para remover el exceso de resina y tener el grosor de resina más uniforme posible.



(a)

(b)

Figura 3.40. Modelo de MDF, (a) colocación de fibra de vidrio, (b) aplicación de resina.

El tiempo de espera para que la resina curara por completo fue de 24 horas. La figura 3.41 muestra resultado del molde curado completamente sobre el modelo.



Figura 3.41. Molde de fibra de vidrio curado.

Desmolde y acabado.

Una vez curado el molde (figura 3.42 (a)) se continuó desmontar el modelo tirando de los extremos de manera uniforme para no dañarlos como muestra la figura 3.42 (b) y (c).

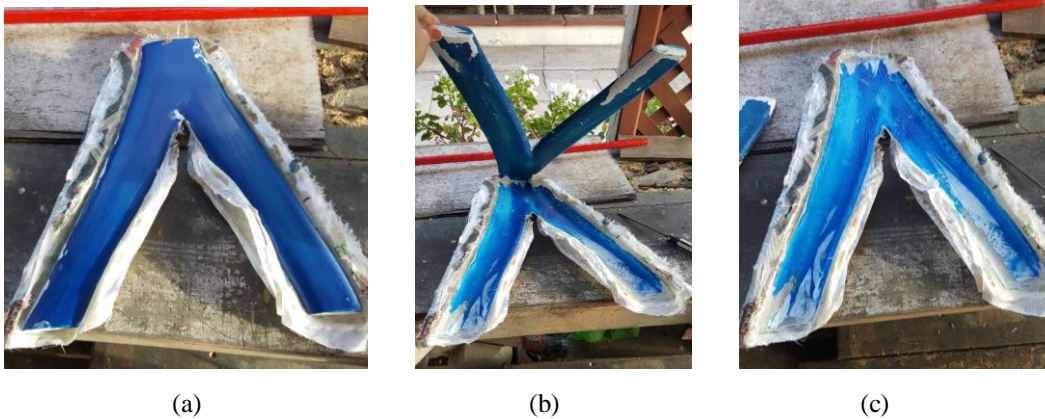


Figura 3.42. (a) Vista frontal posterior del modelo, (b) desmolde del modelo, (c) molde de la horquilla.

Posterior al desmoldar el modelo con una lija no. 220 y 330 se lijó la superficie interior del molde para remover cualquier imperfección que pudiera tener, (ver figura 3.43) y eliminar residuos de resina y fibra.



Figura 3.43. Molde lijado con superficie uniforme.

Una vez desprendidos los dos moldes, se prosiguió a delimitar con un marcador los bordes como se observa en la figura 3.44.



Figura 3.44. Delineado de bordes con marcador.

Se utilizó un Dremel® con punta de disco para obtener cortes uniformes desbastando el exceso de fibra de vidrio de los moldes, esto es para que al momento de unirlos sellen completamente y no se presenten irregularidades en la unión de ambos. El corte se muestra en la figura 3.45.



Figura 3.45. Remoción de material sobrante en el molde.

C) Fabricación del prototipo de la horquilla.

Ya que el molde estaba terminado se comenzó con las pruebas de la resina epóxica (ver figura 3.46) para asegurar que la relación a utilizar era la correcta. La relación a utilizar varía dependiendo de la resina y secante que se está utilizando.



Figura 3.46. Resina epóxica utilizada.

En la figura 3.47 (a) se puede observar la prueba de resina epóxica-secante en el recipiente de mayor tamaño se encontraba la resina epóxica mientras que en el pequeño se encontraba el secante. Mientras que la figura 3.47 (b) se muestra la resina epóxica una vez transcurridas 48 horas dónde ya había concluido el proceso de curado. Se puede observar el cambio en el color y la deformación que sufrió el recipiente plástico debido al aumento de temperatura de la mezcla durante el proceso de curado.



(a)



(b)

Figura 3.47. Prueba de resina epóxica con secante (a) al momento de la mezcla, (b) una vez finalizado el proceso de curado.

La fibra de carbono 3K con tejido bidireccional utilizada en la pieza final y probetas se muestra en la figura 3.48.



Figura 3.48. Fibra de carbono 3K.

Corte de fibra de carbono.

Se cubrió el modelo con una bolsa de plástico mayor al tamaño de este para crear una plantilla y así proseguir a cortar las 6 capas con la misma orientación $[0^\circ \pm 90^\circ]$ del laminado de fibra de carbono, podemos observar el proceso en la figura 3.49.



Figura 3.49. Colocación de plástico sobre modelo.

Posteriormente con un marcador se dibujó el contorno del modelo sobre el plástico y se recortó (figura 3.50).



Figura 3.50. Plantilla para fibra marcada y sobre el molde.

Se continuó colocando las plantillas de plástico sobre la fibra de carbono para delinear el borde de ésta con cinta adhesiva sobre la fibra para no dañar el tejido al momento de recortar basándonos en ellas al momento de recortar, como observamos en la figura 3.51.

