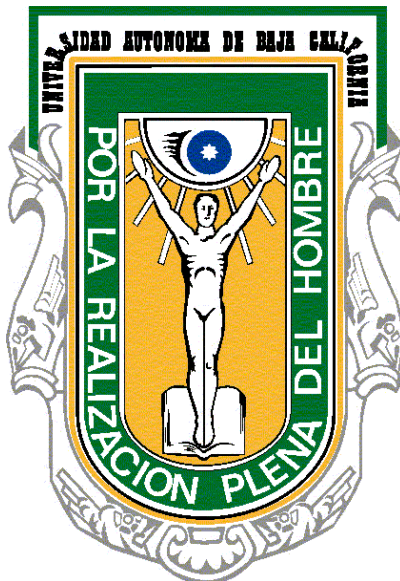


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA DE POSGRADO**



MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES
COMPUESTOS PARA APLICACIÓN EN PERFILES DE ALTA
RESISTENCIA**

TESIS

**QUE PRESENTA PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

ING. CHRISTIAN MORAILA GÁMEZ

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. ÁLVARO GONZÁLEZ ÁNGELES**

DEDICATORIA

Con cariño dedico este trabajo
de investigación a mi esposa,
mi hija, padres y hermanos.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de ésta investigación se logró gracias al apoyo del Dr. Álvaro González Ángeles, quien como asesor de tesis dedico tiempo, conocimiento y paciencia para el desarrollo y culminación de la investigación. De igual manera se agradece al Dr. Israel Saucedo Meza, Dr. Jesús Márquez González y Dr. Victor Nuño Moreno por el tiempo y conocimiento compartido en clase y durante el desarrollo de dicho trabajo.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Bars: Se denomina bar a una unidad de presión equivalente a un millón de barias, aproximadamente igual a una atmósfera (1 atm).

inHg: Pulgadas de mercurio, unidad de presión (1inHg = 0.49 psi)

UDC: Compuesto laminado con fibras orientadas en una sola dirección,(Uni-Directional Composite por sus siglas en inglés.)

King bands: Daño provocado por cargas a compresión en filamentos de compuestos laminados.

Balsa wood: Madera de baja densidad empleada como corazón en compuestos tipo sándwich.

Cross ply: Nomenclatura aplicada en compuesto laminados que indica un ángulo de laminación de 90° entre cada capa de material.

Curado: Proceso de endurecimiento de un material debido a una reacción química.

Deflexión: Desplazamiento generado por efecto de una fuerza en un cuerpo.

Deformación: La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo, o la ocurrencia de dilatación térmica.

Empenaje: Sección posterior de un avión donde suelen estar situados el estabilizador horizontal (encargado de controlar el picado del avión) y estabilizador vertical (encargado de controlar la guiñada del avión usando el timón).

Esfuerzo: Magnitudes físicas con unidades de fuerza sobre área utilizadas en el cálculo de piezas prismáticas como vigas o pilares y también en el cálculo de placas y láminas.

Reacción exotérmica: Cualquier reacción química que desprenda energía, ya sea como luz o como calor.

Flaps: Elemento situado en el borde de salida del ala de una aeronave. Aumenta el coeficiente de sustentación del esta mediante el aumento de superficie o el aumento de coeficiente de sustentación del perfil.

Fracción volumétrica Proporción de la cantidad de material de los diferentes conformantes de un material compuesto, expresada en porcentaje.

Compuesto híbrido: Material conformado por capas de material de refuerzo de distinto material o forma.

Honey comb: Geometría similar a las celdas de un panal de abejas, utilizada en la fabricación de materiales compuestos tipo sándwich y otras estructuras.

:

mmHg: Milímetros de mercurio, unidad de presión (1mmHg=1 torr).

Módulo a tensión: Rigidez de un material sujeto a tensión, la cual se obtiene del cociente del esfuerzo y la deformación.

Resiliencia: Es la energía de deformación (por unidad de volumen) que puede ser recuperada por un cuerpo deformado cuando cesa el esfuerzo que causa la deformación.

Sándwich: Configuración empleada en la fabricación de materiales compuestos la cual hace referencia a dicho material se conforma de dos tapaderas y un centro o corazón.

VARTM: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, por sus siglas en inglés, proceso de manufactura utilizado en la fabricación de compuestos laminados haciendo uso de presión negativa como medio de inyección.

ÍNDICE

GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	XI
HIPÓTESIS.....	XII
OBJETIVO.....	XII
METAS.....	XII
JUSTIFICACIÓN	XIII
CAPÍTULO I.- ESTADO DEL ARTE.....	1
1. MATERIALES COMPUESTOS.....	1
1.1. FIBRAS	6
1.1.1. Fibra de vidrio	7
1.1.1.1. Composición química de las fibras.....	9
1.1.1.2. Método de obtención de fibras.....	10
1.1.1.3. Propiedades y característica de las fibras	12
1.1.2. Fibra de carbono	13
1.1.2.1. Composición química de las fibras.....	14
1.1.2.2. Método de obtención de las fibras	15
1.1.2.3. Propiedades y características de las fibras.....	17
1.1.3. Fibra de armida.....	18
1.1.3.1. Composición química de las fibras.....	18
1.1.3.2. Método de obtención de las fibras.....	19
1.1.3.3. Propiedades y características de las fibras	19
1.2. MATRICES.....	22
1.2.1. Matriz epóxica	24
1.2.1.1. Composición química de la matriz	24
1.2.1.2. Propiedades mecánicas de la matriz	25
1.2.2. Matriz Fenólica	25
1.2.2.1. Composición química de la matriz.....	26
1.2.2.2. Propiedades mecánicas de la matriz	26
1.2.3. Matriz poliéster y vinyl-éster	27
1.2.3.1. Propiedades mecánicas de la matriz.....	27
1.3. CORAZONES	28
1.3.1. FOAM	30
1.3.1.1. Propiedades mecánicas del foam.....	31

1.3.2.	<i>Madera balsa</i>	32
1.3.2.1.	Propiedades mecánicas de la madera balsa.....	32
1.3.3.	<i>Honey comb</i>	33
1.3.3.1.	Propiedades mecánicas del honey comb	34
1.4.	ESTRUCTURA DEL LAMINADO A BASE DE MATERIALES COMPUESTOS	35
1.4.1.	<i>Características de los laminados.</i>	35
1.4.2.	<i>Tipos de laminados.</i>	36
1.4.3.	<i>Propiedades mecánicas de los laminados</i>	39
1.4.4.	<i>Aplicaciones de los laminados.</i>	40
CAPÍTULO II.- MARCO TEÓRICO		44
2. PRUEBAS EN COMPUESTOS LAMINADOS Y TIPO SÁNDWICH		44
2.1.	NORMAS ESTÁNDAR PARA PRUEBAS MECÁNICAS	44
2.1.1.	<i>Tensión (ASTM D3039)</i>	44
2.1.2.	<i>Flexión en tres puntos (ASTM D790)</i>	46
2.1.3.	<i>Impacto (CHARPY)</i>	48
2.1.4.	<i>Flexión para compuesto tipo sándwich (ASTM-C393)</i>	49
2.2.	MÉTODOS DE FABRICACIÓN PARA COMPUESTOS LAMINADOS Y TIPO SÁNDWICH	50
2.2.1.1.	Materiales utilizados en el métodoVARTM :	51
2.2.2.	<i>Síntesis de fabricación de compuesto tipo sándwich</i>	55
CAPÍTULO III .- EXPERIMENTACIÓN.....		56
3. FABRICACIÓN DE MOLDES, EQUIPO DE PRUEBA Y EXTRACCIÓN DE PROBETAS		56
3.1.	MOLDE PARA PROBETAS DE RESINA POLIMÉRICA PARA ENSAYO DE TENSIÓN.....	57
3.2.	ADITAMENTO PARA FLEXIÓN EN TRES Y CUATRO PUNTOS	58
3.3.	MORDAZAS PARA ENSAYO DE TENSIÓN.....	59
3.4.	CARACTERIZACIÓN DE LAS MATRICES	60
3.4.1.	<i>Procedimiento de caracterización para la matriz epóxica y poliéster</i>	60
3.5.	PROBETAS PARA ENSAYO DE TENSIÓN Y FLEXIÓN DE COMPUESTOS LAMINADOS	64
3.6.	PROBETAS PARA ENSAYO DE FLEXIÓN EN EL COMPUESTO TIPO SÁNDWICH	65
3.7.	CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS LAMINADOS	66
3.7.1.	<i>Ensayo de tensión (ASTM D-3039)</i>	68
3.7.2.	<i>Ensayo de flexión en tres punto (ASTM D-790)</i>	69
3.7.3.	<i>Caracterización de los compuestos tipo sándwich (ASTM D-393)</i>	70
CAPITULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIONES		71
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		71
4.1.	PROCESO DE CURADO DE LAS MATRICES	71

4.1.1.	<i>Dureza:</i>	71
4.1.2.	<i>Resistencia a la tensión:</i>	72
4.1.3.	<i>Resistencia a la flexión</i>	74
4.2.	FABRICACIÓN DE LOS COMPUESTOS LAMINADOS POR EL MÉTODO VARTM	74
4.2.1.	<i>Optimización del proceso VARTM</i>	74
4.2.2.	<i>Densidad y fracción volumétrica :</i>	76
4.3.	ENSAYO DE LOS COMPUESTOS LAMINADOS	77
4.3.1.	<i>Resistencia a la tensión:</i>	77
4.3.2.	<i>Resistencia a la flexión:</i>	79
4.4.	ENSAYO DE LOS COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH	81
4.4.1.	<i>Prueba de impacto</i>	82
CONCLUSIONES:		85
4.5.	TRABAJO FUTURO	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		88

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo I

<i>Tabla 1. 1.- Propiedades de algunas fibras sintéticas utilizadas como refuerzo.</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 1. 2.- Propiedades físicas y mecánicas de los diferentes tipos fibra de vidrio.</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 1. 3.- Propiedades físicas y mecánicas de los tres grandes grupos de fibras de carbono.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 1. 4.- Propiedades físicas y mecánicas de las fibras de Aramida más comunes.</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1. 5.- Propiedades físicas y mecánicas de la resina epoxica.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 1. 6.- Propiedades físicas y mecánicas de la resina Poliéster.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 1. 7.- Propiedades mecánicas de algunos tipos de honey comb</i>	<i>34</i>

Capítulo II

<i>Tabla 2. 1.- Dimisiones recomendadas de las probetas para el ensayo de tensión.</i>	<i>45</i>
---	-----------

Capítulo IV

<i>Tabla 4. 1.- Parámetros de experimentación para el curado de resinas poliméricas.</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4. 2.- Resultados de la prueba de flexión a las resinas poliméricas.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 4. 3.- Propiedades físicas y fracciones volumétricas de los compuestos laminados.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 4. 4.- Resultados del ensayo de tensión de los compuestos laminados.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4. 5.- Resultados del ensayo de flexión de los compuestos laminados.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4. 6.- Resultados del ensayo de flexión para los compuestos tipo sándwich.</i>	<i>81</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I

<i>Figura 1. 1.- Comportamiento de las diferentes fases, por separado y combinadas, de un material compuesto.</i>	<i>2</i>
<i>Figura 1. 2.- Diagrama de clasificación de los materiales compuestos a nivel general</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1. 3.- Morfología representativa de los compuestos,(a)particulado, (b)hojuelas, (c)fibras cortas y (d)laminado.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 1. 4.- Foto promocional de la implementación de los compuestos en el sector automotriz en los años 50's.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1. 5.- Diagrama de proceso en la fabricación de la fibra de vidrio.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1. 6.- Comparación entre un cabello humano (mayor tamaño) y un filamento de fibra de carbono.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1. 7.- Proceso generalizado para la obtención de las fibras de carbono.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1. 8.- Composición química de la aramida.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 1. 9.- Diagrama general de proceso para la de fibras de aramida.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 1. 10.- Deformación de filamento de Aramida sujeto a compresión.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 1. 11.- Corte transversal de un compuesto, en donde se puede apreciar la matriz y los filamentos de fibra.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 1. 12.- Cadena de anillos epoxi como polímero.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 1. 13.- Aplicaciones de los compuestos tipo sándwich.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 1. 14.- Ejemplo de aplicación del foam como material de corazón en compuestos tipo sándwich.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 1. 15.- Diagrama de resistencia al corte vs densidad en diferentes tipos de foam.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 1. 16.- Diagrama de compresión vs densidad de diferentes tipos de materiales de corazón.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 1. 17.- Morfología del honeycomb empleado en compuestos tipo sándwich.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 1. 18.- Configuración de un compuesto laminado multidireccional.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 1. 19.- Relación entre el ángulo de laminación y la reducción en el modulo de elasticidad longitudinal (en dirección de la aplicación de la fuerza).....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 1. 20.- Nomenclatura de dos tipos muy comunes de laminación en compuestos.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 1. 21.- Sección transversal de un compuesto laminado multidireccional con sus ejes de coordenados principales.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 1. 22.- Ángulo de laminación respecto al eje X en el plano XY.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 1. 23.- Aplicaciones de los compuestos laminados en el sector deportivo.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 1. 24.- Aplicaciones de los compuestos laminados en el sector automotriz.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 1. 25.- Aplicación de los compuestos laminados en el sector marítimo.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 1. 26.- Participación de los materiales compuestos en la industria aeroespacial desde su primera implementación.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 1. 27.- Aplicación de los compuestos laminados en el sector aeroespacial.</i>	<i>43</i>

Capítulo II

Figura 2. 1.- Material compuesto sujeto a tensión bajo la norma ASTM D3039.	44
Figura 2. 2.- Equipo empleado para pruebas de tensión y flexión utilizando diversos aditamentos.	46
Figura 2. 3.- Equipo empleado en la norma ASTM D790 para flexión en tres puntos.	47
Figura 2. 4.- Equipo de prueba para ensayos de impacto tipo charpy.	48
Figura 2. 5.- Probeta de compuesto tipo sándwich sometida a flexión bajo la norma estandarizada (ASTM C-393).	49
Figura 2. 6.- Proceso VARTM empleado en la fabricación de compuestos laminados.	51
Figura 2. 7.- Morfología de los componentes de un compuesto tipo sándwich en el proceso de fabricación	55

Capítulo III

Figura 3. 1.- (izq.) Molde positivo de teflón utilizado para la fabricación de un molde negativo de caucho.	58
Figura 3. 2.- Aditamento diseñado y fabricado para el ensayo de flexión en cuatro puntos.	59
Figura 3. 3.- Mordazas diseñadas y fabricadas para sujetar las probetas de material compuesto durante el ensayo de tensión.	59
Figura 3. 4 Geometría de las probetas de resina epóxica y poliéster para ensayo de tensión.	60
Figura 3. 5.- Diagrama de dureza vs tiempo a diferentes temperaturas de curado.	62
Figura 3. 6.- Diagrama esfuerzo vs deformación de matrices epóxicas curadas a distintas temperaturas.	62
Figura 3. 7.- Curva de curado de resina polyester en base a la cantidad de catalizador empleado.	63
Figura 3. 8.- Diagrama representativo de esfuerzo vs deformación de las resinas polyester.	64
Figura 3. 9.- Probetas de compuesto laminado para ensayo de tensión, (a) F. carbono, (b) F. aramida, (c) F. vidrio.	64
Figura 3. 10.- Probetas tipo sándwich para ensayo de flexión, (a) híbrido, (b) aluminio, (c) f. vidrio, (d) aramida y (f) carbono.	65
Figura 3. 11.- Comportamiento de la resistencia a la tensión vs cantidad.	66
Figura 3. 12.- Comportamiento de la densidad del compuesto vs cantidad de vacío.	67
Figura 3. 13.- Diagrama esfuerzo deformación de los 3 laminados fabricados.	68
Figura 3. 14.- Comportamiento de los compuestos laminados bajo flexión en tres puntos.	69
Figura 3. 15.- Comportamiento de los compuestos tipo sándwich bajo flexión en tres puntos.	70

Capítulo IV

Figura 4. 1.- Diagrama de esfuerzo-deformación de la resina poliéster sujeta a tensión.	73
Figura 4. 2.- Diagrama esfuerzo-deformación de resina epóxica curada a distintas temperaturas.	73
Figura 4. 3.- Diagrama de variación de la densidad del compuesto laminado	75
Figura 4. 4.- Diagrama esfuerzo-deformación de un compuesto fabricado a distintas presiones negativas.	76
Figura 4. 5.- Diagrama esfuerzo-deformación de los compuestos laminados sujetos a tensión.	78
Figura 4. 6.- Diagrama esfuerzo-deformación de los compuestos laminados sujetos al ensayo de flexión.	80

RESUMEN

El desarrollo de materiales compuestos ha sido un área de la ciencia de los materiales con una amplia gama de campos de estudio, desde el punto de vista científico, tecnológico, de manufactura y aplicación. Lo que ha propiciado el interés en desarrollar nuevos componentes, procedimientos de fabricación más avanzados, métodos de análisis con mayor exactitud, y sobre todo, nuevos materiales con mejores propiedades mecánicas en comparación de ciertos metales. El desarrollo de esta tesis se basó en la investigación, síntesis y caracterización de materiales compuestos de tipo sándwich teniendo como objetivo fabricar una configuración de material compuesto capaz de igualar o incluso superar ciertas propiedades mecánicas de un aluminio 6061 de 0.095 pulgadas de espesor. El método de síntesis utilizado fue el VARTM, por sus siglas en inglés (Transferencia de Resina Asistida por Vacío), y el proceso de caracterización se llevó a cabo bajo normas de pruebas estandarizadas ASTM (D3039, D790 y C393). Con referencia en la metodología mencionada anteriormente, se fabricaron cuatro diferentes compuestos tipo sándwich, conformados de cuatro capas por cara de fibra de carbono, de aramida-49, de vidrio tipo 'S' y un híbrido de fibra de carbono–faramida-49 respectivamente. Todos los compuestos se realizaron utilizando fibras bidireccionales de 6Oz./Yd.² con orientación [0,45]s embebidos en una matriz epóxica con endurecedor cicloalifático, a su vez se empleó espuma de polivinilo de 0.125 pulgadas de espesor con densidad de 48 kg/m³ como corazón. Cada uno de los compuestos de tipo sándwich fueron sometidos a las pruebas mecánicas citadas, durante las cuales se observó que el compuesto a base de fibra de carbono presentó una mayor resistencia a la flexión en comparación con los otros compuestos fabricados, incluso mayor que la del aluminio 6061, sin embargo, este mostró una baja resistencia a los impactos en donde destacó el compuesto híbrido, ya que es capaz de absorber mayor energía que los demás compuestos e incluso más que el aluminio 6061 presentando menor daño en la probeta de prueba. En base a los resultados obtenidos en el proceso experimental se concluyó que un material compuesto de tipo sándwich es capaz de igualar e incluso superar la resistencia a la flexión y a los impactos que presenta un aluminio 6061 de 0.095 pulgadas de espesor. Es de gran importancia reiterar el gran campo de estudio que ofrecen los materiales compuestos por lo que se recomienda, para estudios posteriores, el análisis del efecto

que presentan los diferentes tipos materiales utilizados como corazón en las propiedades mecánicas del compuesto y su simulación haciendo uso de la teoría del elemento finito.