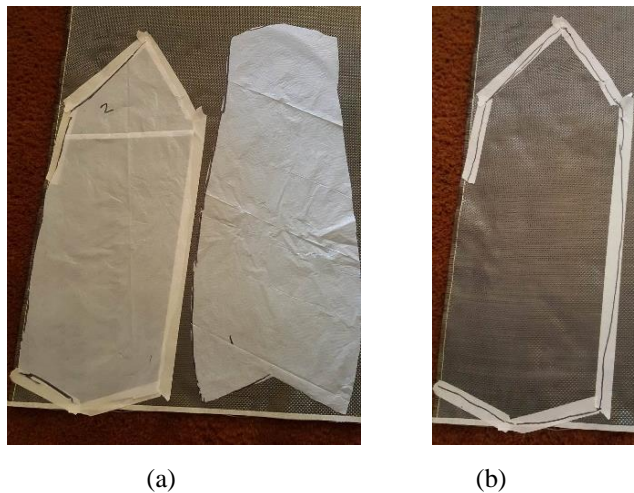


Figura 3.51. (a) Colocación de plantillas sobre fibra de carbono, (b) delimitado de plantillas con cinta adhesiva.

En este proceso se inició con la mezcla de resina epóxica y secante en un recipiente de plástico como se observa en la figura 3.52.

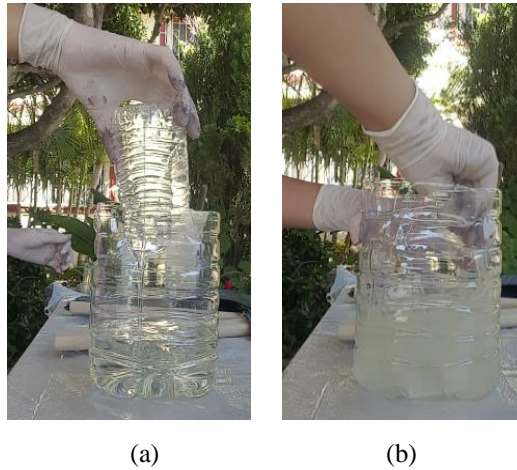


Figura 3.52. Mezcla de resina epóxica con secante (a) vaciado de secante sobre resina, (b) mezclado de ambas sustancias.

Impregnación manual de la fibra.

Una vez mezclada la resina se continuó a remover la cinta adhesiva de las plantilla de fibra de carbono. Posteriormente se colocó la fibra de carbono sobre el modelo y se vertió con la ayuda de una brocha y rodillo de metal la resina epóxica de manera cuidadosa para no dañar el tejido como se muestra en la figura 3.53 (a) y (b) respectivamente.

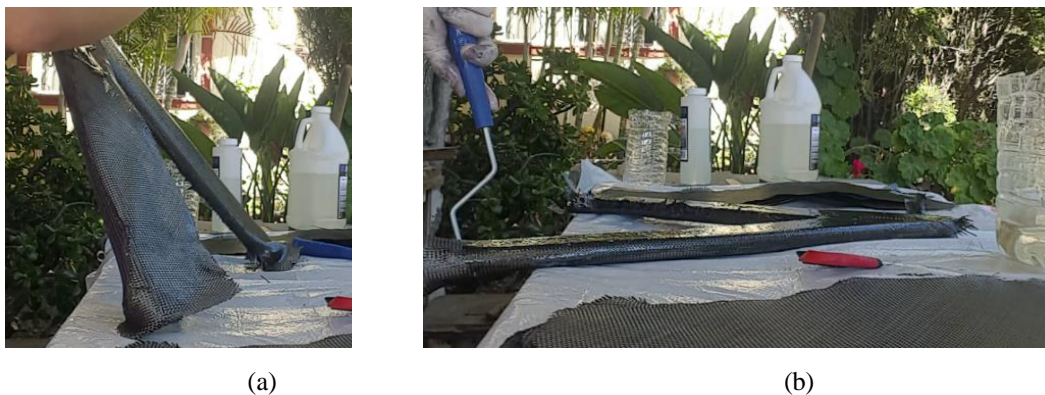


Figura 3.53. Aplicación de resina epóxica sobre fibra de carbono (a) con brocha, (b) con rodillo.

La figura 3.54 nos muestra el modelo con las 5 capas de fibra de carbono.



Figura 3.54. Modelo al finalizar la aplicación de fibra de carbono y resina epóxica.

Compactación con molde.

Al encontrarse terminado el laminado simétrico de 6 capas se colocó el modelo en el molde. En la figura 3.55 se expone el molde con prensas en C que lo mantuvieron cerrado por completo por la presión aplicada. Se utilizaron un total de 5 prensas a lo largo del molde para obtener una pieza con un grosor de resina lo más uniforme posible.



Figura 3.55. Molde con prensas en C.

Curado y desmolde.

Al sellar el molde se dejó transcurrir un lapso de 48 horas a un temperatura ambiente de 22° C para que finalizara el proceso de curado de la resina epóxica. Para comenzar el proceso

de extracción de la pieza en el molde, podemos observar en la figura 3.56 la pieza removida. Posteriormente se retiró el molde de la pieza con cuidado de no dañarla. Los círculos rojos nos muestran las áreas donde la resina se encontraba en menor cantidad, por lo que su espesor es menor al de las demás áreas.

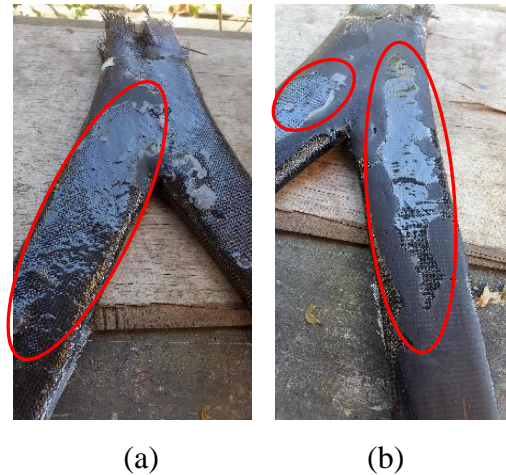


Figura 3.56. Pieza removida (a) vista frontal, (b) vista posterior.

Rectificado de modelo.

Para este proceso se inició agregando una ligera capa de aceite W-40 a la pieza y lijando con hojas grado 80, 100, 220 y 300 sucesivamente para remover el excedente de resina y las burbujas creadas por esta. Se utilizó una lijadora manual para acelerar el proceso (figura 3.57).

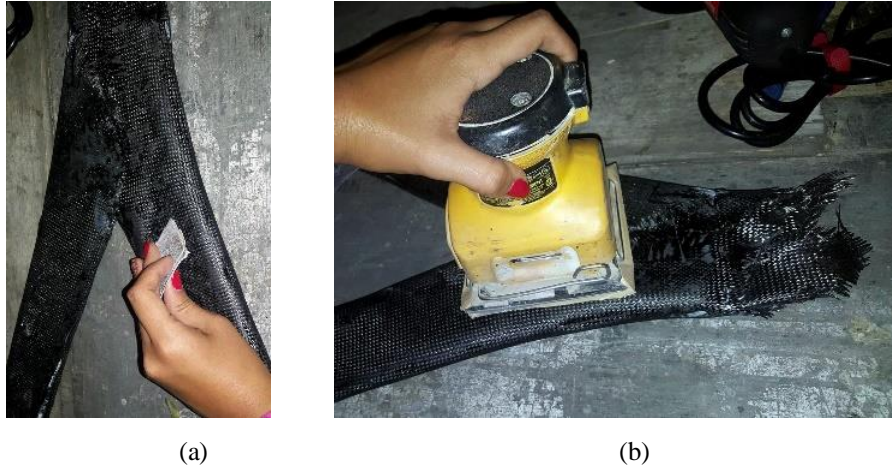


Figura 3.57. Proceso de lijado para eliminar exceso de resina en la pieza (a) manual, (b) con la ayuda de lijadora manual.

Posteriormente con una amoladora angular se recortaron los sobrantes de fibra de carbono y resina epóxica de los extremos superior e inferior de la pieza como se muestra en la figura 3.58.



Figura 3.58. Recorte de excedentes en la pieza.

Finalmente se aplicó una capa de aceite W-40 a la pieza para otorgar un mejor acabado eliminado con un trozo de estopa limpia el excedente (ver figura 3.59).



Figura 3.59. Prototipo de horquilla finalizado.

Dentro de ésta etapa se desarrolló el método de manufactura y materiales utilizados para la fabricación del modelo, molde y prototipo de una horquilla para un monoplace de Formula 1 dónde se utilizó el mismo laminado de las probetas mostradas en la etapa II, a continuación en la etapa IV se desarrollaron los resultados para tener una caracterización del material sometido a esfuerzo de flexión.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y

RESULTADOS

4.1 ETAPA IV: Análisis y resultados.

En esta sección comienza la etapa IV, se desarrollaron y analizaron los resultados obtenidos en el prototipo fabricado de una horquilla de acuerdo a la manufactura propuesta que se utilizó en las probetas sometidas a pruebas de flexión.

Para el análisis de materiales compuestos se utilizó la ecuación descrita en el capítulo 2, apartado 3.1.2.5, de esfuerzo máximo de flexión de cada una de las probetas para obtener un promedio general.

El esfuerzo máximo analizado por las probetas de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica da un valor promedio de 34.869 MPa, donde la probeta 1 resalta por soportar el esfuerzo máximo, de acuerdo a los resultados de la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Promedio de resultados en probetas.

PROBETA	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [mm]	CARGA MÁXIMA [N]	ESFUERZO MÁXIMO DE FLEXIÓN [MPa]
1	11.687	362.50	44.547
2	14.653	478.12	43.118
3	12.897	393.75	25.455
4	13.126	378.12	38.478
5	12.553	331.25	23.011
6	14.357	506.25	34.608
PROMEDIO	13.212	408.331	34.869

4.1.1 Curva de Esfuerzo-Deformación.

En la curva esfuerzo-deformación obtenida de las pruebas de flexión, las muestras de laminado de fibra de carbono 3K y resina epóxica ProGlass 1300, se observa una superioridad en la probeta 1, tal como se mostró anteriormente en la tabla 4.1.