ABSTRACT

The development of composites materials has been a focal of the materials science regarding to the wide range of study areas, from the scientific, technological, manufacturing and application standing point. Due to, the interest of develop new components, perform manufacturing processes, get more acquired analysis methods and most of all, new materials with better properties compared with some metals. The growth of this thesis it's based on the investigation, synthesis and characterization of composite materials panels looking for develop a configuration that could match and even surpass some mechanical properties of a 6061 Aluminum with 0.095 inches of thickness. Was used as synthesis method the VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer), and the characterization process were driven by standard testing methods ASTM (D3039, D790, C393). Four different composite panels were manufactured, based on four layers per skin using carbon fiber, E-glass, aramid-49 and a hybrid with one skin of Aramid-49 and another of carbon fiber. For all face sheets were used 6 Oz/Yd² plain weave with [0, 45]_s ply orientation. The resin was a Cycloaliphatic epoxy and as core were used 0.125 inches vinyl foam with 3lb/ft³ density. Each composite panel were submitted to the mechanical tests above cited, during which the carbon fiber panel presented better flexural strength than the other panels, even better than the 6061 aluminum but the impact strength was poor in comparison with the hybrid composite which reach the highest impact strength of all composite panels fabricated during this investigation regarding to the increased energy absorption of the configuration. Based on the mechanical testing and the result analysis was concluded that a composite panel it's capable to match and even surpass the flexural strength and impact strength of a 0.095 inches 6061 aluminum. It's of great value reassert the wide range study areas of composite materials that recommended further studies on the composite panels effect using different core materials and configurations implementing the finite element theory.

Hipótesis

La configuración de materiales compuestos de tipo sándwich puede superar las propiedades mecánicas de resistencia a la flexión e impacto de un aluminio 6061 de 0.095 pulgadas de espesor.

Objetivo

Fabricar un material compuesto de tipo sándwich el cual sea capaz de igualar e incluso superar las propiedades mecánicas de flexión resistencia a impactos de un aluminio 6061 de 0.095 pulgadas de espesor, para su aplicación en componentes automotrices de alto desempeño.

Metas

- Analizar el proceso de manufactura VARTM utilizado en la fabricación de compuestos con la finalidad conocer sus variables y el efecto de las mismas en el compuesto a desarrollar
- Caracterizar las matrices poliméricas de poliéster y epóxica para conocer sus propiedades bajo ciertos estados de carga.
- Fabricar y caracterizar compuestos de tipo laminado basándose en normas estandarizadas para determinar sus propiedades mecánicas bajo ciertos estados de carga.
- Fabricar y caracterizar compuestos de tipo sándwich para ser ensayados utilizando normas estandarizadas y así determinar su comportamiento mecánico bajo ciertos estados de carga.
- Analizar y comparar las distintas propiedades de los diferentes compuestos ensayados para determinar las ventajas y desventajas de cada uno de los materiales fabricados.
- Determinar si alguna de las configuraciones de material compuesto tipo sándwich supera las propiedades mecánicas de flexión y resistencia a impactos del aluminio 6061.

Justificación

Los materiales compuestos poseen excelentes propiedades mecánicas en proporción a su peso ya que son capaces de soportar grandes cargas e impactos que de igual manera lo resisten algunos materiales ferrosos y no ferrosos, por lo que es posible desarrollar una configuración de laminados tipo emparedado que sustituyan en algunas situaciones al uso de planchas de aluminio como medio protector de impactos en la parte inferior y costados de los autos de alto desempeño, lo que propiciaría un peso menor de la estructura así como también mayor resistencia a los impactos

Capítulo I.- Estado del Arte

1. Materiales compuestos

Un material compuesto es aquel que está conformado por dos o más tipos de materiales distintos, con propiedades muy diferentes entre sí, y que al ser combinados, muchas de sus propiedades mejoran haciendo de este nuevo un material con características superiores a las de sus constituyentes. Esta definición abarca una amplia gama de materiales que no son considerados como materiales compuestos, a pesar de que estos sean conformados por materiales distintos, como es el caso de los que contienen cierto nivel de impurezas así como también elementos aleantes. Otro ejemplo similar es el de los plásticos que comúnmente poseen elementos rellenos, lubricantes, foto absorbentes y muchos otros materiales que para efectos de producción, hacen que el costo sea menos elevado como también su manufactura sea más sencilla. Para el caso de los metales es importante saber que las diferentes fases que los conforman poseen propiedades muy similares entre sí, como puede ser el módulo de elasticidad, que algunos de sus constituyentes no sea de tipo fibroso o que se presente en proporciones muy pequeñas como es el caso de los elementos aleantes; es por ello que dichos materiales no son considerados materiales compuestos. Por lo tanto, para que un material sea clasificado como material compuesto se debe tomar en cuenta lo siguiente [1].

- Las propiedades del nuevo material deben incrementarse significativamente como resultado de la combinación de sus constituyentes.
- El estado de una de sus fases debe ser de tipo fibroso o granular.
- La fracción volumétrica entre sus constituyentes sea mayor al 10 %.
- Que las propiedades de uno de sus constituyentes sea cinco veces mayor a la del otro.

Existen muchos materiales que pueden ser llamados técnicamente materiales compuestos, que para los fines de esta tesis, solo serán considerados aquellos en los que sus constituyentes sean distintos químicamente, que a una macro escala sean dos o más materiales combinados con estructura heterogénea y con propiedades específicas.

Para caracterizar un material compuesto es importante saber que este consiste de una o más fases discontinuas embebidas en una fase continua, generalmente la fase discontinua posee en gran proporción, respecto a la fase continua, mayor fuerza y resistencia recibiendo así el nombre de refuerzo o material de refuerzo, que por otra parte la fase continua recibe el nombre de matriz

Como en todo sistema el desempeño de el mismo depende de sus componentes, siendo los materiales compuestos una forma de sistema, el desempeño de dicho material dependerá de las propiedades y características de sus constituyentes, la interacción existente entre ellos y su distribución entre muchos otros factores, lo que tendrá por consecuencia un comportamiento específico del material con respecto a sus componentes [2] (fig. 1.1).

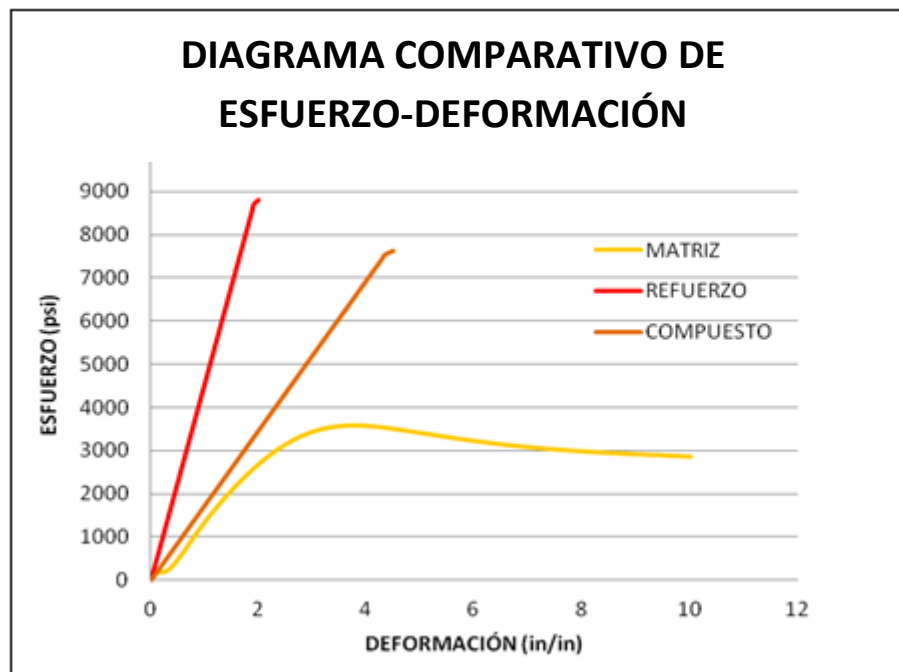


Figura 1. 1.- Comportamiento de las diferentes fases, por separado y combinadas, de un material compuesto.

Un aspecto relevante en la caracterización de un material compuesto es la geometría del refuerzo la cual puede ser descrita por su forma, tamaño y distribución. Un ejemplo simple sería el afirmar que se tienen dos materiales compuestos de igual geometría, sin embargo, pueden existir ciertas diferencias entre ellos las cuales apuntan a la concentración, distribución de la concentración y por supuesto la orientación del refuerzo, es por ello que cada una de dichas variantes es de gran interés ya que finalmente se reflejarán en el desempeño y propiedades del material. A continuación se proporciona una breve descripción de algunas de las características de los compuestos las cuales influyen en el desempeño del mismo.

Forma: Esta característica hace referencia a la morfología de los materiales que componen la fase discontinua, siendo regularmente formas cilíndricas o esféricas.

Tamaño y distribución del tamaño: Básicamente nos describe la textura del material compuesto siendo más lisa cuando los componentes de la fase discontinua son finos y de manera contraria cuando dichos componentes son más grandes o burdos.

Fracción volumétrica: Se puede afirmar que es una de las características principales de la cual dependerá, en gran parte, el rendimiento del material compuesto ya que nos determina la interacción interfacial entre el material de refuerzo (fase discontinua) y la matriz (fase continua).

Concentración: Es otro parámetro decisivo el cual puede modificar las propiedades del material compuesto debido que al integrar cualquier constitutivo este modificara la concentración del compuesto y por consecuencia sus propiedades, siendo este parámetro fácil de controlar en el proceso de manufactura para poder así obtener el material deseado con propiedades específicas.

Distribución de la concentración: Refiere a la homogeneidad del compuestos, es decir, que tanta variación existe en cuanto al volumen y propiedades mecánicas de una pequeña muestra representativa de todo el material con respecto al volumen y propiedades mecánicas de todo el material. Si se presenta una baja homogeneidad, tendremos como resultado una disminución en el rendimiento ya que este estará regido por la parte más débil de nuestro compuesto, es por ello, que la homogeneidad es un parámetro altamente vigilado durante el proceso de manufactura con materiales compuestos.

Orientación: Esta es una de las principales características que influye en el comportamiento de un material compuesto, esto se debe a que la orientación del material de refuerzo modifica la isotropía del sistema, en el caso de los compuestos particulados, [3] ya que no poseen un orden en su material de refuerzo debido a que este se encuentra en forma de partículas de iguales dimensiones, estos materiales se comportan de manera isotrópica en los cuales las propiedades mecánicas no dependen de la orientación del material. Por otra parte los compuestos en los que el material de refuerzo es a base de fibras continuas la anisotropía se hace presente lo que nos proporciona ventaja para controlar las propiedades del compuesto por medio del diseño y proceso de manufactura.

Clasificación: Las propiedades de un material compuesto dependen en gran medida del arreglo de sus fases, es decir, de la geometría de los materiales de refuerzo. Es por ello que se debe recurrir a una clasificación basada en la geometría de una muestra representativa del material, siendo así que se obtiene la siguiente clasificación [2] (fig. 1.2).

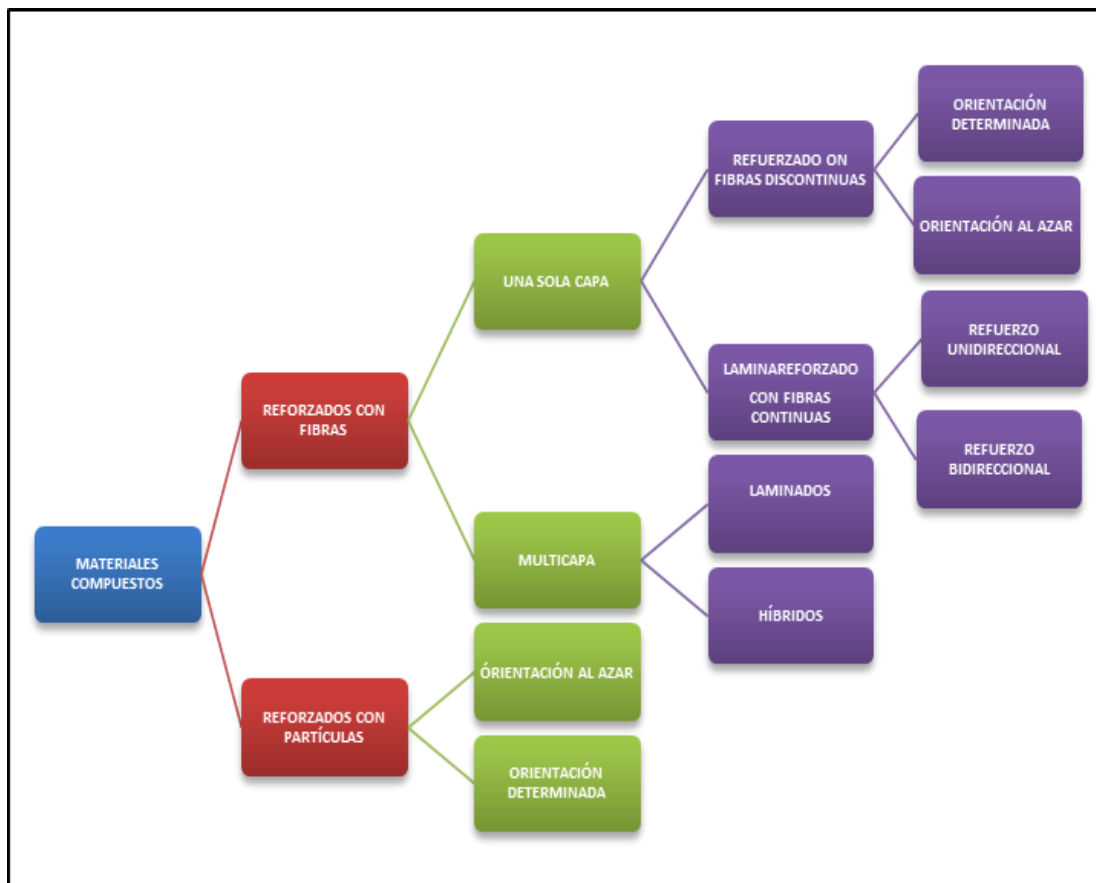


Figura 1. 2.- Diagrama de clasificación de los materiales compuestos a nivel general

Compuestos reforzados con partículas:

Debido a que el área de interés de esta investigación se inclina por los materiales compuestos reforzados con fibras solo se proporciona una breve introducción a los compuestos particulados con el fin de conocer y poder distinguir a grandes rasgos las dos clasificaciones generales de los materiales compuestos.

Los compuestos particulados son materiales en los cuales su fase discontinua o de refuerzo es no fibrosa y generalmente de dimensiones muy pequeñas, siendo dicha dimensión un aspecto fundamental ya que determina la capacidad de contribución de sus propiedades al compuesto. Este tipo de compuestos se distinguen de los basados en fibras ya que no poseen muy buena resistencia a la fractura en el plano normal a la posición del refuerzo como lo hacen los compuestos con refuerzo basado en fibras, teniendo como consecuencia una falla temprana en la matriz del sistema. De manera general los materiales utilizados para la creación de compuestos particulados aportan al nuevo material mayor dureza, ya que presentan cierta restricción en la región plástica de la matriz [4] (fig. 1.3).

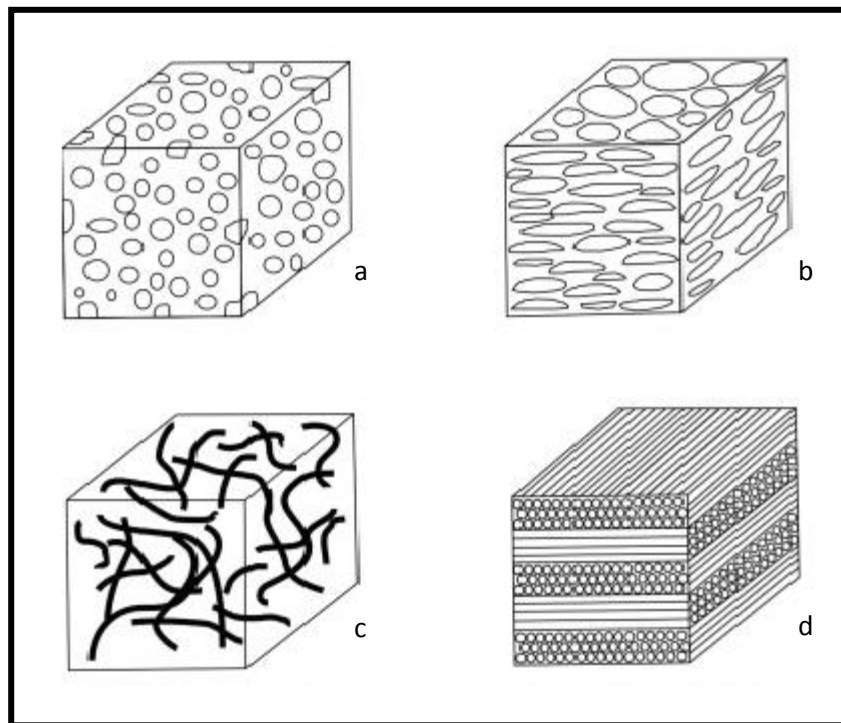


Figura 1. 3.- Morfología representativa de los compuestos,(a)particulado, (b)hojuelas,(c)fibras cortas y (d)laminado.

1.1. Fibras

En un material compuesto reforzado a base de fibras continuas se puede apreciar que estas proveen la mayor parte de las propiedades de resistencia del material como son la resistencia y rigidez. Las múltiples fibras de las cuales se conforma el refuerzo de estos materiales dan lugar a un material redundante, es decir, que cuando una o varias fallas se presentan por acción de alguna carga, resulta en una redistribución de la misma lo que ayuda a evitar una falla catastrófica en el compuesto a analizar. Las fibras se caracterizan no solo por su geometría, sino también por sus propiedades físicas, mecánicas y químicas, por lo cual es importante conocer los diferentes tipos que se utilizan como refuerzo en los materiales compuestos, considerando que cada una de ellas posee diferentes propiedades y características [2, 5] (tabla 1.1).

Tabla 1. 1.- Propiedades de algunas fibras sintéticas utilizadas como refuerzo.

TIPO DE MATERIAL	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MPa)	MÓDULO A TENSIÓN(GPa)	DENSIDAD (g/c ³)
Carbono HS	3500	160 - 270	1.8
Carbono IM	3500	270 - 325	1.8
Carbono HM	3500	325 - 440	1.8
Carbono UHM	2000	440	2
Aramida LM	3600	60	1.45
Aramida HM	3100	120	1.45
Aramida UHM	3400	180	1.47
E-Glass	2400	69	2.5
S2-Glass	3450	86	2.5
Quartz-Glass	3700	69	2.2

1.1.1. Fibra de vidrio

El uso de la fibra de vidrio data de los antiguos pueblos Egipcios quienes utilizaban una especie de fibras burdas las cuales, por medio de calor, las enredaban sobre moldes de barro con forma de jarrones y recipientes que posteriormente calentaban para que las fibras se fusionaran, de esta manera, al retirar el molde de barro obtenían las vasijas y recipientes de una sola pieza sólida. Tiempo después, aproximadamente a mediados del siglo XVII, un físico inglés de nombre Robert Hooke realizó experimentos con filamentos de vidrio que posteriormente en el siglo XVIII el científico francés Rene Antonie Ferchault de Reaumur predijo que los filamentos de vidrio llegarían a ser tan finos que podría confeccionarse una especie de tela. Sin duda alguna dicha predicción se cumplió en 1893 cuando una compañía llamada Libbey Glass Company dirigida por Edward Libbey confeccionó un vestido de tela de vidrio el cual fue exhibido en la Columbian Exposition en ese mismo año en la ciudad de Chicago. No fue hasta el año de 1931 cuando la producción de fibra de vidrio ocupó un lugar en la industria cuando la compañía Owens Illinois Glass Company inventó un proceso por medio del cual se podían obtener filamentos continuos de vidrio, lo que redirigió el curso de la compañía a fusionarse con Corning Glass Works resurgiendo como Owens-Corning Fiberglass. Este suceso marco el inicio de la industria moderna dedicada a la fibra de vidrio en todo el mundo otorgando licencias para producir dicho material a compañías como Pittsburg Plate Glass (ahora conocida como PPG), Libbey-Owens-Ford, St.Gobain ubicada en Francia y Pilkinton de origen Inglés [6].