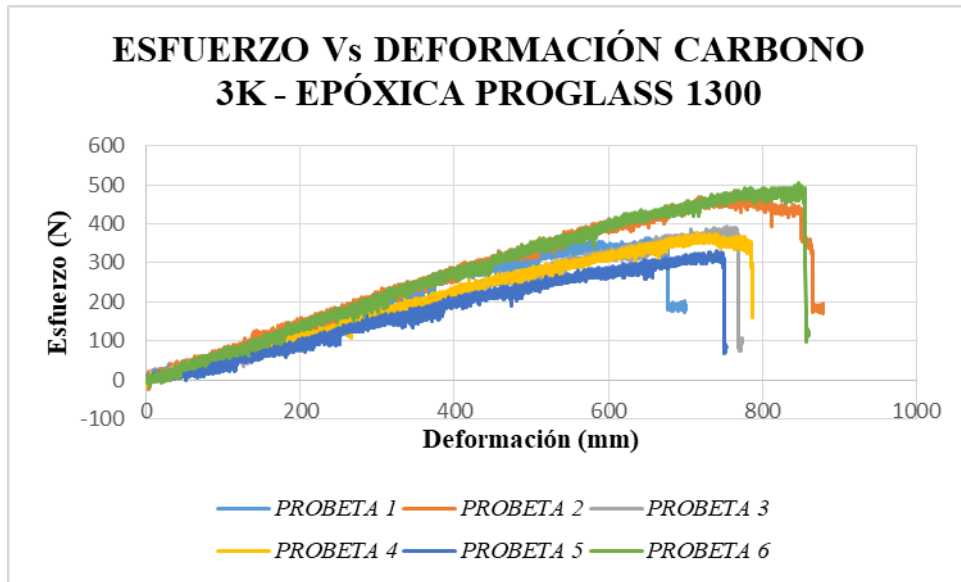
A partir de las gráficas resultantes se pudo observar de una manera más ordenada el comportamiento resultante de las pruebas de cada probeta, dónde se muestra que hubo una variación en la carga aplicada por factores como el grosor y longitud de las probetas.

Realizando una comparación entre los resultados podemos ver que en la probeta 1 en la gráfica 4.1 se tuvo un desplazamiento de 11.266mm con una fuerza aplicada de 365N, mientras que la probeta 2 tiene un desplazamiento de 14.10mm y una fuerza aplicada de 490N. Aunque fueron fabricadas con el mismo material y método de manufactura las dimensiones entre ambas no son exactamente las mismas, ya que en la probeta 1 se tiene un área de 82.78, mientras que en la probeta 2 posee un área de 86.44mm, por lo que podemos deducir que sería muy difícil obtener resultados iguales en cada una de las pruebas por la variación del porcentaje de resina y fibra utilizado en cada probeta.

Las probetas 3, 4 y 5 son las que presentan mayor similitud en tanto a los resultados de esfuerzo obtenidos, podemos verificar en la tabla 3.6 mostrada anteriormente que las áreas de cada una son las que presentan una menor variación de la 6 probetas, lo que apoya nuestra teoría de que mientras menor sea la variación entre los factores de una prueba realizada mayor será la similitud entre sus resultados.

La gráfica 4.1 nos muestra un concentrado de las 6 probetas sometidas a las pruebas de flexión, donde se aprecian las diferencias entre éstas dadas por el desplazamiento y carga aplicados durante la prueba. Teniendo como la probeta que presenta una mayor resistencia a la carga aplicada la número 6 y como la que posee la menor resistencia la número 5, mientras que la probeta 1 muestra la mayor resistencia a esfuerzos de flexión y la probeta número 5 la menor resistencia.

Gráfica 4.1. Comparación de esfuerzos máximos obtenidos de las probetas.



4.1.2 Modos de falla.

Los ensayos de flexión presentaron el tipo de falla en un área determinada a lo largo de la probeta, a continuación se muestra el concentrado del esfuerzo máximo de las fracturas de las probetas en la tabla 4.2 dónde las siglas del apartado de modo de falla hacen referencia a la figura 3.9 del capítulo 2.

Tabla 4.2. Concentrado de resultados de probetas.

PROBETA	DESPLAZAMIENTO [mm]	FUERZA MÁXIMA [N]	ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	MODO DE FALLA
1	11.687	181.25	3812.75	OAL
2	14.653	178.125	29643.75	BAV
3	12.897	100	29561.13	SAR
4	13.126	159.375	27140.78	BAL
5	12.553	84.375	24396.55	SAB
6	14.357	121.875	33520.23	SAV

Las siguientes figuras nos muestran las diferencias que presentó cada probeta posterior a la prueba, teniendo un área y tipo de fractura diferente en cada una, además de una variación

en la fuerza soportada aún cuando los materiales y métodos de manufactura fueron los mismos.

Las probetas mostradas en la figura 4.1(a) desde una vista posterior muestran la línea central de la probeta y dentro de esa área en su mayoría se aprecia el daño por la fractura causada durante las pruebas al momento de llegar a su esfuerzo máximo. Mientras que la figura 4.1 (b) nos muestra la parte frontal de las probetas donde es poco perceptible el daño causado en éstas.

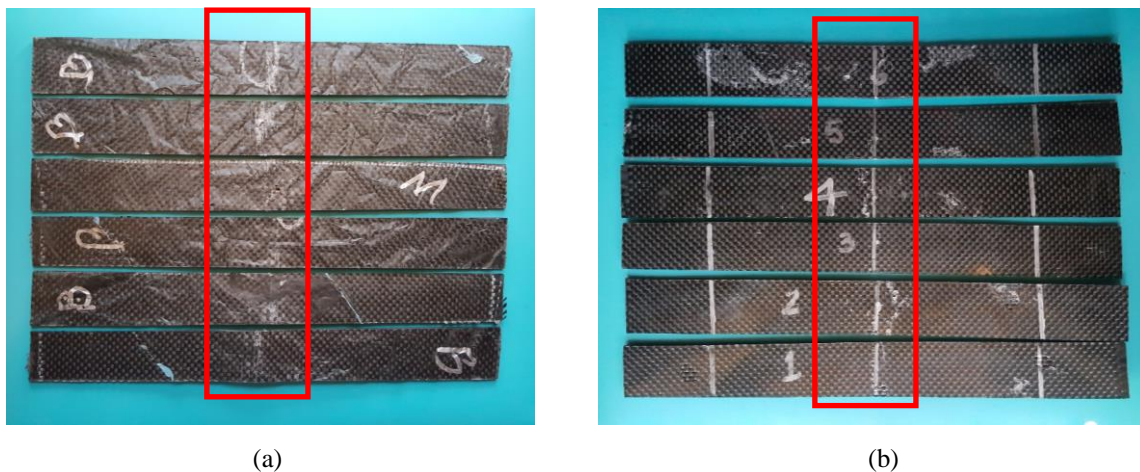


Figura 4.1. (a) Vista posterior de probeta, (b) Vista frontal de probetas.