Cuando la fibra de vidrio estuvo al alcance de los científicos, se iniciaron los procesos de investigación con el fin de conocer su comportamiento, que posteriormente, dieron frutos al introducir la fibra de vidrio como material de refuerzo para la fabricación de materiales compuestos, encontrando así, un sin número de aplicaciones iniciando por el ramo militar ya que durante la Segunda Guerra Mundial se introdujeron algunos artículos de grado no estructural debido a que en aquel tiempo las propiedades de los compuestos presentaban gran superioridad en ciertas propiedades en comparación los materiales comúnmente utilizados como el aluminio y fierro [7].

Al momento en que la fibra de vidrio estuvo al alcance comercial se aplicó en un sin número de campos de la industria, uno de los principales fue el automotriz ya que representaba un costo de manufactura rentable así como también permitía la fabricación de formas más complejas y a su vez más ligeras. Un ejemplo fue la introducción de paneles de fibra de vidrio en los autos deportivos como el corvete 1953 en el cual gran parte de la carrocería del vehículo era de fibra de vidrio (**fig. 1.4**).



Figura 1. 4.- Foto promocional de la implementación de los compuestos en el sector automotriz en los años 50's

1.1.1.1. Composición química de las fibras

Como ya sabemos, el vidrio es un material amorfo que se obtiene de fundir, en su mayoría sílice, que en estado líquido, es enfriada abruptamente lo que evita que se formen cristales en el material. En el caso de la sílice pura o el cuarzo, se requieren temperaturas muy elevadas para poder alcanzar su punto de fusión y aún más para manejarlo al grado de lograr obtener filamentos muy delgados, Es por ello que al momento de la fundición se le agregan otros componentes químicos los cuales derivan en la disminución de la viscosidad del vidrio fundido, remueven espacios de gas atrapados en la fundición, etc. Tomando en cuenta que los componentes que se le agreguen a la mezcla, serán modificadores en las propiedades del material ya solidificado. Es de tal manera que existen diferentes tipos de fibras de vidrio, que de acuerdo a los modificadores empleados poseen distintas propiedades, pero básicamente en la industria se utilizan 4 tipos de fibra de vidrio a nivel general los cuales serán descritos [8].

A-glass:

Este tipo de material se compone en su mayoría de sodio, barro y sílice teniendo como principal característica su alta alcalinidad lo que nos permite utilizarla en refuerzos que requieran alta resistencia al ataque de agentes químicos.

E-glass:

Es un material que se compone a base de calcio-aluminoborocilicato y con un contenido máximo de alcalinidad de 2.0%. Este material es utilizado generalmente en aplicaciones de bajo rendimiento en cuanto a resistencia se refiere, así como también en aplicaciones eléctricas donde es necesario que el material presente gran resistencia al flujo de corriente eléctrica comportándose como un dieléctrico. Generalmente la resistencia a la tensión de cada filamento de dicho material es aproximadamente de 3450 MPa (500 Ksi) y su módulo de Young de 72.4 GPa.

S-glass, S-2:

Estos dos tipos de fibras se basan en el magnesio-aluminosilicato, ambos materiales poseen gran resistencia, superior a la de la E-Glas, considerando que la resistencia a la tensión se aproxima a los 4600 MPa (670 Ksi) y su módulo de Young 85.5 GPa, por lo que es utilizado en aplicaciones de medio-alto desempeño donde se presentan esfuerzos de tensión elevados como lo es en componentes de aeronaves y vehículos de guerra.

Cabe mencionar otros tipos de fibras de vidrio que no son muy comunes en el mercado debido a su aplicación es muy específica, por lo que su volumen de producción es muy bajo. Entre ellas tenemos la C-Glass que se caracteriza por su resistencia química, R-Glass la cual presenta alta resistencia a la tensión. Algunas de las fibras no son comercializadas siendo el caso de la basadas en óxidos de berilio que se caracterizan por su alto modulo (110 GPa.), también las que contienen plomo que son útiles en la protección radioactiva, la D-Glass por su muy bajo coeficiente dieléctrico y las fibras basadas en óxidos de litio que son transparentes ante rayos x [9].

1.1.1.2. Método de obtención de fibras

El proceso se inicia con medición de los componentes a utilizar, generalmente el proceso esta automatizado lo que incrementa la precisión en cada una de sus etapas. Habiendo pesado los componentes estos son incorporados en una especie de batidora para obtener uniformidad en la distribución, posteriormente se introduce al horno en el cual el vidrio fundido llega a una temperatura de 1370 °C y que conforme avanza a la sección de refinamiento su temperatura disminuye a 1260 °C. Para poder obtener los filamentos de vidrio es crucial la temperatura del material ya que de ella depende la viscosidad, procurando que esta sea muy baja ya que esto le permite al material fundido fluir por los dados. Dicho herramental es fabricado empleando una aleación de rodio-paladio, y posee orificios diminutos habiendo dados de 400 orificios hasta de 8000 orificios. Estos dados son calentados y controlados automáticamente para reducir al máximo las variaciones en la viscosidad del vidrio ya que este es alado por unos rodillos a una velocidad cercana a los 60 m/s. Entre los dados y el rodillo el material es enfriado con una brisa de agua e inmediatamente se le aplican algunos químicos los cuales determinan ciertas propiedades como la adhesión y la compatibilidad con resinas. Habiendo obtenido el filamento se procede a darle el diámetro requerido que básicamente este se obtiene desde que sale del dado pero existen rodillos en forma de espiral que reducen el diámetro hasta la medida requerida [10].

Una práctica común en la industria de la fibra de vidrio es la designación de nomenclatura para los filamentos de fibra basándose en el alfabeto, en dicha nomenclatura encontramos que las fibras finas se encuentran entre la letra D y la G mientras que las gruesas van de la G a la T. Los filamentos de fibra pueden ser utilizados para crear carretes de hilo, telas o simplemente bultos de material triturado en forma de fibra corta, para cada forma existe un proceso específico que a grandes rasgos puede apreciarse a continuación [1,2,3] (fig. 1.5).

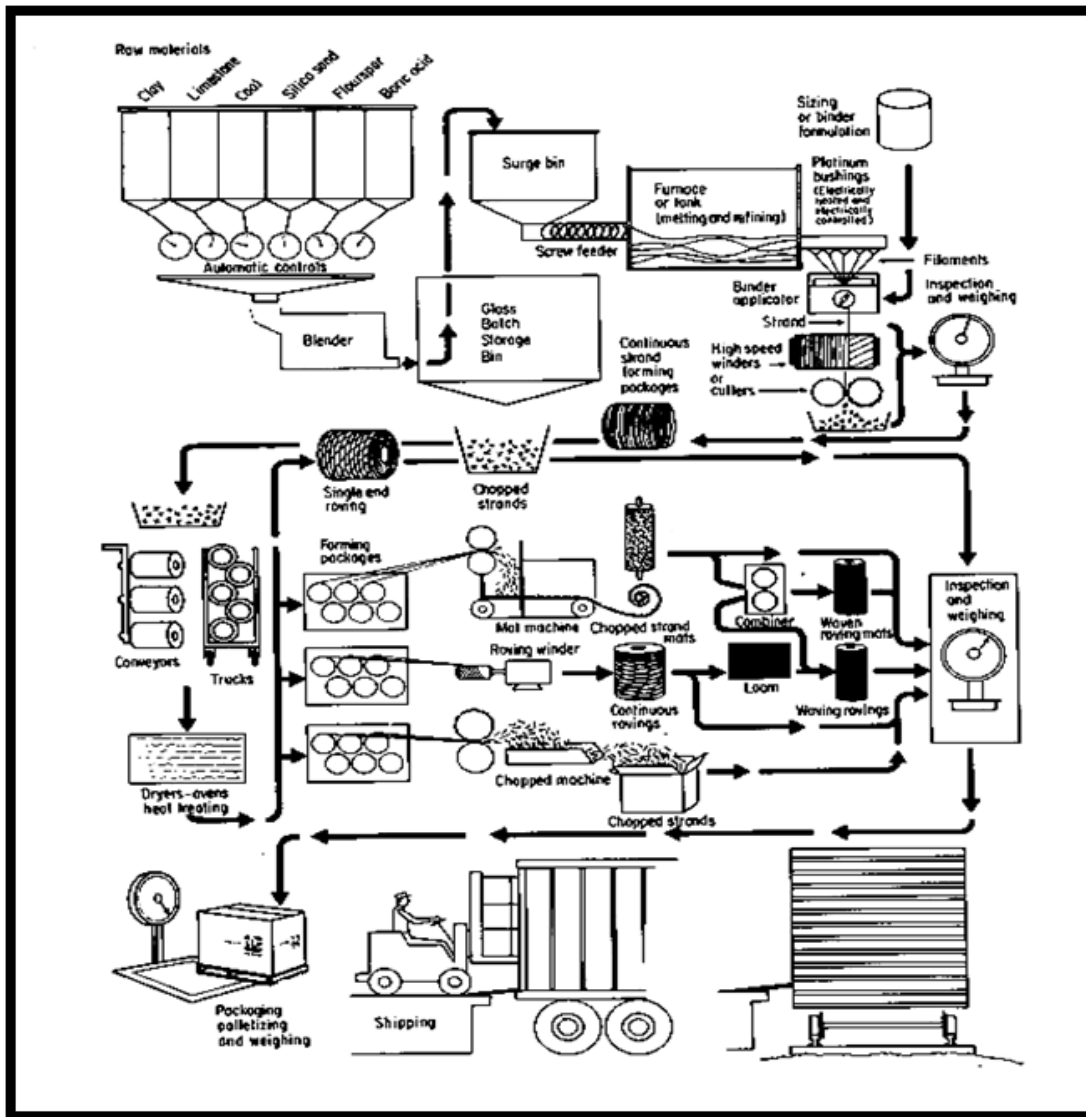


Figura 1. 5.- Diagrama de proceso en la fabricación de la fibra de vidrio

1.1.1.3. Propiedades y característica de las fibras

Para la medición de las propiedades de la fibra de vidrio existen diferentes presentaciones de la misma las cuales se adecuan a la prueba a realizar como es el caso de que cuando se desea determinar las propiedades de resistencia a la tensión, módulo de Young y resistencia química pudiéndose medir en la fibra directamente; que por otra parte, cuando requerimos obtener las propiedades de permeabilidad relativa, factor de disipación, resistencia dieléctrica y expansión térmica, los experimentos se realizan sobre láminas de fibras o en bloques los cuales reciben un tratamiento térmico para liberar esfuerzos debido a la formación en frío de la muestra. Para obtener el índice de refracción y la densidad se pueden utilizar tanto las fibras como los bloques y láminas. Generalmente la densidad de la fibra de vidrio es de entre 2.5 g/cm³ y 2.62 g/cm³ para las fibras E-Glass y C-Glass, estos valores se obtienen por medio de la norma ASTM C693 la cual refiere al método de obtención de la densidad del vidrio [11, 12].

Respecto a las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de fibras de vidrio, las podemos apreciar de la siguiente manera (tabla 1.2).

Tabla 1. 2.- Propiedades físicas y mecánicas de los diferentes tipos fibra de vidrio.

Fibra	Coeficiente de expansión lineal 10 ⁻⁶ /°C	Calor específico cal/g/°C	Constante dieléctrica a temperatura a 1MHz	Resistencia dieléctrica kV/cm	Índice de refracción	Resistencia a la tensión a 23°C		Módulo de Young's		Elongación a la ruptura %
						Mpa	Ksi	Gpa	10 ⁶ psi	
E- Glass (con Boro)	4.9 - 6.0	0.192	5.86 - 6.6	103	1.547	3100 - 3800	450 - 551	76 - 78	11.0 - 11.3	4.5 - 4.9
E- Glass (sin Boro)	6.00	.....	7.00	102	1.56	3100 - 3800	450 - 551	80 - 81	11.6 - 11.7	4.6
ECR- Glass	5.90	.....	.....	.....	1.576	3100 - 3800	452 - 551	80 - 81	11.6 - 11.7	4.5 - 4.9
D-Glass	3.10	0.18	3.56 - 3.62	.....	1.47	2410.00	349.00	.....	.....	.....
S-Glass	2.90	0.18	4.53 - 4.6	130	1.52	4380 - 4590	635 - 666	88 - 91	12.8 - 13.2	5.4 - 5.8
Silicio/cuarzo	0.54	.....	3.78	.....	1.4585	3400	493	69	10	5

1.1.2. Fibra de carbono

La aparición de la fibra de carbono se remonta al año de 1879, cuando el Inventor Thomas Edison, utilizó fibras de carbono como filamentos en sus primeras bombillas. A pesar de que estas fibras carecían de la resistencia a la tracción como las de carbono de hoy, su considerable tolerancia al calor las hizo ideales para su aplicación. Dichas fibras estaban hechas de materiales a base de celulosa, como el algodón o bambú, a diferencia de los basados en precursores derivados del petróleo utilizados hoy en día. El método para obtener las fibras era la carbonización de filamentos de bambú siendo estos horneados a altas temperaturas en atmósfera controlada, se trata de un método conocido como "pirolisis", que aún es utilizado en la actualidad. El descubrimiento y aplicación de las fibras de carbono de alta resistencia se dio a finales de los años cincuenta siendo el rayón el precursor empleado para la creación de las fibras modernas, que años después, fue sustituido por materiales más eficaces, tales como el poliacrilonitrilo (PAN) (fig. 1.6).

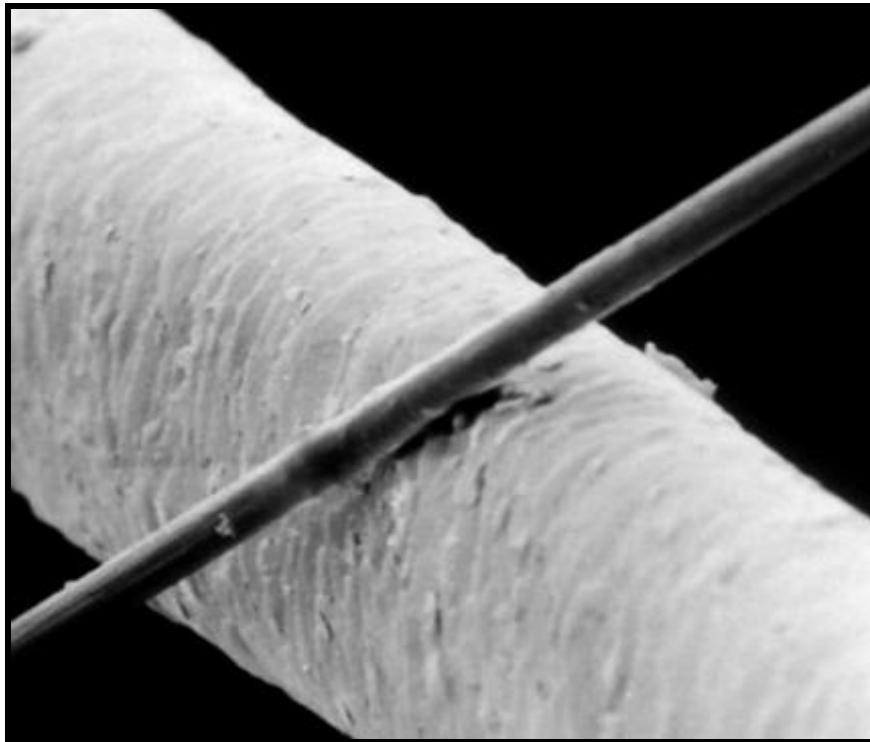


Figura 1. 6.- Comparación entre un cabello humano (mayor tamaño) y un filamento de fibra de carbono.

Los beneficios de estas fibras de alta resistencia son claros, pesaban una fracción del peso del acero y presentaban mayor resistencia a la tracción, mucho más que el acero. En la actualidad una característica importante de la fibra de carbono es su alto módulo, o la resistencia al estiramiento. Esta falta de elasticidad juega un papel importante en el refuerzo de estructuras rígidas. Siendo así que en las últimas décadas, que las fibras de carbono, se les han encontrado una amplia gama de aplicaciones como en aeronaves civiles y comerciales, artículos recreativos así como en el mercados del transporte.

Los compuestos de fibra de carbono son ideales para aplicaciones donde la resistencia la tensión, rigidez, bajo peso y resistencia a la fatiga son. También pueden ser utilizados en ciertas ocasiones donde las altas temperaturas, alta inercia química y amortiguación son importantes [8, 13].

1.1.2.1. Composición química de las fibras

Los filamentos de esta fibra se obtienen a base de la pirolisis o descomposición por temperatura, los materiales utilizados en este proceso generalmente poseen un alto contenido de carbón, después del proceso de pirolisis las fibras conservan la forma y textura del material precursor del cual han sido obtenidas. Actualmente los materiales precursores más utilizados para la obtención de fibras de carbono son el rayón (seda artificia), polyacrylonitrilo y brea de petróleo. En el caso de las fibras obtenidas del rayón que son derivados de materiales de celulosa, presentan una gran pérdida de peso o un coeficiente bajo de transformación al momento de convertirse en fibra de carbono siendo esto una gran desventaja. Usualmente solo el 25% de la masa del material inicial es lo que queda después del proceso de carbonización por lo que la obtención de la fibra de carbono basada en el rayón es un proceso caro a comparación de otras fuentes. Las fibras de carbono obtenidas de polímeros como el poliacrilonitrilo (PAN) son más comunes que las de rayón, siendo un polímero de color blanco con una densidad de 1.17 g/cm³, y cadenas grandes de átomos de carbono conectados entre sí, una gran ventaja de este material precursor sobre los demás es su elevado factor de transformación que de aproximadamente un 50%, es decir, que después del proceso de carbonización o pirolisis la masa del material obtenido es un 50% de la masa inicial lo que beneficia en los costos de fabricación. Es importante mencionar que las fibras de carbono obtenidas a partir del poliacrilonitrilo poseen una mayor resistencia a la tensión que las obtenidas de otros materiales y es debido a su inexistencia o existencia casi nula de

imperfecciones en la superficie de la fibra lo que reduce de gran manera la concentración de esfuerzos.

Otros materiales precursores de los cuales también se obtienen fibras de carbono son derivados del petróleo como lo es el asfalto pero cabe señalar que el material resultante no posee muy buenas características ya que presenta defectos al momento de pasar de una fundición a otra [1][4].