En la figura 4.2 gracias a la vista lateral de las probetas se puede observar la laminación causada en algunas de ellas al momento de fracturarse en las pruebas de flexión realizadas, esto se debe a que además de la ruptura de la resina epóxica la fibra de carbono también sufrió daños en el laminado, en su mayoría en un ángulo de 90° respecto a la longitud de la probeta. Las probetas que no muestran una laminación visible tuvieron mayor flexibilidad que las que sí muestran daños.

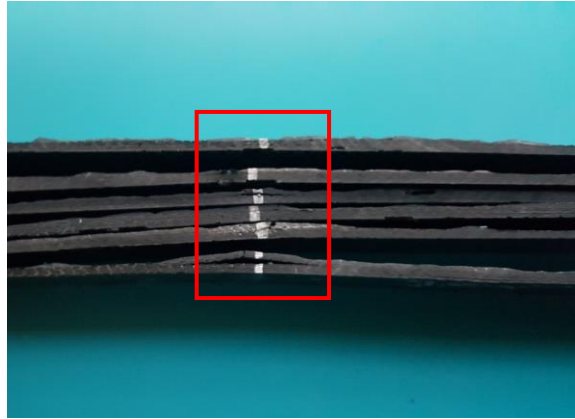
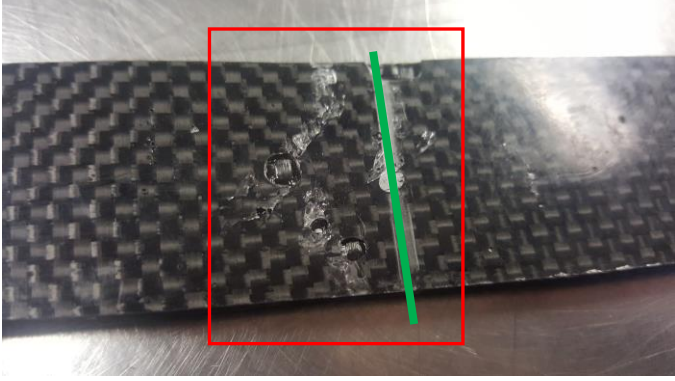
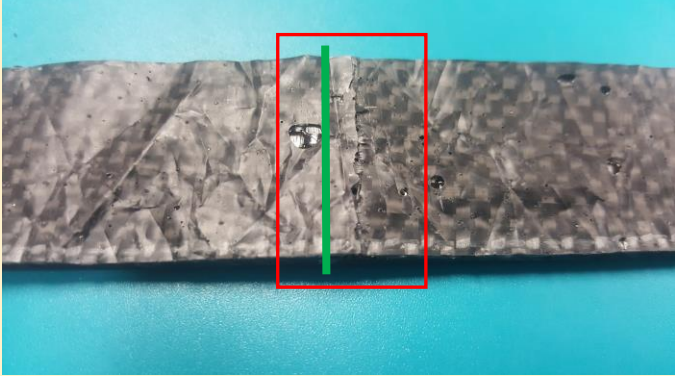
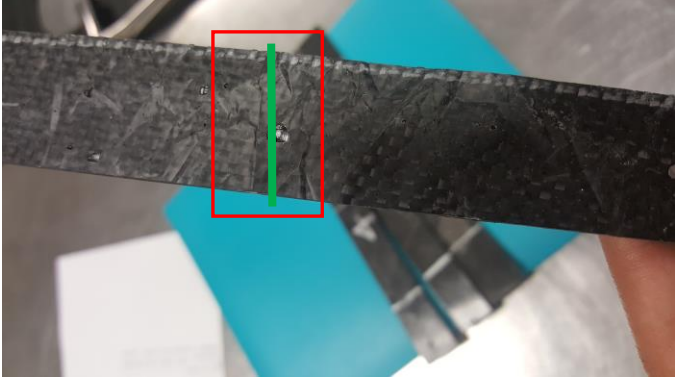
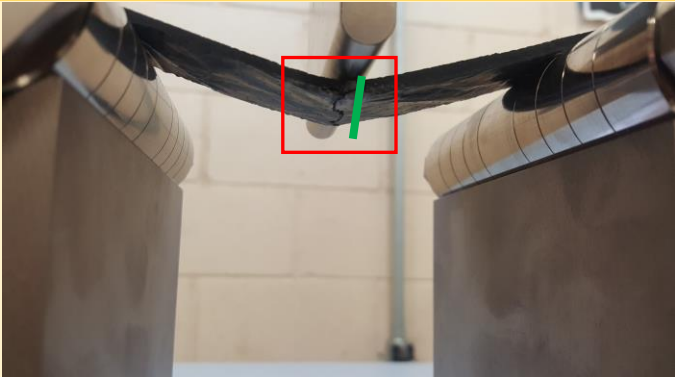