1.1.2.2. Método de obtención de las fibras

Cada material precursor de la fibra de carbono debe ser sometido a un proceso específico de acuerdo a las características y composición del material, pero generalmente dichos procesos poseen ciertas fases que son iguales para todos siendo estas:

- Estabilización
- Carbonización
- Grafitización
- Tratamientos de superficie

Estos procedimientos se llevan a cabo a altas temperaturas con atmosferas controladas, y dependiendo de la manera en la cual se desarrolle cada fase, las características del material obtenido serán modificadas, es por ello que se explica brevemente cada uno de ellos [3].

Estabilización:

La primera parte del proceso implica el estiramiento y calentamiento de las fibras PAN a una temperatura aproximada de 200 a 300 °C (390 a 570 °F) dentro de una atmosfera rica en oxígeno lo que ayuda a la orientación de las moléculas, de manera que puedan resistir la pirolisis a mayor temperatura sin descomponerse. El estiramiento después y durante la estabilización ayuda a desarrollar la orientación molecular lo que permite obtener una estructura con gran módulo de elasticidad y alta resistencia a la tracción pudiendo ser mejorada por el tratamiento térmico posterior.

Carbonización:

Para las fibras con un módulo de elasticidad estándar y medio, generalmente se utiliza la pirolisis sobre las fibras la cual se da a temperaturas que van desde los 1000 °C a los 1500 °C en una atmosfera inerte, por lo general en un 95% de carbono. Durante la carbonización, las fibras sufren de contracción en su diámetro y pierden aproximadamente el 50% de su peso. El reducir o impedir el encogimiento de la fibra en dirección longitudinal aumenta las propiedades mecánicas de la fibra terminado el

proceso.

Grafitización:

Es un procedimiento extra de pirolisis en el cual la temperatura excede los 2000 °C dentro de una atmosfera inerte. Dicho proceso reduce el nivel de impurezas así como a su vez promueve el crecimiento de cristales. Cabe mencionar que mientras mayor sea la temperatura en los procesos de carbonización y grafitización, mayor será el módulo de elasticidad de las fibras resultantes.

Tratamientos en la superficie:

Sencillamente este proceso trata de mejorar o promover la interacción de la fibra con la matriz, es así, que dependiendo del tipo de matriz en el cual será embebida la fibra, el tratamiento de la superficie será diferente para cada tipo de resina (**fig. 1.7**).

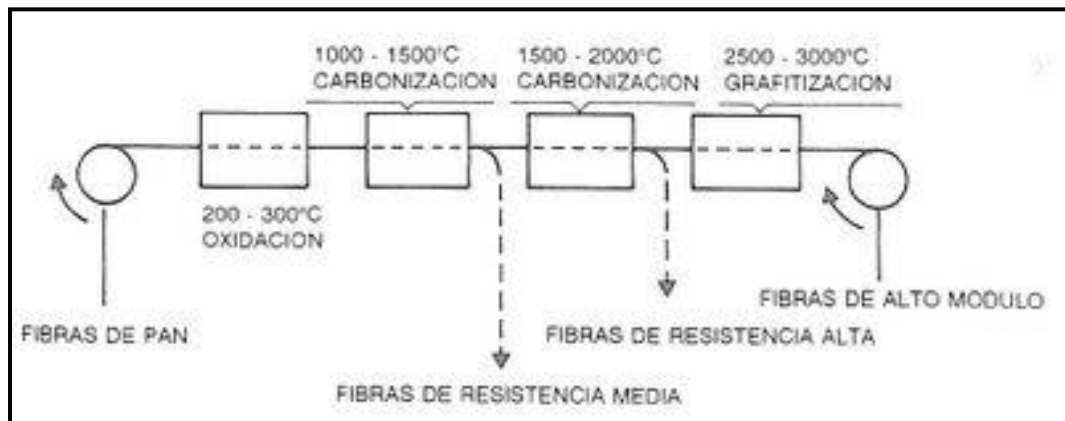


Figura 1. 7.- Proceso generalizado para la obtención de las fibras de carbono.

1.1.2.3. Propiedades y características de las fibras.

Los materiales compuestos a base de fibras de carbono poseen propiedades mecánicas de consideración ya que pueden llegar a ser cinco veces más fuerte que un acero 1020 para componentes estructurales, incluso cinco veces más ligero. Comparando los compuestos de fibra de carbono con el aluminio 6061 se aprecia que el de fibra es siete veces más resistente y dos veces más rígida que el de aluminio sin dejar atrás que su peso es mucho menor. De manera notable los compuestos de fibra de carbono presentan una gran resistencia a la fatiga, muy por encima de la que ofrecen la mayoría de los metales y si se utiliza con las matrices adecuadas podemos obtener un compuesto altamente resistente a la corrosión (tabla 1.3).

Las propiedades de dichos compuestos van más allá de lo imaginable ya que un cierto tipo de fibras de carbono obtenidas de una meso fase son capaces de conducir el calor tres veces mejor que el cobre lo que lo hace bueno conductores de calor o disipadores teniendo como aplicación en componentes de frenos de aeronaves y boquillas de propulsores tipo cohete. Estas propiedades tan singulares son el resultado de la micro estructura de las fibras, tanto en la dirección axial como en la transversal.

Es de gran importancia conocer la morfología de las fibras de carbono para poder así entender su comportamiento, podemos decir que un filamento de fibra de carbono es como un cilindro diminuto con un radio de 7 μ m el cual se conforma delgadas cintas entrelazadas y con una orientación muy cercana a la paralela al eje del cilindro, es así como dependiendo de la longitud y grado de inclinación de dichas cintas determinara el módulo de la fibra [8, 14].

Tabla 1. 3.- Propiedades físicas y mecánicas de los tres grandes grupos de fibras de carbono.

Propiedad	Módulo de tipo comercial	Grado Aeroespacial		
		Módulo estándar	Módulo intermedio	Módulo alto
Módulo a tensión Gpa (10 ⁶ psi)	228 (33)	220-241 (32-35)	220-297 (42-43)	345-448 (50-65)
Resistencia a la tensión Mpa (Ksi)	380 (550)	3450-4830 (500-700)	290-297 (42-43)	3450-5520 (600-800)
Elongación a la ruptura %	1.6	1.5-2.2	1.3-2.0	0.7-1.0
Coefficiente de expansión térmica en direccion axial,	-0.4	-0.4	-0.55	-0.75
Densidad g/cm ³ (lb/in ³)	1.8 (0.065)	1.8(0.065)	1.8 (0.065)	1.9 (0.069)

1.1.3.Fibra de armida

Fue la primer fibra orgánica con módulo de elasticidad lo suficientemente elevado como para ser utilizada en aplicaciones avanzadas en materiales compuestos. El nombre de aramida es una abreviación de poliamida- aromática y fue introducida hacia los años 70's por la compañía Du Pont & Company bajo el nombre de Kevlar. En sus inicios las aplicaciones de este nuevo material se enfocaron en los neumáticos automotrices y el refuerzo de ciertos plásticos. Las características de este material lo hacían muy especial ya que poseía un peso muy bajo, alta dureza y resistencia lo que derivó en aplicaciones más complejas como equipo de protección, cuerdas, artículos balísticos, cables, etc. Actualmente se han desarrollado fibras similares al Kevlar, como son el Twaron creado por la compañía Enka Corporation así como el HM-50 de Terjin (Japón)[1].

1.1.3.1. Composición química de las fibras.

El Kevlar es un polímero altamente cristalino, llevó mucho tiempo encontrar alguna aplicación útil para el Kevlar, dado que no era soluble en ningún solvente. Por lo tanto, su procesado en solución estaba descartado. No se derretía por debajo de los 500 °C, de modo que también se descartaba el hecho de procesarlo en su estado fundido. Fue entonces cuando una científica llamada Stephanie Kwolek apareció con un plan brillante. El cual consistía en hilarlo en medio húmedo, lo cual resulto lo más adecuado debido a que este es un polímetro que se obtiene por poli condensación, provocando que éste al procesarlo en medios húmedos, tienda a des polimerizarse, generando con esto que el material sea más manejable y permita su proceso (fig. 1.8).

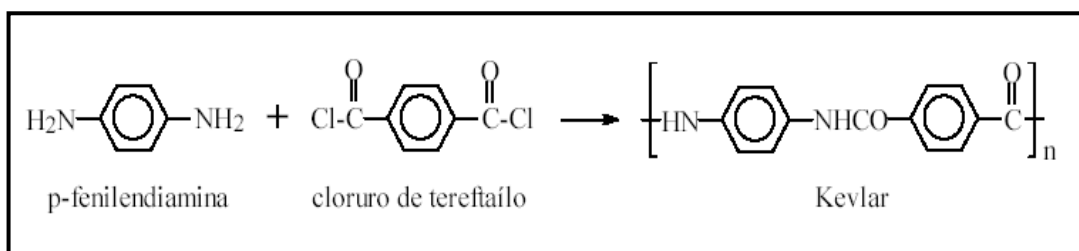


Figura 1. 8.- Composición química de la aramida.

En la figura 1.8 se muestra al proceso de policondensación. Debido a los anillos aromáticos, este tipo de poliamida tiene una estructura más rígida que el nylon. Generando que esta estructura al compararla con una fibra de acero con las mismas dimensiones, la fibra de kevlar posea la capacidad de soportar cinco veces la carga que soporta el acero [3].

1.1.3.2. Método de obtención de las fibras.

Las fibras de aramida; mejor conocidas como Kevlar, son llamadas también fibras PPDT debido al proceso de condensación del cual son extraídas, es por ello que solo puede ser procesada mediante el método de fricción en solución, el cual consiste en obtener la fibra desde el proceso de polimerización. En este punto, se pueden controlar a voluntad sus propiedades, destacando que para las fibras como el Kevlar solo es posible procesarlas como fibras, ya que su resistencia mecánica y su estructura cristalina no permite realizar otro proceso de transformado. En este proceso, la cámara de polimerización contiene la mezcla de meros, en nuestro caso *p*-fenilendiamina y cloruro de terftailo, los cuales inician el mecanismo de policondensación, eliminando HCl como residuo de la policondensación, cuando se hace el hilado ese comienza por exponer al polímero en un medio con HCl, lo cual me permite tener al polímero en estado “maleable”, ya que no ha endurecido totalmente y así facilitar el hilado [13] (fig. 1.9).

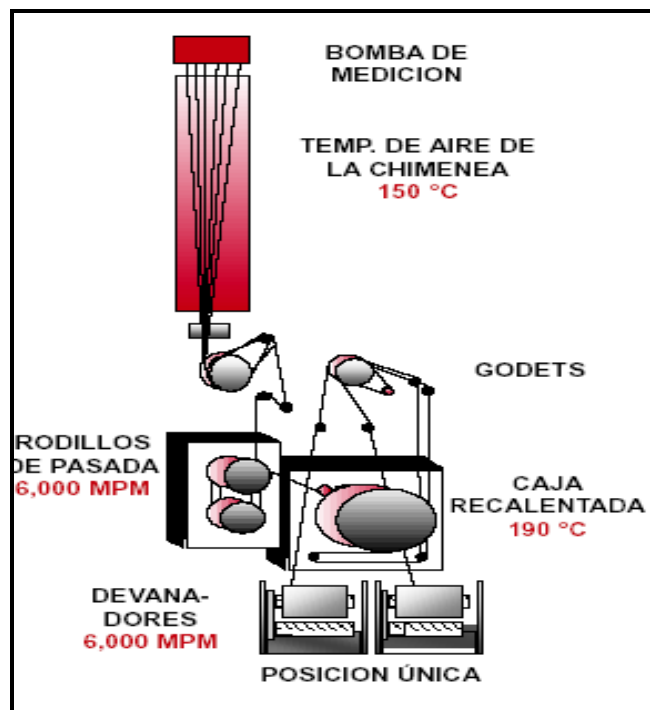


Figura 1. 9.- Diagrama general de proceso para la de fibras de aramida.

1.1.3.3. Propiedades y características de las fibras

Básicamente las propiedades de las fibras de aramida se enfocan en el Kevlar-49 y el Kevlar-29 debido a que son los materiales de esta categoría más utilizados en la industria. Iniciando por el Kevlar-49 tenemos que es un material utilizado para la fabricación de componentes estructurales debido a su alto módulo , a diferencia del Kevlar-29 el cual por su alta resistencia es utilizado en aplicaciones donde se requiere tolerancia al daño como lo es en el bloqueo de proyectiles balísticos. La resistencia a la tensión de las aramidas se encuentra en el rango de los 3.6 a los 4.1Gpa. Esto es superior al doble de la resistencia de las fibras orgánicas convencionales como el Nylon 66 y 50% mejor que la resistencia de la E-glass. En lo que respecta a la dureza, este material destaca por dicha propiedad que está relacionada directamente con la resistencia al impacto lo que la hace ideal para detener proyectiles de armas de fuego [15].(tabla 1.4).

Tabla 1. 4.- Propiedades físicas y mecánicas de las fibras de Aramida más comunes.

Material	Densidad g/cm ³	Diámetro de filamento		Módulo a tensión		Resistencia a la tensión		Porcentaje de elongación
		μm	μin	Gpa	10 ⁶ psi	Gpa	10 ⁶ psi	
Kevlar 29 (alta tenacidad)	1.44	12	470	83	12	3.6-2.8	0.525-0.400	4
Kevlar 49 (alto módulo)	1.44	12	470	131	19	3.6-4.1	0.525-0.600	2.8
Kevlar (ultra módulo)	1.44	12	470	179	26	3.4	0.5	2

La estructura fibrosa y el comportamiento que desarrolla bajo cargas de compresión ayudan a que el material sea menos propenso a fallar de manera catastrófica, comportándose así de manera dúctil y maleable a diferencia de la fibra de vidrio y de carbono, es decir, bajo cargas de compresión la falla que se presentara no será tan drástica debido a que el material tiende a comprimirse formando pequeños aros sobre la superficie del filamento llamados “King bands ” debidos a severas cargas de compresión [1] (fig. 1.10).



Figura 1. 10.- Deformación de filamento de Aramida sujeto a compresión.

1.2. Matrices.

Los materiales compuestos están formados por dos partes claramente diferenciadas: la matriz, que sirve fundamentalmente de base de los otros materiales y los materiales reforzadores que serán, de otra clase de material, distinto de la matriz. Como se mencionó con anterioridad, el propósito fundamental de la matriz o fase continua es la de mantener las fibras o el material de refuerzo junto por medio de su propiedades de cohesión y adhesión, así como también de transmitir la carga entre las fibras protegiéndolas al mismo tiempo del ataque ambiental. En los materiales compuesto se dice que la matriz es la parte débil del compuesto debido a que no soportan la carga o la fatiga como lo hacen las fibras siendo está más vulnerable a la falla. Es por esto que cuando un material compuesto se encuentra sometido a cargas diferentes, la fase continua tiende a sufrir agrietamiento en escala microscópica que va desde la superficie hacia el centro del material dependiendo de la forma de propagación de la falla. Sin embargo dicha fase es una parte fundamental en los compuestos ya que es capaz de proveer un sin número de funciones al sistema [7, 13] (fig. 1.11).

- Mantener las fibras de refuerzo en la dirección y posición deseada para que pueda llevarse a cabo la distribución de la carga entre las fibras.
- Distribuye generalmente, de manera equitativa, la carga entre las fibras.
- Provee resistencia al momento de que una grieta tiende a propagarse.
- Proporciona toda la fuerza interlaminar de corte en el material.

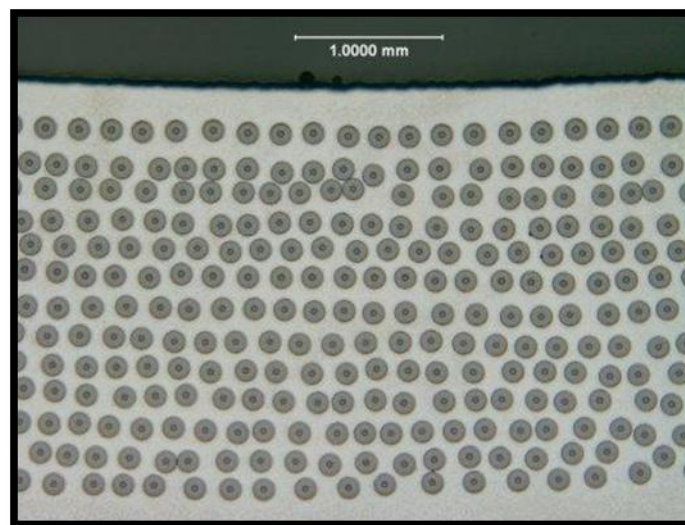


Figura 1. 11.- Corte transversal de un compuesto, en donde se puede apreciar la matriz y los filamentos de fibra.

Más allá de las propiedades mencionadas, la matriz también determina la temperatura a la cual el material compuesto puede ser sometido sin ser dañado así como también determina la resistencia al ambiente en el cual estará en servicio el material. Existen mucho tipos de matrices matrices o resinas, las cuales dependiendo la aplicación son utilizadas para fabricar el compuesto, pero son dos grupos los que definen su comportamiento, el grupo de las resinas termoestables y el de las resinas termoplásticas. Las resinas termoestables, como su nombre lo dice, son aquellas que después de haber llegado a su etapa de curación o endurecimiento no podrán ser deformadas por medio de calor sin degradarse y perder su propiedades, a diferencia de las termoplásticas las cuales una vez curadas o endurecidas pueden ser deformadas y vueltas a formar por medio de calor sin degradarse ni perder su propiedades. Es por ello que solo nos enfocaremos en las resinas termoestables debido a la aplicación que se les quiere dar.

Dentro de este grupo de resinas existen varios tipos de ellas como son:

- Epóxicas
- Vinil-éster y Poliéster
- Fenólicas

Existen otros tipos de matrices de alto desempeño utilizadas en el ramo aeroespacial debido a sus propiedades específicas siendo estas:

- Matriz metálica
- Matriz cerámica
- Matriz a base de Carbono

Básicamente concentraremos nuestra atención sobre los tres primeros tipos de matrices (epóxica, polimérica y fenólica) debido a que son de uso más comercial así como su utilización es más sencillas sin dejar atrás su grandes propiedades las cuales será descritas posteriormente, respecto a las matrices metálica, cerámica y a base de carbono, serán descritas de manera breve.

1.2.1. Matriz epóxica

La matriz o resina de tipo epóxica es de las más utilizadas en la fabricación de materiales compuestos avanzados de grado estructural principalmente en aplicaciones aeroespaciales, sin embargo estas resinas son susceptibles a la humedad durante el proceso de curado y posterior, aun si son superiores a las resinas de tipo polyester en cuanto a resistencia al medio ambiente se refiere ofreciendo además mejores propiedades mecánicas. Es por ello que son muy versátiles y comerciales, se puede decir que las matrices de tipo polyester poseen un costo menor que las epoxica y que las de poliamidas presentan mejor resistencia en altas temperaturas, pero las resinas epoxicas poseen un extenso rango de propiedades mecánicas, físicas y de procesamiento lo que las coloca dentro de las más utilizadas y efectivas en el ramo de los compuestos [1][2].