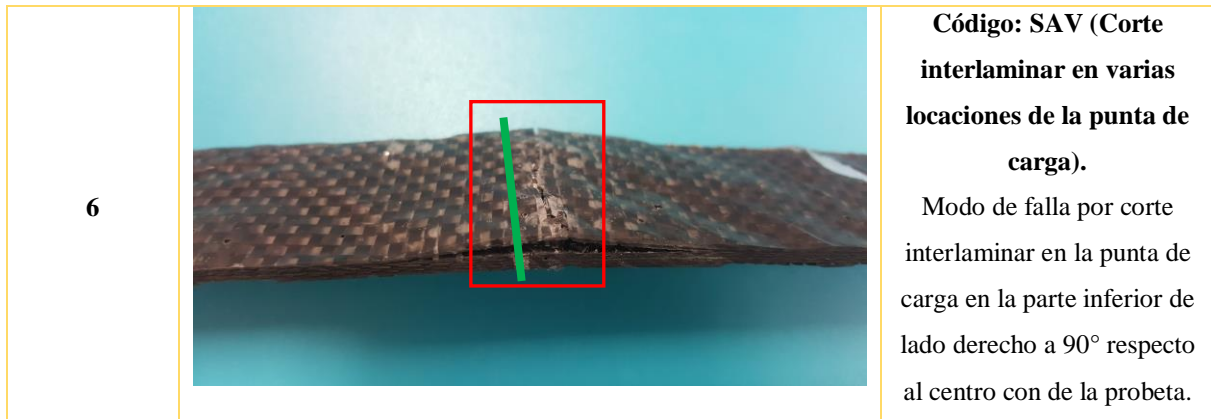
Figura 4.2. Vista lateral de probetas fracturadas.

En la siguiente tabla 4.3 se muestra el modo de falla de cada probeta así como su descripción y código referente a la norma ASTM D7264 para laminados de fibra de carbono 3K y resina epóxica ProGlass 1300. La línea verde nos muestra el centro de la probeta, mientras que el recuadro rojo el área de falla.

Tabla 4.3. Descripción de modo de falla por probeta.

PROBETA	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
1		<p>Código: OAL (Otro, a la izquierda de la punta de carga).</p> <p>Modo de falla por ensayo de probeta a flexión en la punta de carga en el dalo izquierdo del centro de la probeta, la ruptura fue en un paralela al tejido de 90° y perpendicular al de 0°.</p>

2		<p>Código: BAV (Pandeo en varias locaciones por la punta de carga).</p> <p>Modo de falla por pandeo en la punta de la carga a los costados del centro de la probeta, el fallo se muestra en dos ángulos diferentes a 45° y -45° toando el centro de la probeta como 0°.</p>
3		<p>Código: SAR (Corte interlaminar a la derecha de la punta de carga).</p> <p>Modo de falla por corte interlaminar en el tejido en la punta de carga de lado derecho del centro de la probeta perpendicular al ángulo de la línea central.</p>
4		<p>Código: BAL (Pandeo a la izquierda del punto de carga).</p> <p>Modo de falla por pandeo en la punta de carga de lado izquierdo del centro de la probeta a un ángulo de 90°.</p>
5		<p>Código: SAB (Corte interlaminar en la parte posterior de la punta de carga).</p> <p>Modo de falla por corte interlaminar en la punta de carga en la parte inferior de la probeta a un ángulo de 90°.</p>



En base a lo anterior se puede determinar que los modos de falla en el caso de las fracturas de los materiales compuestos laminados presentan una fractura a 90° con de laminación en la zona calibrada, lo que es un comportamiento típico de los materiales laminado.

Además de los resultados obtenidos de las probetas, también se obtuvieron resultados físicos del laminado, manufactura y métodos utilizados en el prototipo.

La resina epóxica ProGlass 1300 y la fibra de carbono 3K resultaron ser funcionales para la manufactura de la horquilla.

Respecto al laminado, en el subíndice 4.3 de trabajos futuros se describe que una vez que se realicen pruebas de flexión en el prototipo se podrán obtener resultados mecánicos, mientras tanto los resultados físicos nos arrojan una buena relación de los materiales utilizados, ya que la fibra no sufrió daños al ser cubierta con resina, y la resina mostró una buena adherencia al tejido.

La superficie de la horquilla una vez removida del molde se muestra e la figura 4.3, las áreas marcadas con color rojo nos muestran el excedente de resina que se originó al no sellar completamente el molde sobre el prototipo.



Figura 4.3. Excedente de resina en el prototipo a causa del molde.

Posterior al proceso de lijado para remover los excedentes de resina la figura 4.4 nos muestra la vista superficial del material compuesto. Las áreas más opacas tomaron este tono por el proceso de lijado, mientras que en las áreas brillosas la resina se encuentra en menor cantidad, por lo que no sufrió desbaste de las lijas y su apariencia muestra el terminado original.



Figura 4.4. Superficie del prototipo posterior al proceso de lijado.

Una vez que se obtuvieron y desarrollaron los resultados de las pruebas realizadas a las probetas, se compararon resultados y se comprendió de una manera más extensa el

comportamiento del material, se prosiguió a formular las conclusiones, las cuales abarcan todas las etapas de la investigación y se encuentran en el siguiente tema.