1.2.1.1. Composición química de la matriz

Una resina epóxica o poli epóxido es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor. Las resinas epoxi más frecuentes son producto de una reacción entre bisfenol-A y la epiclorohidrina., siendo el bisfenol-A el que se obtiene de fenol y acetona. Las resinas epoxi están constituidas comúnmente de dos componentes que se mezclan previamente antes de ser usados; al mezclarse reaccionan causando la solidificación de la resina, su curado se realiza a temperatura ambiente, durante ese curado o secado se forman enlaces cruzados lo que hace que su peso molecular sea elevado. En su constitución, poseen un anillo de tres miembros conocido como "anillo epoxi". Este anillo es obtenido mediante reacciones de condensación (en presencia de hidróxido de sodio) entre la epiclorohidrina (1-cloro-2,3-epoxi-propano) y el bisfenol (hidroxifenil propano), el cual es obtenido a partir del fenol y la acetona. El resultado de esta reacción es un polímero de cadena larga con anillos epoxi en sus extremos (fig. 1.12).

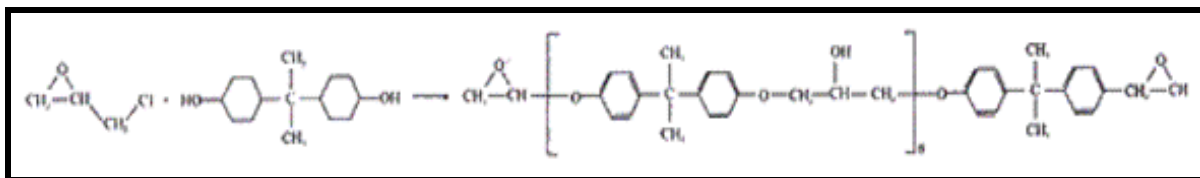


Figura 1. 12.- Cadena de anillos epoxi como polímero.

1.2.1.2. Propiedades mecánicas de la matriz

Dentro de las propiedades más importantes de las resinas epoxicas, se encuentran: alta resistencia a temperaturas hasta de 500°C, elevada adherencia a superficies metálicas, excelente resistencia a los productos químicos, son termoestables, químicamente inertes, no se encogen, y tienen buenas propiedades eléctricas. Además, se puede combinar con otros plásticos para obtener compuestos con nuevas características.

Es posible obtener una variedad muy amplia de resinas con viscosidades que van desde líquidas hasta sólidas, variando su peso molecular. Este tipo de resinas representa características bastante interesantes en lo que se refiere a su interacción química con otras resinas termoendurecibles, pues genera productos finales con muy buenas propiedades de resistencia a la abrasión química, dieléctrica, flexibilidad y adherencia [13] (Tabla 1.5).

Tabla 1. 5.- Propiedades físicas y mecánicas de la resina epoxica.

Propiedad	Temperatura ambiente	Temperatura 150 °C
Resistencia a la tensión, Mpa (Ksi)	58.3 (8.45)	44.5 (6.46)
Módulo a tensión, Mpa (Ksi)	3723 (540)	3723 (540)
Porcentaje de elongación	1.8	1.9

1.2.2. Matriz Fenólica

Las resinas fenólicas constituyen los primeros polímeros preparados artificialmente a partir de sustancias químicas de bajo peso molecular. Es cierto que la galalita, preparada con caseína y fenol, ya desde 1897, se les anticipó, pero mientras la caseína está constituida por moléculas complejas, el fenol es una molécula mucho más simple y de peso mucho más bajo. La facilidad con que el formol da productos resinosos fue observada por Butlenov ya en 1859 y la condensación entre fenol y formol fue descripta por Bayer en 1872.

A principios de 1907, Leo Hendrik Baekrlan encuentra la forma de controlar la reacción y preparar productos útiles constituyéndose el General Bakelite company en 1910. A la muerte de su inventor en 1944 se vendían 175000 ton/ año de esas resinas a pesar de que en el inter habían surgido productos competitivos como las resinas de Urea Formaldehído.

A fines de siglo pasado y a principios de este a producir materiales plásticos y elastómeros con los cuales remplazarán a los materiales naturales que se venían usando desde los orígenes de la historia como el bitumen, citado en la Biblia, la goma laca, que figura en el libro de las Vedas, o el caucho natural, obtenido por coagulación del látex, que los primitivos habitantes de Amazonas o de América central usaban para impregnar telas con las que fabricaban botellas flexibles y zapatos impermeables [13].

1.2.2.1.Composición química de la matriz.

Las resinas fenólicas son productos de condensación de moléculas de fenol y formaldehído en los que el grado de unión y entrecruzamiento de los núcleos elementales y la naturaleza misma de los productos de condensación puede variar entre amplios límites.

Las resinas se polimerizan totalmente, es decir llegan al estado en que son insolubles e infusibles cuando los núcleos fenólicos y metilénicos están encadenados y entrecruzados entre sí en todas direcciones. Lo que se busca comercialmente es producir un pre polímero, o sea una sustancia cuya reacción de condensación haya comenzado pero no esté terminada y que sólo continúe hasta la polimerización total, cuando se las someta a determinadas condiciones físico químicas (presión, temperatura, pH, presencia de catalizadores.)

Hay dos maneras principales de llegar a los productos finales de condensación a partir del fenol y del formol. Una es por vía de las llamadas novolacas, la otra, por el camino de los resoles. La reacción puede ser catalizada por los ácidos o por las bases y progresa en tanto se mantenga la temperatura lo suficientemente alta, aumentando la viscosidad del líquido contenido en el reactor. Los productos de bajo peso molecular son solubles en agua, los de peso molecular intermedio se disuelven en solventes orgánicos y los de alto peso molecular son insolubles e infusibles, por encontrarse altamente reticulados espacialmente[3].

1.2.2.2.Propiedades mecánicas de la matriz

Estas resinas son generalmente empleados como componentes en aislantes de equipos eléctricos, reductores y materiales que sufran desgaste. Esto es debido a que, aunque las resinas epoxi reforzadas con fibra de carbono o de vidrio presentan mejores propiedades mecánicas, estas resinas, con los mismos refuerzos, tienen una mejor comportamiento frente al fuego, la llama y las emisiones tóxicas al ser expuestas al fuego.

Además, podemos destacar las siguientes propiedades:

- Excelentes características eléctricas
- Resistencia al choque y a la abrasión.
- Resistencia al ataque químico, especialmente a los disolventes orgánicos.
- Excelente adhesión a otras resinas.

1.2.3. Matriz poliéster y vinyl-éster

Este tipo de matrices son muy utilizadas en el área de los compuestos principalmente en el sector comercial, industrial y de transportes. Existen un sin número de formulaciones para estos tipos de resinas, agentes de secado, rellenos y muchos más los cuales le proporcionan un amplio rango de posibles aplicaciones. Como resultado se derivan tres grandes grupos:

- Propósito general
- Resistentes al calor
- Resistentes al ataque químico

1.2.3.1. Propiedades mecánicas de la matriz

Una desventaja de este tipo de resinas es su pobre adherencia a las fibras de carbono y aramida, sin embargo no lo es así con la fibra de vidrio ya que al formar un compuesto con estos dos materiales se obtienen muy buenas propiedades mecánicas mas no se pueden comparar con las de una resina epoxica por lo que la posición que ocupan las resinas vinyl éster y polyester son para uso en aplicaciones de bajo rendimiento. Las resinas vinyl éster necesitan ser mezclada con 1,5% de MEKP para comenzar la reacción de curado. Estas resinas tienen un límite de vida de 3 meses, por lo tanto la orden debe hacerse tomando en cuenta este aspecto, las resinas vinyl éster son además compatibles con todas las telas, pigmentos, y rellenos [3, 16] (tabla1.6).

Tabla 1. 6.- Propiedades físicas y mecánicas de la resina Poliéster.

Material	Dureza Barcol	Resistencia a la tensión		Módulo a tensión		Porcentaje de elongación	Resistencia a la flexión		Módulo a flexión	
		Mpa	ksi	Gpa	10 ⁶ psi		Mpa	ksi	Mpa	ksi
Ortoftálico	....	55	8	3.45	0.5	2.1	80	12	3.45	0.5
Isoftálico	40	75	11	3.38	0.49	3.3	130	19	3.59	0.52
BPA	34	40	6	2.83	0.41	1.4	110	16	3.38	0.49
Cloréndico	40	20	3	3.38	0.49	....	120	17	3.93	0.57
Vinyl ester	35	80	12	3.59	0.52	4	140	20	3.72	0.54

1.3. Corazones

Son materiales de tipo estructurales muy livianos los cuales fueron utilizados por primera vez en aviones de la década de los 40's con el objetivo de reducir peso, aumentar la carga útil y la distancia del vuelo. Estos se incorporaron en el diseño de las aeronaves con la intención de sustituir algunos materiales más pesados con la idea de que dicho material funcionara como larguero o viga de soporte, es así que su incorporación de los paneles tipo sándwich ha sido un concepto estructural básico en la industria aeroespacial desde la década de 1950 (fig. 1.13).

Para el año 2000, prácticamente todas las aeronaves de tipo comercial y militares dependían y aun lo hacen, de la integridad y fiabilidad que ofrece núcleos estructurales ligeros. Actualmente estos núcleos se clasifican en tres grandes grupos los cuales serán descritos posteriormente [6][7].

- **Foam**
- **Balsa wood**
- **Honey comb**



Figura 1. 13.- Aplicaciones de los compuestos tipo sándwich.

1.3.1. Foam

Es un material que posee características isotrópicas, del cual existe una amplia variedad de materiales con los cuales puede ser fabricado, como por ejemplo (fig. 1.14).

- Poliestireno (más conocido como espuma de poliestireno)
- Fenólicos
- Poliuretano
- Polipropileno
- Cloruro de polivinilo (PVC), bajo los nombres comerciales Divinycell y Klegecell
- Polymethacrylimide, bajo el nombre comercial Rohacell

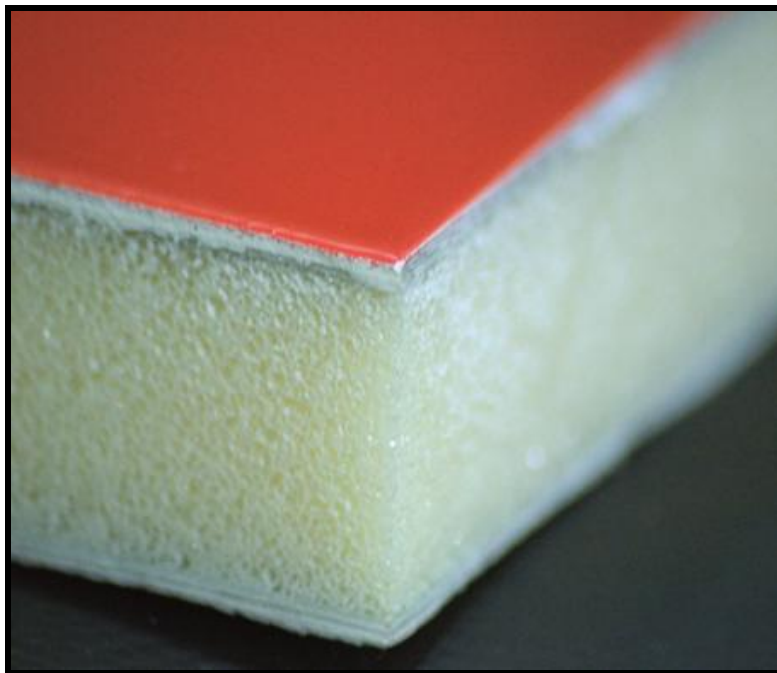


Figura 1. 14.- Ejemplo de aplicación del foam como material de corazón en compuestos tipo sándwich.

1.3.1.1. Propiedades mecánicas del foam

La espuma de poliestireno posee un bajo costo, pero a su vez propiedades mecánicas relativamente bajas. Se utiliza comúnmente para embalajes desechables, espuma fenólica tiene propiedades resistentes al fuego y puede tener densidades muy bajas, pero tiene propiedades mecánicas relativamente bajas. La espuma de poliuretano es relativamente barata y se utiliza principalmente en aplicaciones automotrices las cuales requieren propiedades estructurales en un rango medio. La espuma de polipropileno se utiliza principalmente en aplicaciones automotrices más exigentes que requieren propiedades estructurales. La espuma de Cloruro de polivinilo (PVC) se utiliza principalmente en la industria marina para embarcaciones de tipo recreativo. La espuma Polymethacrylimide es mucho más caro que los otros tipos de espumas, pero tiene mayores propiedades mecánicas y se utiliza principalmente en el giro aeroespacial y aplicaciones de productos recreativos [17, 18] (fig. 1.15).

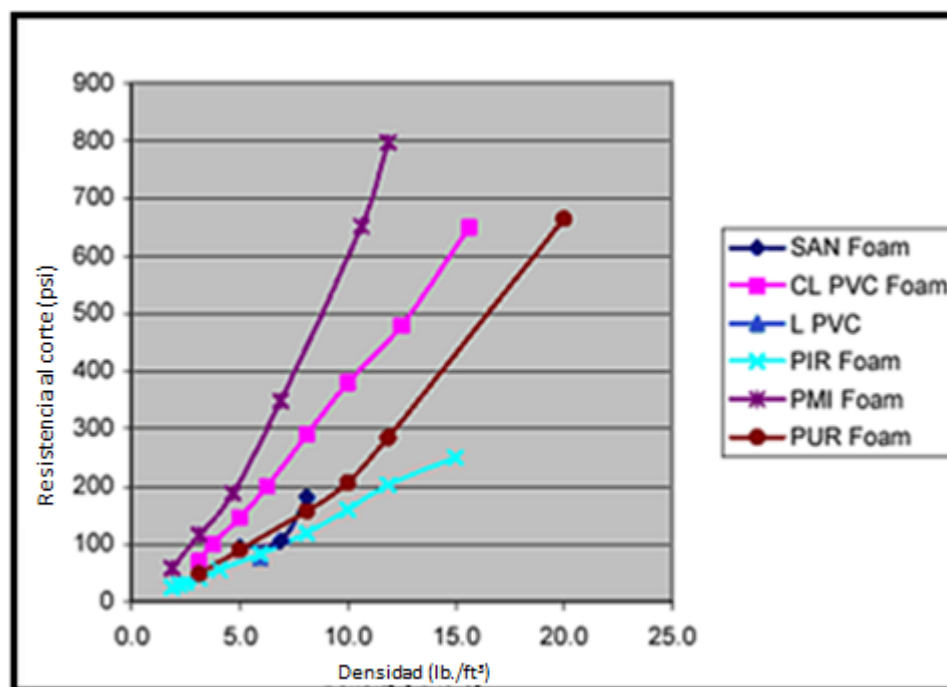


Figura 1. 15.- Diagrama de resistencia al corte vs densidad en diferentes tipos de foam.

1.3.2. Madera balsa

Es un producto de madera natural con células alargadas cerradas, la densidad de la madera de balsa (96-288 kg/m³, o 18.6 lb/ft³) es menor de la mitad de la densidad de los productos convencionales de madera (desde 480 hasta 720 kg/m³, o 30 a 45 lb/ft³). Sin embargo, la balsa tiene una densidad mucho más alta que los otros tipos de núcleos estructurales. Es importante mencionar que no está disponible en la densidad de menos de 96 kg/m³ (6 lb/ft³) [6, 10].

1.3.2.1. Propiedades mecánicas de la madera balsa

De manera simple la madera balsa no posee muchas propiedades física ni mecánicas a reserva de su baja densidad y relativamente buena resistencia a la compresión (fig.1.16).

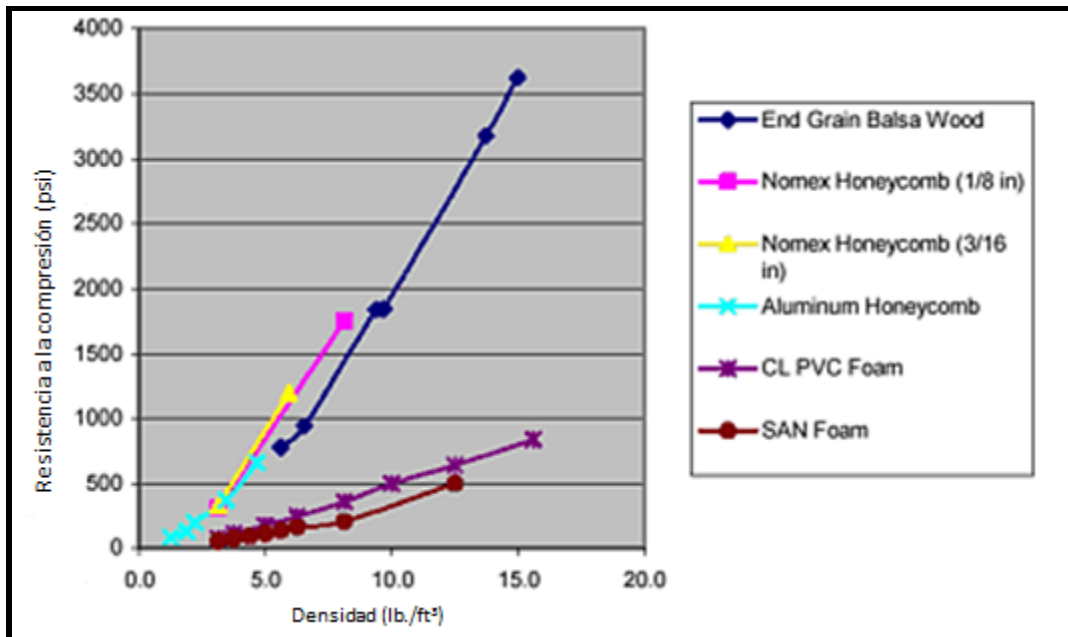


Figura 1. 16.- Diagrama de compresión vs densidad de diferentes tipos de materiales de corazón.

1.3.3. Honey comb

Es una estructura utilizada como corazón en la fabricación de compuestos tipo sándwich con el objetivo de minimizar el peso e incrementar la resistencia del compuesto. La geometría de este material se basa principalmente en celdas hexagonales formadas por laminas muy delgadas de material preformado las cuales se sobreponen formando así una geometría con propiedades mecánicas muy particulares. Los materiales con los cuales se pueden fabricar este tipo de estructuras pueden ser muy variados, desde plástico o papel, hasta materiales más sofisticados como fibra de vidrio, aluminio, titanio, etc. El costo de este tipo de corazón es muy elevado a comparación de los de madera balsa y foam, pero las propiedades mecánicas que muestra compensan tal diferencia lo cual lo hace apto para aplicaciones de alto desempeño como lo es en el sector aeroespacial [1, 9] (fig. 1.17).

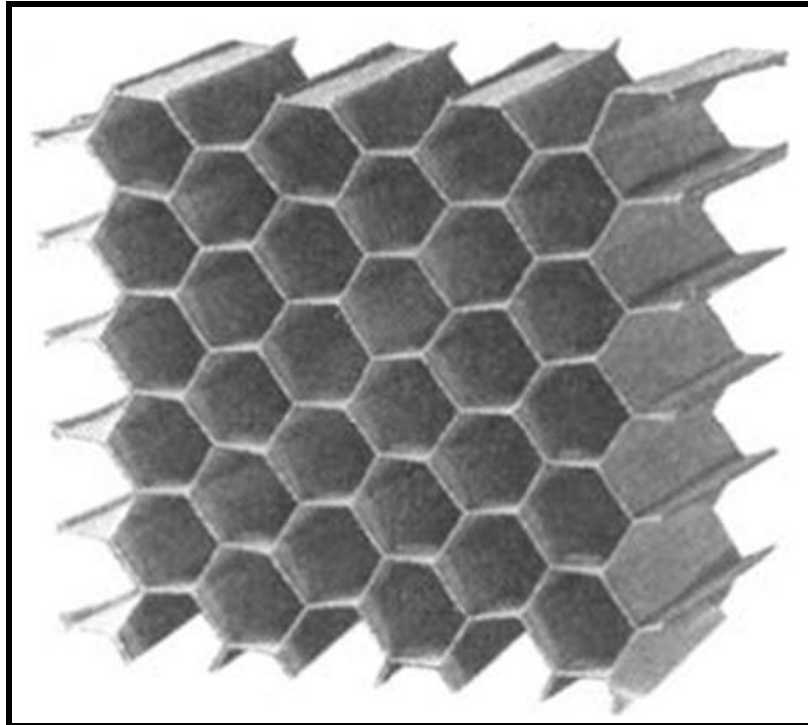


Figura 1. 17.- Morfología del honeycomb empleado en compuestos tipo sándwich.

1.3.3.1. Propiedades mecánicas del honey comb

Debido a su geometría, cuando son implementadas como corazón en materiales compuestos tipo sándwich, este tipo de estructuras presentan propiedades muy interesantes en comparación a los corazones de foam o madera balsa, por mencionar algunas de ellas tenemos (tabla 1.7).

- Alta resistencia y bajo peso
- Alta rigidez
- Buen abarcamiento de superficie en proporción a su volumen
- Resistencia uniforme bajo cargas de compresión.
- Resistencia a la fatiga y vibración
- Aislante sónico
- Aislante térmico.

Tabla 1. 7.- Propiedades mecánicas de algunos tipos de honey comb

Designación de Honeycomb por Hexcel	Compresión		Lámina a corte			
	Estabilizado		Dirección "L"		Dirección "W"	
	Resistencia psi	Módulo Ksi	Resistencia	Módulo Ksi	Resistencia psi	Módulo Ksi
HFT -1/8 - 3.0	350-270	23	185-150	17	95-75	7
HFT -1/8 - 4.0	560-420	46	315-240	37	150-120	12
HFT -1/8 - 5.5	890-640	69	460-360	40	230-180	14
HFT -1/8 - 8.0	1750-1500	129	580-495	49	340-290	24

1.4. Estructura del laminado a base de materiales compuestos

Como se mencionó anteriormente los materiales compuestos tienen diversas aplicaciones, siendo estas las que determinen el tipo de material, su conformación y el proceso de fabricación, por mencionar algunas de sus variantes. Es por ello que para el estudio y desarrollo de componentes estructurales se utiliza una de materiales compuestos llamada laminado. Un laminado es un conjunto de capas de un material o de diferentes (hibrido) las cuales están apiladas y embebidas en una matriz así como también están dirigidas en cierta orientación respecto a un eje proporcionando, obteniendo una configuración especial para cada requerimiento [5, 7] (fig. 1.18).

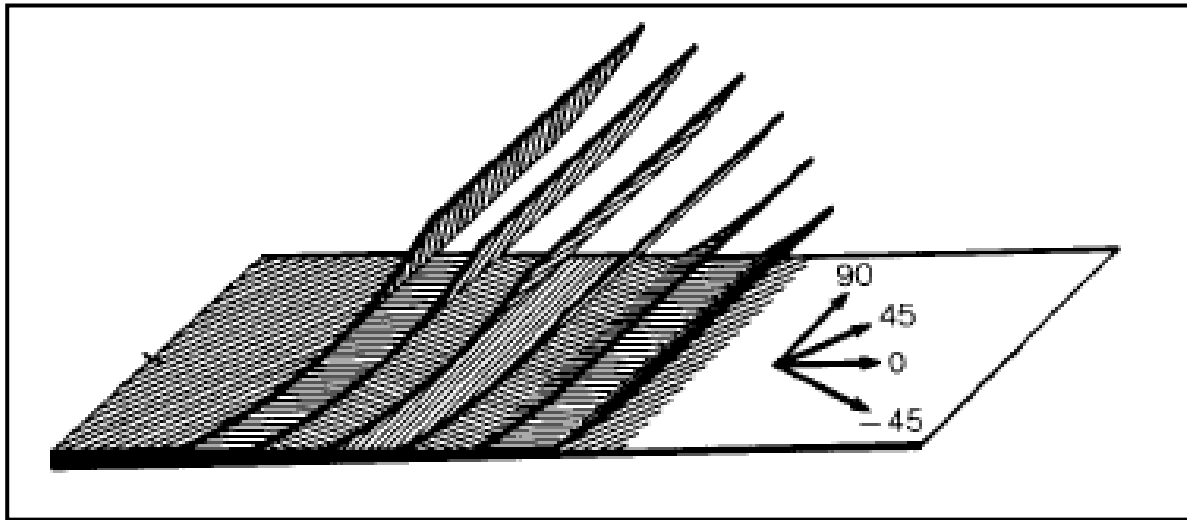


Figura 1. 18.- Configuración de un compuesto laminado multidireccional.

1.4.1. Características de los laminados.

Para que a un material compuesto se le considere laminado este debe de estar conformado por dos capas de material como mínimo sin importar sus direcciones que para la descripción del mismo es necesario conocer :

- Tipo de material
- Orientación
- Espesor

Dichas características tienen como consecuencia la anisotropía del material, es decir, que de acuerdo a la orientación de sus capas, la resistencia a los esfuerzos de todo el laminado será diferente en cada una de sus direcciones [10] (fig. 1.19).

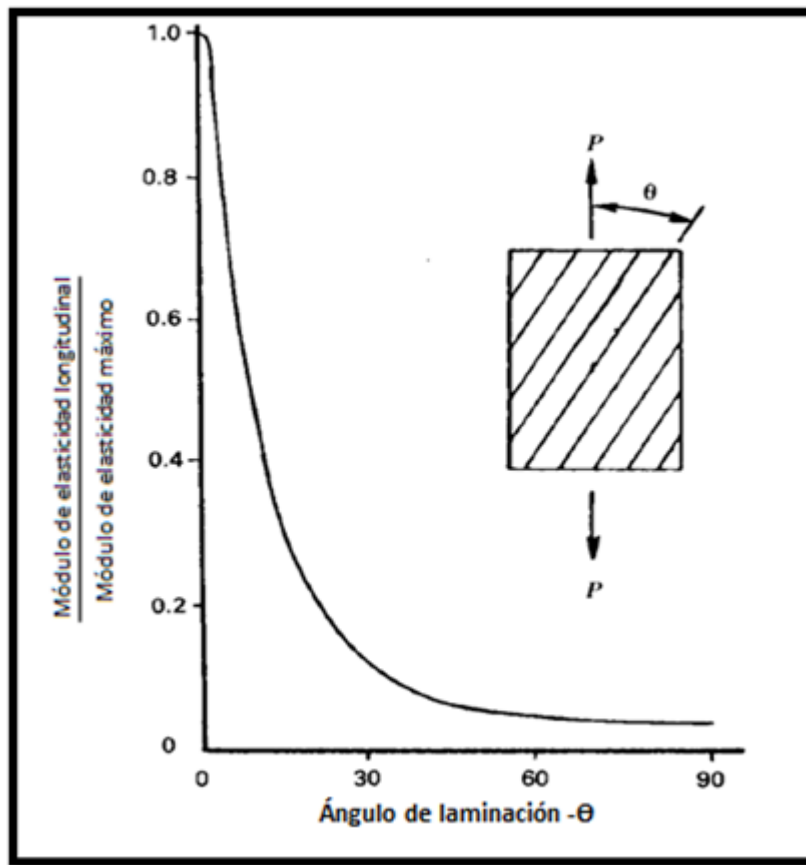


Figura 1. 19.- Relación entre el ángulo de laminación y la reducción en el modulo de elasticidad longitudinal (en dirección de la aplicación de la fuerza)

1.4.2. Tipos de laminados.

Dentro de los laminados podemos distinguir entre 3 tipos de ellos, los unidireccionales, “cross plied” y multidireccionales. Un laminado unidireccional (UDC Unidirectional Fiber Composite) consiste en la alineación del material de refuerzo en una misma dirección lo cual hace que dicho compuesto sea muy resistente a las cargas aplicadas en dicho eje más no en el eje transversal y fuera del plano. Los laminados conocidos como “cross plied” presentan capas de material de refuerzo con direcciones opuestas 90° entre ellas, por lo que posee dos direcciones principales a diferencia de los unidireccionales, esto mejora sus resistencia al corte en el plano, y de igual manera la resistencia la tensión en el eje principal y transversal. Generalmente las fibras utilizadas como material de refuerzo en los diferentes tipos de laminados son fibra de vidrio, fibra de carbono y grafito; las matrices utilizadas son de tipo poliméricas, como lo es la resina de epóxica, algunas resinas con bajo contenido metálico generalmente aleaciones de aluminio [8] (fig. 1.20).

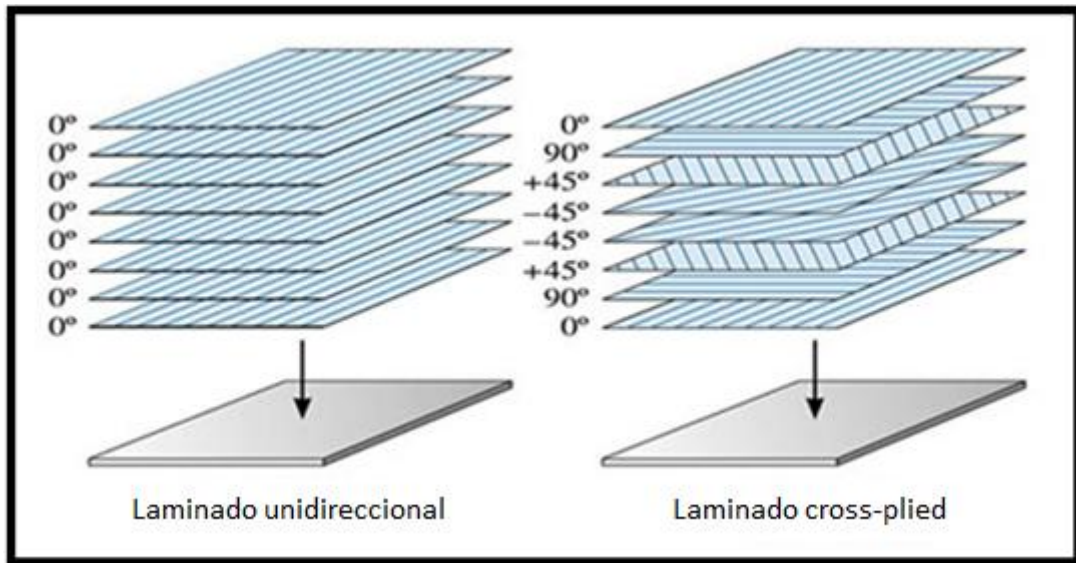


Figura 1. 20.- Nomenclatura de dos tipos muy comunes de laminación en compuestos.

Por otra parte los materiales bidireccionales son aquellos conformados por varias capas de un solo material o distintos materiales (híbrido) las cuales están embebidas en una matriz como lo están los UDC teniendo como particularidad que cada capa del laminado se encuentra en una dirección distinta a las otras [1] (fig. 1.21).

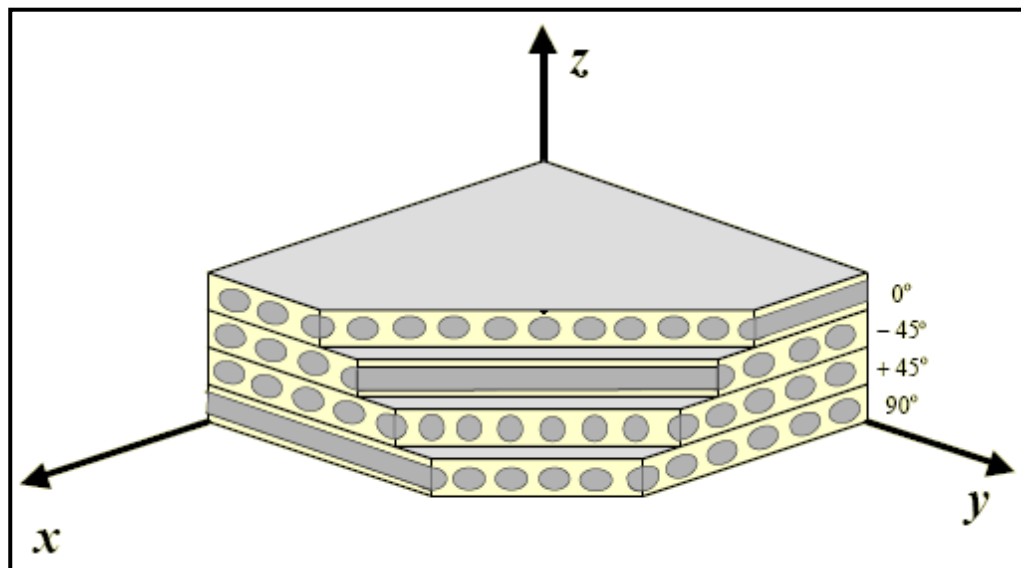


Figura 1. 21.- Sección transversal de un compuesto laminado multidireccional con sus ejes de coordenados principales.

Un factor importante en el análisis de un laminado es el ángulo de laminación el cual se define como un sistema de ejes coordenados XYZ. El ángulo que forma cada forma con el eje X de dicho sistema se le denomina ángulo de laminación, este ángulo puede variar entre -90 y 90 siendo que una lámina orientada a 91 grados es lo mismo que una lámina orientada a -89 grados.

(fig. 1.22).

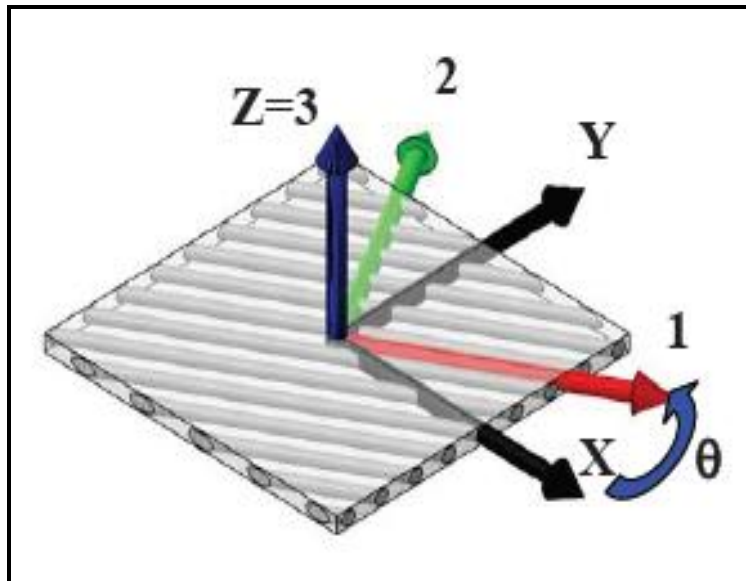


Figura 1. 22.- Ángulo de laminación respecto al eje X en el plano XY.

Conocer la nomenclatura de los laminados es de gran utilidad ya que podemos resumir la notación del laminado debido a que este puede estar compuesto de decenas de láminas y, en una misma pieza puede haber decenas de laminados diferentes por lo que si conocemos la notación que los describe sólo será necesario especificar la secuencia de orientaciones de las capas que lo conforman para especificar el tipo de laminado [3][8].

Ejemplos de nomenclaturas para laminados:

Láminas conjugadas:

$$[0/+45/-45/90]=[0/\pm 45/90]_T$$

Laminados simétricos:

$$[90/0/0/-45/+45]_s = [90/0/0/-45/+45/+45/-45/0/0/90]_T$$

Laminados simétricos impares:

$$[0/+60/-60/\overline{90}]_S = [0/+60/-60/90/-60/+60/0]_T$$

Láminas repetidas consecutivas:

$$[90/0/0/-45/+45]_S = [90/0_2/\pm 45]_S$$

Láminas de diferentes materiales (laminado híbrido):

$$[0^c/90^k/\pm 45^c]_S$$

C=Carbono

K= Kevlar

1.4.3. Propiedades mecánicas de los laminados

Los materiales compuestos presentan ciertas ventajas y desventajas sobre los metales debido a su comportamiento bajo cargas de distintos tipos destacando su resistencia a la tensión en el sentido de las fibras así como resistencia a la fatiga, a continuación se mencionan algunas de sus propiedades, ventajas y desventajas en comparación a las aleaciones de aluminio [2, 3, 4].

- Las propiedades mecánicas no son iguales en todas direcciones.
- Rigidez y resistencia pueden ser adaptadas a la medida de las necesidades del diseñador.
- Baja resistencia del material a esfuerzos fuera del plano.
- Gran resistencia a la fatiga.
- Mayor sensibilidad a efectos ambientales (temperatura y humedad).
- Coeficiente de expansión térmica muy bajo.
- Mayor costo y complejidad en el diseño.
- Degradación de las propiedades mecánicas en temperatura y humedad extrema.
- Absorción de microondas de radar.
- Requiere protección contra rayos uv.
- Corrosión galvánica en contacto con metales.

1.4.4. Aplicaciones de los laminados.

Las aplicaciones de los materiales compuestos son muy variadas, sin embargo los laminados son empleados en el ramo estructural en diferentes áreas como lo es la industria automotriz, aeronáutica, marina y aeroespacial; esto se debe que son muy resistentes a cargas axiales así como resistentes en algunas aplicaciones donde se requiere cierta flexibilidad en las piezas. Dependiendo de la aplicación de los compuestos será su configuración de laminado, es decir, que el simple hecho de modificar el ángulo de laminación, la matriz a emplear y el tipo de material de refuerzo, las propiedades de dicho compuesto serán muy diversas a favor o en contra de nuestros requerimientos por lo cual los hace muy versátiles y la gama de aplicaciones se incrementa. De tal manera, los principales ramos en los cuales se emplean los laminados a base de materiales compuestos son los siguientes.

Sector deportivo:

La introducción de materiales compuestos en el sector deportivo marco el inicio de una generación en la cual los implementos para practicar ciertos deportes presentaron características y propiedades excepcionales como disminución de peso e incremento en la resistencia. Los deportes donde se aprecia con mayor facilidad el uso de los compuestos laminados es en el ciclismo de ruta y de montaña con cuadros más ligeros, hockey, arquería y equipo de protección (fig. 1.23).



Figura 1. 23.- Aplicaciones de los compuestos laminados en el sector deportivo.

Sector automotriz:

La implementación de los compuestos laminados en el sector automotriz es uno de los de mayor ambigüedad siendo desde los años 60's cuando algunas compañías utilizaron compuestos reforzados con fibra de vidrio en vehículos de baja producción. Actualmente el uso de los compuestos laminados en este sector se ha enfocado más a vehículos de alto desempeño y de competencia ya que se reduce el peso de la estructura sin perder resistencia. Algunos de los ejemplos más emblemático de este rubro es la "Formula 1" y los vehículos deportivos de las marcas Ferrari, Lamborghini, Maclaren y Porsche por mencionar algunas (fig. 1.24).



Figura 1. 24.- Aplicaciones de los compuestos laminados en el sector automotriz.