4.2 CONCLUSIONES

En ésta investigación se diseñó y fabricó una horquilla para un monoplaza de Formula 1, bajo un estudio de selección de materiales de los que destacan: resina epóxica, resina poliéster, fibra de carbono, fibra de vidrio, Gel coat madera MDF. Se determinó la configuración de un laminado para la realización de probetas, tomando en cuenta el número de capas y considerando las dimensiones de la probeta respecto a la norma ASTM D7264. El laminado fue de $[0^\circ \pm 90^\circ]$ de 6 capas de tejido bidireccional, uniforme, balanceado, el cual cuenta con características de un laminado cuasi-isotrópico, el cuál se fabricó con resina epóxica y fibra de carbono. Una vez definida la orientación de las fibras que se utilizaría, se prosiguió con las pruebas en materia prima y de manufactura.

Como primer instancia se fabricaron probetas de resina epóxica bajo la norma ASTM D7264, dónde se soportó una carga máxima de $F = 181.25 \text{ N}$ y esfuerzo máximo $\sigma_{\text{max.}} = 33520.23 \text{ MPa}$.

Dentro de los resultados obtenidos a partir de las probetas, se presentaron los modos de falla en base a cada una de las probetas dónde todos presentaron una fractura a 90° , y la mayoría presentó una delaminación en la zona de calibrada de carga, modo de falla típico de los materiales laminados, en los que de acuerdo a la norma ASTM D7264 predomina el pandeo en la zona de carga.

Una vez conocido el comportamiento de los materiales se prosiguió a fabricar un modelo y molde que serían la base para manufacturar el prototipo de la horquilla de fibra de carbono 3K y resina epóxica 1300 utilizando los mismos materiales, métodos y laminado que en las probetas mencionadas anteriormente.

Con base a los resultados anteriores de caracterización de materiales y desarrollo de la horquilla se determinó que el proceso de la propuesta de manufactura estandarizada de la horquilla se concluyó con un modelo de madera MDF, un molde de fibra de vidrio, y un

prototipo de la horquilla para Formula 1, dónde se utilizó un laminado de fibra de carbono de 6 capas [$0^\circ \pm 90^\circ$] y resina epóxica ProGlass 1300 el cual mediante la manufactura de probetas con el mismo laminado fue sometido a pruebas mecánicas de flexión.

Al finalizar el proceso de manufactura de la horquilla y observando los resultados obtenidos en las pruebas podemos concluir que el tipo de fibra de carbono se trabajó de manera exitosa, tanto en el laminado como en el proceso de fabricación de probetas y pruebas. El método de aplicación manual de resina nos ahorró el uso de maquinaria y herramientas más costosas pero aumentó el tiempo de curado de la resina, por lo que se cumplieron la mayoría de las metas establecidas.

Las cargas aplicadas a una suspensión de Formula 1 son a compresión y tensión, es por eso que se realizó la prueba de flexión que comprende los 2 tipos de fuerzas, sabemos gracias a *Gary Savage (2007)* que las pruebas realizadas a horquilla deben resistir un mínimo de 4.314 kN para que se crea aceptable su uso en la pista, aunque cada elemento de la suspensión depende del monoplaza utilizado.

De tal manera se puede concluir que una horquilla de bajo costo para un monoplaza de Formula 1 se puede desarrollar mediante el uso de fibra de carbono y resina epóxica, en cuanto a reducción de tiempos en el periodo de manufactura que era uno de los factores más importantes. Se obtuvieron resultados favorables que se resumen a una manufactura efectiva en cuanto a estos puntos, en los que de igual manera se pueden realizar mejoras.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

Al igual que en cualquier investigación, aún se puede continuar experimentando y buscando fuentes bibliográficas, métodos, materiales, etc., para mejorar nuestro trabajo. En ésta sección se presentan los trabajos futuros que se realizarán con el fin de construir sobre esta investigación. El trabajo futuro se divide en tres categorías, que son: diseño, manufactura y pruebas del prototipo, las cuales tienen la finalidad de producir una horquilla que sea funcional para un monoplaza.

1. DISEÑO

Es necesario mejorar: el molde de fibra de vidrio, para lograr un prototipo con superficies más uniformes y que cumpla exactamente con las dimensiones deseadas.

Ya que el perfil de la horquilla debe ser completamente aerodinámico, no pueden existir huecos o daños en el material que pueda crear vórtices reduciendo la velocidad del monoplaza.

2. MANUFACTURA

Parte de la manufactura es aumentar la cantidad de láminas en el molde, lo que mejorará su rigidez y será más funcional para nuestro propósito de sujeción del modelo y prototipo.

Por otra parte se deben realizar pruebas de resina en el molde para agregar la cantidad adecuada y que no haya merma de resina en el prototipo como sucedió en los resultados físicos de esta investigación.

3. PRUEBAS

Ya que dentro de la investigación solo se habla de pruebas a probetas, se tiene como trabajo futuro el hacer pruebas de flexión al prototipo de la horquilla para conocer de manera

exacta el comportamiento de la horquilla a este tipo de esfuerzos, lo que nos diría si habría que hacer otras mejoras en el área de diseño y manufactura.

4.4 BIBLIOGRAFÍA

[1] F.C. Campbell. (2010). Introduction to composite materials. En Structural composite materials (30). -: ASM International.