Sector marítimo:

Este es uno de los campos con mayor aplicación de materiales compuestos a distintos niveles, desde lanchas recreativas a base de compuestos de fibras cortas, hasta vehículos de alto desempeño como lanchas de alta velocidad los cuales se fabrican con compuestos laminados y corazones de tipo estructural para incrementar la rigidez de la estructura. De igual manera existe una amplia gama de materiales empleados en dichos vehículos, generalmente encontramos a la fibra de vidrio con resina poliéster en la mayoría de las embarcaciones, pero cuando hablamos de alto rendimiento salen a relucir materiales como fibra de carbono y aramida con resinas epoxicas los cuales aportan resistencia y rigidez a la estructura pudiendo así, obtener embarcaciones más ligeras y rápidas (fig. 1.25).



Figura 1. 25.- Aplicación de los compuestos laminados en el sector marítimo.

Sector aeronáutico:

Uno de los mercados más importantes y proliferantes para la industria de los compuestos es este sector, y es debido a que las ventajas que proporciona la implementación de los compuestos en las aeronaves son de gran relevancia ya que tienen la capacidad de soportar grandes cargas como algunos metales pero con un peso mucho menor. La implementación de compuestos laminados en diferentes partes del avión es muy variada pero por mencionar algunas tenemos los pisos de la cabina, interiores, flaps, partes del empenaje, nariz del avión, refuerzos dentro y fuera de las alas así como cubiertas en la parte inferior de las aeronaves (fig. 1.26).

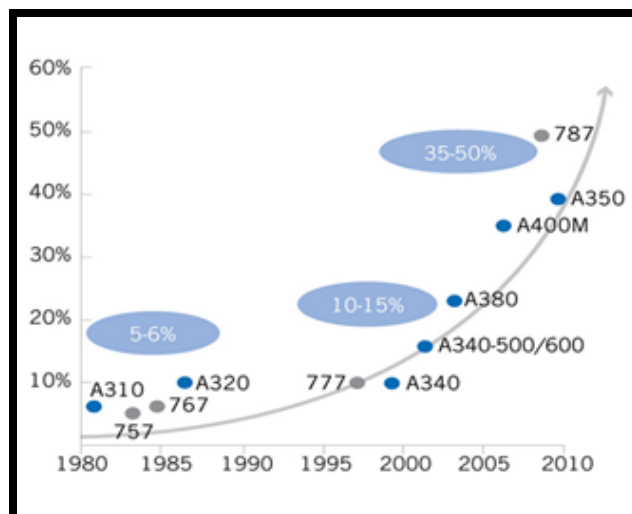


Figura 1. 26.- Participación de los materiales compuestos en la industria aeroespacial desde su primera implementación.
Sector aeroespacial:

Dado a la naturaleza de este mercado, el uso de los compuestos es un tema delicado y que a su vez representa grandes ventajas en su implementación. Esto se debe a que las condiciones de trabajo de las estructuras y componentes aeroespaciales son muy extremas lo que limita de cierta manera el uso de algunos materiales compuestos. Aun así, nuevas investigaciones y desarrollos tecnológicos han propiciado que los compuestos se posicionen más firmemente en dicho mercado y que en un futuro no muy lejano representen un porcentaje de aplicación mayor al que poseen en la actualidad. Algunos de los componentes en los cuales se implementan los compuestos laminados del sector son capsulas de reingreso, tanques de presurización y los más innovador, aeronaves capaces de subir hasta 100km de altura hasta la línea de Karman donde se ha delimitado como la frontera con el espacio exterior (**fig. 1.27**).



Figura 1. 27.- Aplicación de los compuestos laminados en el sector aeroespacial.

Capítulo II.- Marco Teórico

2. Pruebas en compuestos laminados y tipo sándwich

Debido a la naturaleza de los materiales, éstos poseen diversas propiedades químicas, físicas y mecánicas por lo que es necesario implementar una metodología experimental específica para la obtención de dichas propiedades. Es por ello que se han creado normas estandarizadas las cuales nos ayudan a llevar a cabo un proceso de experimentación metodológico por medio del cual se obtiene información acerca de las propiedades específicas de los materiales, abarcando una amplia gama de composiciones de materiales como lo son los metales, no metales, plásticos, materiales compuestos, híbridos, etc. Por lo tanto, para conocer las propiedades de los materiales utilizados en este proyecto, fue necesario recurrir a dichas normas las cuales se explican a continuación [1, 5, 11].

2.1. Normas estándar para pruebas mecánicas

2.1.1. Tensión (ASTM D3039)

Objetivo: Determinar las propiedades a tensión en el plano de materiales compuestos a base de matrices poliméricas y fibras de alto modulo, siendo de tipo laminados, balanceados y simétricos con respecto al eje de aplicación de la fuerza [3, 13, 19] (fig. 2.1).



Figura 2. 1.- Material compuesto sujeto a tensión bajo la norma ASTM D3039.

Descripción: Una delgada barra de material compuesto con sección transversal de tipo rectangular es colocada en la máquina universal para tensión estando fijada en sus extremos por mordazas previamente preparadas. Dicha probeta es tensionada gradualmente hasta que se presenta algún tipo de falla en el material, siendo este monitoreado constantemente para obtener información de su comportamiento bajo el tipo de carga la cual está siendo sometido.

Probeta: En base a las pruebas realizadas anteriormente por investigadores en el tema, se recomienda que de acuerdo a la configuración del material compuesto a probar, se fabriquen las probetas siguiendo las dimensiones que se proponen. Aun así las dimensiones pueden ser modificadas de acuerdo al tipo de material que se está manejando y al comportamiento que presenta durante el experimento, tomando como base que la sección transversal de dicha probeta debe ser de tipo rectangular y su longitud total debe ser igual a la longitud de agarre más dos veces el ancho de la probeta, más la longitud del galga extensiométrica (Tabla 2.1).

Tabla 2. 1.- Dimisiones recomendadas de las probetas para el ensayo de tensión.

Orientación de las fibras	Ancho mm. [in.]	Largo mm. [in]	Espesor mm. [in.]	Longitud de adaptador mm. [in]	Espesor de adaptador mm.[in]	Águlo de adaptador
0° Unidireccional	15 [.5]	250 [10.0]	1.0 [.040]	56 [.25]	1.5 [.062]	7° a 90°
90° Unidireccional	2.5 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [.080]	25 [1.0]	1.5 [.062]	90°
Balanceado y simétrico	2.5 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [.100]	lijas	no aplica	no aplica
Al azar o discontinuo	2.5 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [.100]	lijas	no aplica	no aplica

Equipo: La máquina empleada para el desarrollo de la prueba de tensión fue una prensa universal marca Tinus Olsen modelo H25KT con una celda piezoeléctrica para la medición de la carga con capacidad de 25 KN, a la cual se le implementaron diversos aditamentos para las diferentes pruebas a realizar (fig2.2).



Figura 2. 2.- Equipo empleado para pruebas de tensión y flexión utilizando diversos aditamentos.

2.1.2. Flexión en tres puntos (ASTM D790)

Objetivo: Determinar las propiedades mecánicas a flexión en plásticos reforzados y no reforzados incluyendo materiales compuestos de alto modulo y materiales de aislamiento eléctrico, todos ellos en forma de barras rectangulares moldeadas u obtenidas de una lámina [9, 20, 21].

Descripción: Una barra de sección transversal rectangular apoyada en sus extremos es sometida a una carga por el centro existiendo una distancia idéntica entre el punto de aplicación de la carga y los apoyos, dicha distancia debe ser 16 veces más grande que el espesor de la probeta.

El espécimen será sometido a la carga y por consecuencia será flexionado hasta que se presente algún tipo de falla en la probeta o hasta que se alcance un máximo de 5% de su deformación máxima (fig. 2.3).



Figura 2. 3.- Equipo empleado en la norma ASTM D790 para flexión en tres puntos.

Probeta: Los especímenes deben de ser cortados a partir de hojas o láminas del material, así como también pueden ser moldeados con las dimensiones requeridas para la prueba.

Materiales con espesor $t \geq 1.6\text{ mm}$ [0.0625 in]

$t \geq 3.2\text{ mm}$. [0.125 in.]: El espécimen no deberá exceder un ancho equivalente a una cuarta parte de la longitud total entre los apoyos de la probeta.

$t < 3.2\text{ mm}$. [0.125 in.]: El espécimen deberá tener un ancho “w” 12.7mm. [.5 in]

Materiales con espesor $t < 1.6\text{ mm}$. [.0625 in]

El espécimen deberá estar dimensionado de la siguiente manera:

$L = 58.28\text{ mm}$. [2 in.]

$w = 12.7\text{ mm}$. [0.5 in.]

$t < 0.0625\text{ in}$

Equipo: Para el desarrollo de la pruebas de flexión, se empleó la misma prensa universal utilizada para los ensayos de tensión, implementando ciertos aditamentos necesarios para las pruebas los cuales se explicarán posteriormente.

2.1.3. Impacto (CHARPY)

Objetivo: Determinar la resistencia al impacto de diversos materiales como pueden ser plásticos, metales y compuestos por medio de un péndulo impactor y uno receptor, donde se observa y compara la cantidad de energía absorbida por la probeta y de igual manera se aprecia de manera visual el daño generado en la misma.

Descripción: Un espécimen de sección transversal rectangular es impactado por un péndulo el cual genera un evento de flexión en tres puntos a alta velocidad. Esto se logra debido a que la probeta es colocada en posición longitudinal en unos de los péndulos apoyándose el centro de la probeta siendo que el péndulo opuesto golpea el espécimen en ambos extremos generando así una flexión de tres puntos sobre la probeta [22-24](fig. 2.4).



Figura 2. 4.- Equipo de prueba para ensayos de impacto tipo charpy.

Probeta: Los especímenes son de sección transversal rectangular donde la cara a impactar debe de tener 0.25 pulgadas de ancho por dos pulgadas de largo. Generalmente las probetas cuentan con una muesca en la parte opuesta a donde se impactara, lo cual sirve para canalizar la zona de ruptura, dicha muesca es dimensionada de acuerdo al tipo de material a probar.

En el caso particular de este experimento, a las probetas no se les genero ninguna muesca con la finalidad de observar el comportamiento del material con su geometría real, además que dicha muesca debilitaría el material ya que al estar compuesto de fibras presenta cierta anisotropía en el plano de aplicación de la carga.

Equipo: Las pruebas de impacto se realizaron utilizando un péndulo balanceado marca Hounsfield con tensiómetro Monzanto y capacidad de impacto de 48ft*lb a una velocidad relativa de 22.7ft/s **fig. 2.4).**

2.1.4. Flexión para compuesto tipo sándwich (ASTM-C393)

Objetivo: Determinar las propiedades a corte del corazón de un material compuesto tipo sándwich sometido a flexión, de tal manera, que los momentos aplicados produzcan curvaturas en las caras del mismo. Los resultados de la prueba contribuyen al cálculo de la rigidez del compuesto tipo sándwich [25].

Descripción: Un espécimen de tipo sándwich es sujeto a un estado de carga de flexión debido a un momento flexionante normal al plano de la probeta, durante el procedimiento se debe tomar lectura de la fuerza aplicada y de la deflexión generada por la misma. Los únicos modos de falla aceptables son por efecto del cortante en el corazón o desprendimiento del corazón y las caras de la probeta **(fig. 2.5).**



Figura 2. 5.- Probeta de compuesto tipo sándwich sometida a flexión bajo la norma estandarizada (ASTM C-393).

Probeta: Consiste en un elemento de sección transversal rectangular el cual posee 3 pulgadas de ancho por 8 de largo y la deflexión de ensaye deberá ser igual al espesor de la probeta.

Equipo: Se empleó el mismo equipo utilizado para los ensayos de flexión de los compuestos laminados con los mismos aditamentos

2.2. Métodos de fabricación para compuestos laminados y tipo sándwich

Existen diferentes métodos para la fabricación de materiales compuestos que van desde un nivel artesanal hasta sistemas computarizados, donde el material es fabricado por una máquina. Muchos factores influyen en la elección del proceso de fabricación como lo son [5,9,10].

- Aplicación
- Dimensiones
- Forma
- Materiales
- Resistencia requerida
- Calidad

Sin embargo el factor dominante es el de aplicación, ya que si esta será en un componente estructural, el proceso a utilizar sería el más sofisticado o en el que el control de calidad fuese muy estricto ya que hay componentes en los cuales una de sus fases de fabricación es totalmente a mano como lo son los monocascos de los autos de competencia formula 1, donde las fibras se colocan de manera manual en el molde ya que la forma es muy compleja, y posteriormente se somete a un proceso de curado rigurosamente regulado que concluye en un elemento de alto desempeño hecho a mano.

Como el ejemplo mencionado existe una gran variedad por lo que solo se mencionaran algunos de los procesos más utilizados en la industria.

- Impregnación manual a molde abierto con vacío
- Moldeado por transferencia de resina asistida por vacío (VARTM)
- Impregnación manual a molde abierto
- Materiales pre impregnados curados con vacío

- Moldeado por transferencia de resina (RTM)
- Moldeado por transferencia de resina asistida por vacío (VARTM)
- Autoclave

En este trabajo de investigación se utilizó el método de síntesis VARTM, el cual se describe detalladamente a continuación

El método VARTM es un sistema utilizado en la fabricación de materiales compuestos, haciendo uso de vacío, que por sus siglas en inglés significa “Moldeado por Transferencia de Resina Asistida por Vacío” y su implementación se debe a la relativa facilidad de aplicación, tiempos cortos de preparación y fabricación, así como gran uniformidad y consolidación de las piezas fabricadas con parámetros de calidad elevados en comparación con otros procedimientos de fabricación. Este método consiste en la inyección de resina a un molde previamente preparado con el material de refuerzo y otros elementos los cuales permiten el flujo de la resina, dicho flujo se lleva a cabo por diferencia de presión ya que el molde se encuentra al vacío (presión negativa) lo cual se logra sellándolo con un material a base de nylon que forma una bolsa sellada, la diferencia de presión existente en el interior del molde y el exterior provoca el flujo de la resina, esta se encuentra contenida en un recipiente externo fluyendo del exterior hacia el interior del molde rellenando todos los espacios entre las fibras hasta saturar el sistema, lo que propicia uniformidad en la distribución de la resina y propiedades. Una vez que el sistema está saturado, el exceso de resina y el aire retenido salen por un conducto al final de la trayectoria del flujo de resina ayudando así a que el sistema sea uniforme y libre de imperfecciones [1, 21,10].

Los materiales comúnmente utilizados en el proceso no son reusables debido a que el curado del compuesto modifica la estructura física de dichos materiales. A continuación se describen los materiales utilizados así como el proceso de fabricación (fig. 2.6).

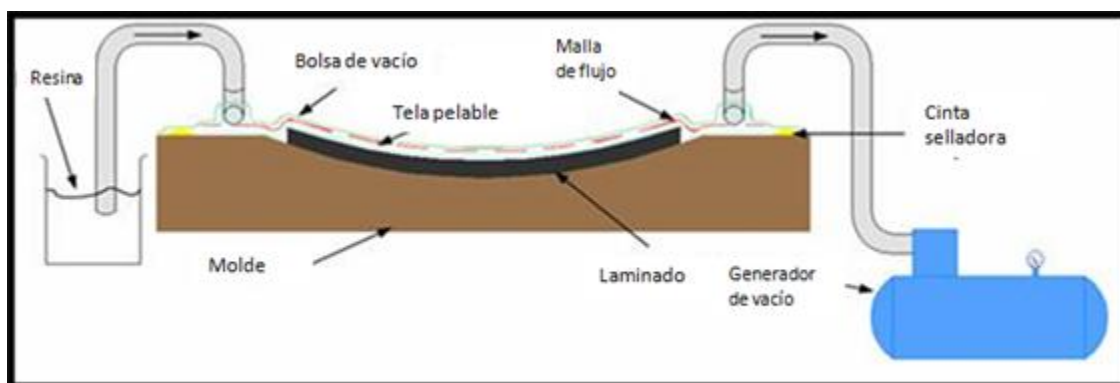


Figura 2. 6.- Proceso VARTM empleado en al fabricación de compuestos laminados.

2.2.1.1. Materiales utilizados en el método VARTM :

Generador de vacío: Herramienta utilizada para crear vacío en sistemas sellados como tanques y sistemas de refrigeración. El tipo de generador de vacío comúnmente utilizado en el método VARTM, es de tipo eléctrico muy semejante a un compresor de aire con la diferencia de que en lugar de generar presión, este genera vacío en el sistema. Dentro de este tipo de generadores de vacío existen diferentes tipos como los son los de pistón, diafragma y turbina por mencionar algunos.

Bolsa de vacío : Es una film de uretano de 0.001 in. la cual cubre todo el molde y es la barrera que contiene al material de refuerzo y a la resina con la, cual por medio de vacío, esta genera presión uniforme sobre el compuesto lo que propicia una distribución equitativa de resina dentro del molde.

Malla de flujo: Material a base de nylon con una configuración de tipo malla, tiene como función crear un medio por el cual la resina inyectada al molde pueda fluir a través de todo el sistema y así el material de refuerzo quede saturado de resina.

Tela pelable: Dicha tela es de nylon semipermeable y está tratada con agentes desmoldantes lo que impide que se adhiera al compuesto, su función es separar el compuesto de la malla de flujo ya que al finalizar el curado del compuesto esta tela debe ser removida dejando una superficie rugosa propicia para posteriores adhesiones.

Cinta selladora : Material de uretano de alta adherencia el cual se utiliza para sellar la bolsa de vacío con el molde y así evitar fugas en el sistema, es resistente a altas temperaturas (400 °C) para aplicaciones en hornos de curado lo que lo hace un sellador muy versátil.

Vacuómetro: Instrumento de medición para presiones negativas, es decir, mide presiones por debajo de la presión atmosférica, es utilizado en el método VARTM para monitorear el vacío existente en el sistema de infusión el cual nos ayuda a detectar fugas de vacío o simplemente conocer la presión a la cual está trabajando el sistema de infusión. Las unidades manejadas en este tipo de herramientas son mmHg, Bars y inHg.

Manguera de vacío: Como su nombre lo indica, es el medio por el cual se da el flujo de aire para el vacío así como también de la resina, usualmente es de pvc de tipo “tubing”, dependiendo de la cantidad de resina a inyectar y el volumen de aire a extraer, será su diámetro.

Conectores: Son pequeños artefactos neumáticos los cuales sirven para acoplar las mangueras de vacío e inyección a la bolsa de vacío. Pueden ser de plástico o metal y simplemente se acoplan a la bolsa haciendo en esta una pequeña perforación por donde saldrá el conector y se enrosca una tuerca selladora la cual impedirá alguna fuga entre el conector y la bolsa.

La configuración del material compuesto que usualmente se fabrica con este método es el de tipo laminado multidireccional. Cada laminado a fabricarse puede tener diferentes configuraciones con variantes como:

- Tipos de materiales de refuerzos
- Orientación del material de refuerzo
- Matrices epóxicas y de vinilos.
- Posicionamiento de los materiales de refuerzo en el laminado.

Las variantes anteriormente mencionadas influirán directamente en el comportamiento de material compuesto terminado, por lo que es muy importante tomarlas en cuenta y respetar los resultados obtenidos del análisis matemático al momento de fabricar el laminado.