[2] Dr. Domingo Escudero López. (2001). Materiales compuestos. Aplicaciones. Instituto Eduardo Torroja, 1, 8. 2015, De Instituto Eduardo Torroja Base de datos.

[3] Stephen W. Tsai. (1964). Structural behavior of composite materials. Newport Beach, California: PHILCO Corporation - NASA.

[4] Fundamentos de manufactura moderna. México D.F.: McGraw Hill.

[5] Christian M. (julio 2011). Tecnología: conoce todos los detalles sobre la fibra de carbono. 09/2015, de Bólide Sitio web: <https://www.bolido.com/2011/07/tecnologia-la-fibra-de-carbono/>

[6] Fibra de carbono. 10/2015, de Maquinaria Pro Sitio web: <http://www.maquinariapro.com/materiales/fibra-de-carbono.html>

[7] Xiaosong Huang. (12/2009). Fabrication and Properties of Carbon Fibers. Materials, -, 35. 01/2017, De Journal Materials Base de datos.

[8] Sebastián Lorenzo. (06/2013). Fibra de carbono: guía básica para conocer uno de los materiales más importantes de la F1 actual. 2015, de Hearst Magazines S.L. Sitio web: <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/06/06/75555-fibra-de-carbono-f1-tecnico-los-materiales-compuestos>

[9] Ronald Márquez. (-). Materiales Compuestos. En Materiales de Ingeniería Química (101).

[10] Carbon concrete. (2008). Componentes de un refuerzo y fabricación ¿Qué es un “composite” o material compuesto? 2015, de Carbon Concrete Sitio web: <http://www.carbonconcrete.es/HTLM/es/Material%20Compuesto.html>

[11] Robert M. Jones. (1999). Mechanics of composite materials, Second Edition. Taylor and Francis editorial, (11/2017).

[12] Antonio Miravete. (2003). Materiales compuestos Volumen 1 de Materiales compuestos 03, E. Larrodé, ISBN 8492134976, 9788492134977. Zaragoza España: Reverte 2003.

[13] Sanjay K. Mazumdar, Ph.D. (2000). Composites manufacturing Materials, Product, and Process Engineering. Boca Raton, Florida: CRC Press.

[14] Shimadzu. (2018). Universal Tensile testing machine. 04/2018, de Shimadzu Sitio web: <https://www.shimadzu.com/an/test/universal/index.html>

[15] Suong V. Hoa. (2009). Principles of the manufacturing of composite materials. Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, Inc.

[16] Carmas Composites. (2007). Materiales compuestos - laminacion de fibra de carbono. 09/2015, de Blogger Sitio web: <http://www.carmas.com.ar/blogg.html>

[16] James C. Gerdeen, Ronald A. L. Rorrer. (2012). Engineering design with polymers and composites. Boca raton, FL: CRC Press.

[17] Martin Williamson. (-). A brief history of formula one. 03/2017, de ESPN Sitio web: <http://en.espn.co.uk/f1/motorsport/story/3831.html>

[18] Rainer Schlegelmilch. (-). A brief history of formula one. TIME, 1, 17.

[19] Brad Spurgeon. (2017). A Formula 1 Car as a Carbon Fiber Cake. 03/2017, de ThoughtCo. Sitio web: <https://www.thoughtco.com/formula1-car-as-carbon-fiber-cake-1347093>

[20] ASTM INTERNATIONAL. (-). Detailed overview. 25/11/2017, de ASTM Sitio web: https://www.astm.org/ABOUT/full_overview.html

[21] ASTM international. ASTM D7264. E.U.A.: ASTM.

[22] MBI Mar-Bal Incorporated. (2015). History of composite materials. 01/2018, de Mar-Bal Inc. Sitio web: <http://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>

[23] Ilse Paola Jáuregui Bogarin, Dra. M. Siqueiros Hernández, M.C. Benjamín González Vizcarra y Dr. M.A. Reyna (2018) Caracterización de material compuesto de fibra de carbono y resina epóxica, bajo la norma ASTM D7264 para su aplicación en una horquilla de F1. Tepic. Tepic Journals.

[24] Federation Internationale de L'automobile. (Diciembre 2017). 2018 Formula 1 Technical regulations. Francia: FIA.

[25] Valery V. Vasiliev & Evgeny V. Moronzov. (2007). Advanced mechanics of composite materials. Amsterdam: ELSEVIER. ISBN: 978-0-08-045372-9.

[26] Molly Gleeeson. (15/01/2015). Wilfred/a's cartonnage. 11/2018, de the artifact lab
Sitio web: <https://www.penn.museum/sites/artifactlab/author/mollygleeson/page/10/>

[27] International Organization for Standardization. (1998). Fibre reinforced plastic composites, Determination of flexural properties. En ISO 14125, Suiza.

[28] Touchstone research laboratory Co. (2015). ISO 187 Plastics determination of flexural properties. 01/2018, de Touchstone research laboratory Co. Sitio web: http://www.trl.com/iso_178_plastics_determination_of_flexural_properties/

[29] Carlos González. (2011). Materiales compuestos: Una tecnología madura. 10/2017, De Universidad Politécnica de Madrid Base de datos.

[30] Reichold. (2010). PolyLite® 33004-00 Resina Poliéster Tereftálica Modificada.

[31] Carmen Herranz García. (2017). Átomo. 10/2017 de Historia 2.0 Sitio web: <https://historiadospuntocero.com/medimos-tiempo-ii-carbono-14/atomo/>