La síntesis del método VARTM se lleva a cabo de la siguiente manera:

1.-Preparación del molde: Un molde para fabricar materiales compuestos de ser minuciosamente preparado, para reducir al máximo las imperfecciones en la pieza a fabricar. Como primer paso se debe pulir el molde hasta obtener un acabado fino tipo espejo lo que reduce el tamaño del poro de la superficie, una vez pulido debe ser encerado con cera desmoldante aplicando como mínimo 4 capas de cera con un tiempo de espera de 15 minutos entre capa y capa. Cada vez que se vaya a aplicar una capa de cera desmoldante esta debe ser removida con un trapo seco y limpio para la nueva aplicación.

Ya encerado el molde es recomendable utilizar una película separadora la cual es a base de alcohol polivinilico aplicándose una capa delgada sobre toda la superficie del molde y dejarla secar, una vez realizado el procedimiento anterior, el molde está listo para la aplicación de la matriz y el material de refuerzo.

2.- Laminación: Para la aplicación del laminado se debe colocar primeramente la tela pelable la cual nos permitirá separar la pieza del molde y a obtener un acabado especial. Una vez puesta la tela se comienza poner las capas de material de refuerzo en las direcciones determinadas tratando de no dejar arrugas entre capa y capa.

3.- Instalación del sistema de flujo: Una vez terminado el paso anterior, se procede a colocar la tela pelable en la parte superior del laminado para posteriormente fijar la malla de flujo, esto es para que la resina fluya por la maya y se filtre por la tela pelable hacia el laminado saturándolo, que al momento de haber curado el laminado se podrá desprender de la pieza con facilidad la maya de flujo y la tela pelable.

4.- Sellado: Cuando el sistema está completo (tela pelable, laminado, tela pelable, malla de flujo) se sella el molde colocando la cinta selladora por todo el contorno del molde, hasta tener un perímetro completamente cerrado y se coloca la bolsa haciendo presión para que el sello entre el molde y la bolsa sea efectivo. Antes de sellar por completo el molde se deben colocar los acopladores por donde se hará el vacío y por donde se inyectara la resina teniendo como recomendación que dichos puertos estén en los extremos del laminado pero por encima, de lo contrario no se obtendrá una saturación efectiva.

5.- Verificación: Con el molde completamente sellado y los acoplamientos colocados, es momento de aplicar vacío al molde, obstruyendo el acopamiento de inyección pues de no hacerlo nunca podremos generar vacío en el molde. Se debe monitorear el manómetro ya que en él se podrá observar la presión negativa a la cual está sometido el laminado así como también se podrán detectar posibles fugas, esto se hace cerrando la línea de vacío y observando en el manómetro si hay caída de vacío, de ser así, existe una fuga en el sistema por lo que hay que cerciorarse de que este bien sellado.

6.- Saturación: Una vez que el sistema está libre de fugas se debe preparar la mezcla de resina y catalizador en porciones pequeñas para evitar que cure prematuramente. El recipiente de resina

se pondrá encima del laminado y se le colocara la línea cerrada de inyección de resina, se permitirá el flujo de resina y podrá observar como la resina es succionada por el sistema teniendo cuidado de que el recipiente no quede vacío para que el sistema no succione aire.

7.- Curado: Conforme el tiempo transcurre la resina ira fluyendo por todo el sistema por lo que la bomba de vacío no se apagara hasta que el sistema se sature. Se debe observar constantemente el manómetro así como inspeccionar el sistema podrá detectar posibles fallas o fugas.

8.- Desmoldado: Ya saturado el sistema se debe esperar a que cure la resina para posteriormente retirar el laminado del molde y desprender la tela pelable de ambas caras del laminado para obteniendo así un laminado uniforme.

2.2.2. Síntesis de fabricación de compuesto tipo sándwich

Los compuestos llamados sándwich poseen una configuración de tipo heterogéneo ya que se conforman de distintos materiales, y estos nunca se mezclan, solo se encuentran adheridos entre sí, y si se observa la sección transversal de dichos materiales se podrán distinguir plenamente sus constituyentes. Como ya se sabe, un material de este tipo se compone de 3 elementos fundamentales, dichos elementos son acoplados entre sí por medio de un adhesivo el cual puede variar de acuerdo a la aplicación del material, siendo que la síntesis para fabricar un panel de material compuesto tipo sándwich se desarrolla a continuación [11] (fig. 2.7).

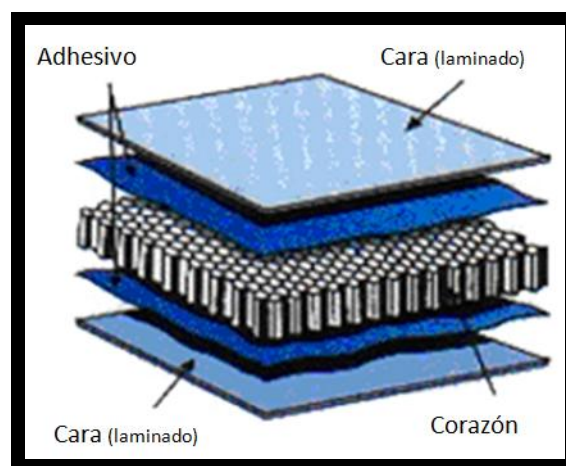


Figura 2. 7.- Morfología de los componentes de un compuesto tipo sándwich en el proceso de fabricación

1.-Preparación de los materiales: Como primer paso debemos de preparar los materiales con los cuales se conformará el panel, es decir las dos caras y el corazón. Iniciando con las tapas del panel donde las áreas de contacto deben estar limpias libres de polvo, grasa o cualquier cuerpo

extraño que pudiese intervenir el proceso de adhesión, generalmente se limpian frotando una franela impregnada de solvente o acetona lo que remueve de la pieza la grasa depositada por el contacto con las manos y a su vez promueve una mejor adherencia.

Para el material que funcionara como corazón su preparación es muy sencilla simplemente se debe de limpiar con una franela para retirar el polvo u otro cuerpo extraño, no se limpian con solventes debido a que pueden reaccionar con el material y degradarlo por lo que simplemente se limpian.

2.- Adhesión: Existen diferentes adhesivos para llevar a cabo esta tarea, generalmente se utiliza un pegamento en forma de lámina para tener un control en la uniformidad de la adhesión y reducir al máximo las variaciones de material, en otros casos se utiliza pegamento líquido que de igual manera adherirá las caras del material pero la uniformidad se verá afectada ya que es muy difícil controlar la cantidad de pegamento a utilizar. El proceso de adherencia se realiza haciendo presión entre sus caras y el corazón lo que mejora el pegado entre los elementos, dicha presión se logra por medio de vacío, es decir, se colocan los componentes en el orden adecuado sobre una superficie plana y en la superficie se le coloca otra superficie plana simulando un prensado, solo que en este caso la fuerza que lo generara se obtendrá por vacío ya que la configuración mencionada se introduce en una bolsa de vacío la cual al haber extraído el aire contenido en la bolsa obligará a las superficies planas a presionar el panel, teniendo cuidado de que dicha presión no sea excesiva ya que podría ocasionar el aplastamiento del corazón y por lo tanto un material inservible.

3.- Curado: Dependiendo del tipo de adhesivo utilizado será su tiempo de curado así como su temperatura a utilizar. Es por ello que se debe elegir un adhesivo el cual pueda curar en condiciones ambientales normales o en aquellas condiciones que puedan ser recreadas en el laboratorio para obtener una máxima adherencia del material. Es importante mencionar que durante el proceso de curado la presión en el material debe de ser constante ya que de lo contrario se pueden presentar fallas en la adherencia y consecuente mente en las propiedades del material.

Capítulo III .- Experimentación

3. Fabricación de moldes, equipo de prueba y extracción de probetas

La determinación de las propiedades mecánicas de un material compuesto es una tarea complicada ya que para conocerlas es necesario someter el material a diferentes tipos de pruebas específicas para cada propiedad que se desea obtener por lo que de igual forma se requiere una probeta especial de acuerdo al experimento a realizar ya que se debe cumplir los lineamientos establecidos en las normas de estándares que rigen cada prueba. Es por ello que la configuración de la probeta es de vital importancia ya que de ello dependerá, en gran parte, la veracidad de los resultados obtenidos en cada prueba. Debido a la naturaleza de esta investigación se encontraron carencias en cuanto a equipo de prueba y fabricación por lo que fue necesario diseñar y construir ciertos mecanismos de prueba así como moldes para vaciado de resinas, los cuales en su conjunto permitieron llevar a cabo un proceso de experimentación con mayor precisión y repetibilidad.

El proceso de manufactura empleado para la obtención de cada probeta según la prueba a realizar es de vital importancia, debido a que puede modificar las propiedades del material lo que tendrá como consecuencia resultados erróneos durante las pruebas. De igual manera el equipo de prueba representa un punto importante en dicho proceso ya que por medio de este, las pruebas son realizadas y dependiendo de la calidad del mismo será la calidad de nuestras lecturas y resultados, es por ello que a continuación se describen de manera general los procesos de manufactura de los equipos de prueba, compuestos laminados, extracción y dimensionamiento de probetas [24].

3.1. Molde para probetas de resina polimérica para ensayo de tensión

La norma para ensayos de tensión en plásticos establece que la probeta debe poseer un entallamiento al centro de la misma el cual propicie una concentración de esfuerzos en dicha zona, presentándose la falla en la región central de la probeta. Debido a este lineamiento y por cuestiones de presupuesto, se maquinó en una fresadora CNC un molde positivo de nylon con las dimensiones que establece la norma, para poder obtener del mismo molde negativo mediante el vaciado de silicón en la cavidad maquinada. Esto con la finalidad de tener uniformidad en las dimensiones de cada molde y poder así fabricar más probetas de un mismo lote (**fig. 3.1**).

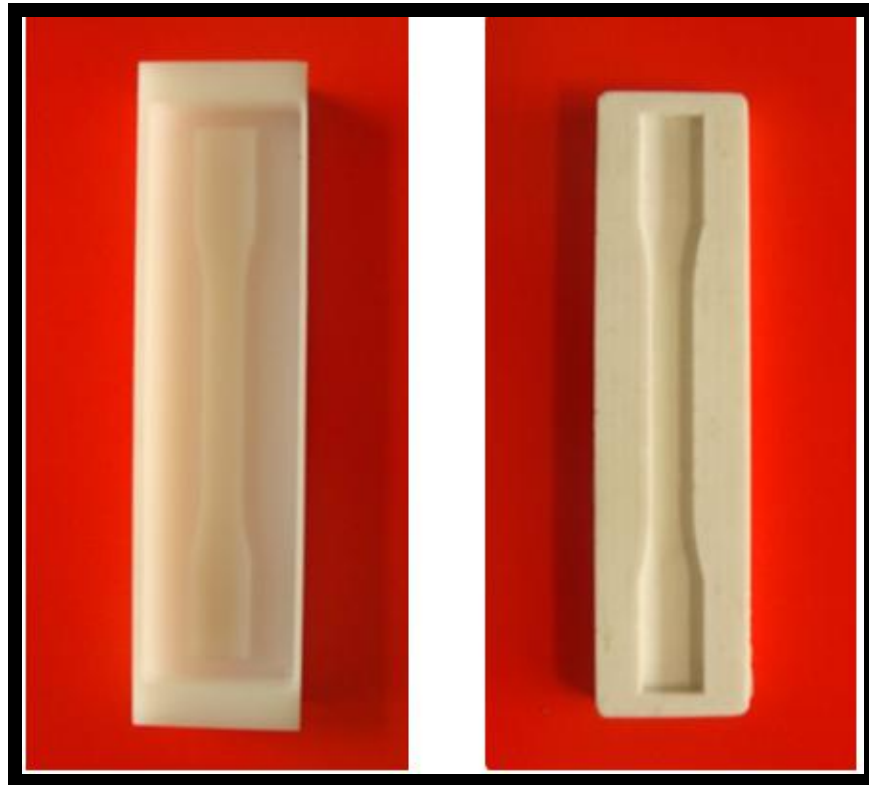


Figura 3. 1.- (izq.) Molde positivo de teflón utilizado para la fabricación de un molde negativo de caucho.

3.2. Aditamento para flexión en tres y cuatro puntos

Debido a la naturaleza de este tipo de pruebas se fabricó un aditamento para poder realizarla de manera adecuada con la capacidad de flexionar probetas en tres y cuatro puntos. Dicho aditamento consta de dos partes, la primera es una base que se monta sobre el cabezal inferior de la máquina de tensión la cual tiene como función dar soporte a la probeta mediante dos apoyos deslizables en dirección longitudinal, con el fin de que se pueda adaptar a las dimensiones de las probetas así como también a los lineamientos de las normas estandarizadas. La segunda parte es el apoyo superior el cual tiene como función ejercer la fuerza perpendicular a la probeta ya sea en un punto o en dos al mismo tiempo dependiendo el tipo de prueba, al igual que el apoyo inferior, este cuenta con soportes deslizables para el correcto punto de aplicación de la fuerza según la probeta o la norma estandarizada lo requieran. Ambas partes se maquinaron de placas de aluminio tomando en cuenta el tipo de cargas, áreas y puntos de aplicación de las mismas para que las deformaciones en los aditamentos fuera menor al 1% como lo establece la norma ASTM D-790 (fig. 3.2).

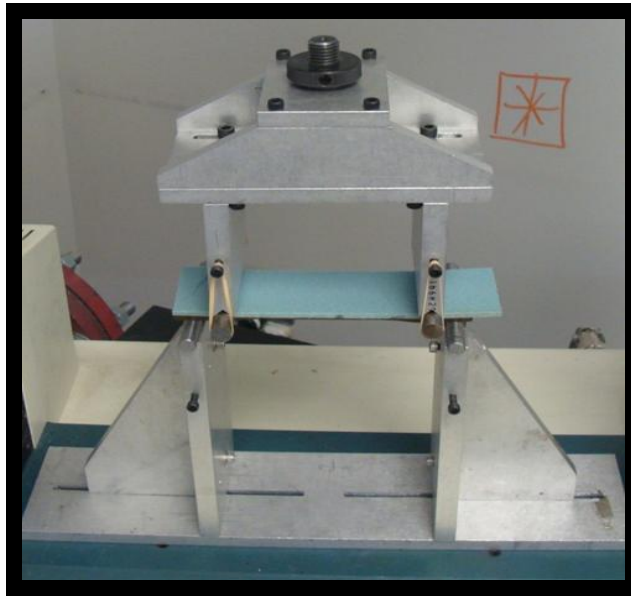


Figura 3. 2.- Aditamento diseñado y fabricado para el ensayo de flexión en cuatro puntos

3.3. Mordazas para ensayo de tensión

Una de las pruebas más importantes de este proyecto es la de tensión ya que de la misma se obtienen propiedades mecánicas de gran importancia para cálculos y estudios posteriores, de tal manera que fue necesario fabricar dos pares de mordazas especiales para compuestos ya que las existentes carecían de agarre sobre las probetas. Estas mordazas constaron de un dentado a 45° uniforme sobre la superficie para propiciar un buen agarre sobre la probeta pero tomando en cuenta que no la fuese a cizallar por lo cual el espaciado entre dientes fue el mínimo necesario. Una vez maquinadas se sometieron a un proceso de cementación para incrementar la dureza y así reducir el desgaste de la misma bajo condiciones de trabajo de alta exigencia (fig. 3.3).

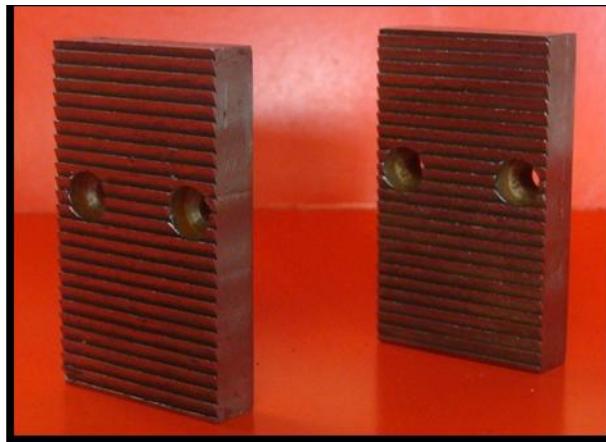


Figura 3. 3.- Mordazas diseñadas y fabricadas para sujetar las probetas de material compuesto durante el ensayo de tensión.

3.4. Caracterización de las matrices

Cada uno de los materiales que forman un compuesto poseen una función específica por lo que es imperativo conocer su comportamiento ante distintos escenarios ya sea durante la fabricación del compuesto o posterior a esta, por lo que en primera instancia se deben caracterizar dichos materiales basándose en las especificaciones de manejo del proveedor y haciendo variaciones a las mismas ya que en ocasiones la información provista por el fabricante del material es errónea o no está comprobada. Es por ello que utilizando una metodología de experimentación fundamentada en normas estandarizadas se pueden obtener las propiedades reales de cada uno de los materiales que conformarán el compuesto.

La función de la matriz en un compuesto es transmitir las cargas al material de refuerzo por lo que es necesario caracterizarla y así, identificar patrones de comportamiento durante el curado y posterior a éste. Existen dos etapas en este proceso, la caracterización en el proceso de curado y después del mismo, esto es con la finalidad de identificar aquellas variables que durante el proceso de curado pudieran modificar las propiedades mecánicas del material una vez curado. Tomando en cuenta lo anterior, el proceso de caracterización se aplicó a las dos matrices a implementar en los compuestos siendo estas de tipo poliméricas una poliéster y otra epóxica (Fig. 3.4).



Figura 3. 4 Geometría de las probetas de resina epóxica y poliéster para ensayo de tensión.

3.4.1. Procedimiento de caracterización para la matriz epóxica y poliéster

Objetivo: Determinar el comportamiento mecánico de la matriz teniendo como indicadores la resistencia a la tensión, micro dureza y resistencia a la flexión. A a su vez se manejaran diferentes rangos tanto en la proporción de las mezclas como el tiempo de curado dependiendo de cada matriz. Esto nos permitirá obtener una curva de comportamiento basada en las variables mencionadas y consecuentemente parámetros para elegir la proporción, temperatura y tiempo adecuados para la fabricación del material compuesto.

Parámetros para experimentación en resina epóxica

Proporción de la mezcla: 2:1

Temperatura de curado: 21 °C, 38°C, 60°C

Monitoreo de tiempos de curado en horas: 1- 24 hrs.

Parámetros para experimentación en resina poliéster

Porcentaje de catalizador: .5% ,1.5%, 3%.

Temperatura de curado: 21 °C (ambiente controlado)

Tiempos de monitoreo de curado: 15,10.....240 min.

Ensayos para experimentación en resina epóxica y poliéster

3 x Dureza Shore A₂

3x Prueba de tensión (ASTMD 638)

3 x Prueba de flexión (ASTMD 790)

Comportamiento de la resina epoxica:

Debido al funcionamiento del proceso de curado de la resina epóxica , este presenta una reacción exotérmica lo cual la hace dependiente de la temperatura a la cual está siendo curada ya que puede ganar energía y consecuentemente esto se verá reflejado en el tiempo de curado así como en propiedades mecánicas. Se espera que conforme transcurra el tiempo se incremente la dureza en la matriz y la flexibilidad disminuya. Durante las primeras 24 horas presentará grandes diferencias entre los valores obtenidos en las pruebas mecánicas que posteriormente dichas diferencias se irán reduciendo hasta obtener menor significancia (**fig. 3.5**).

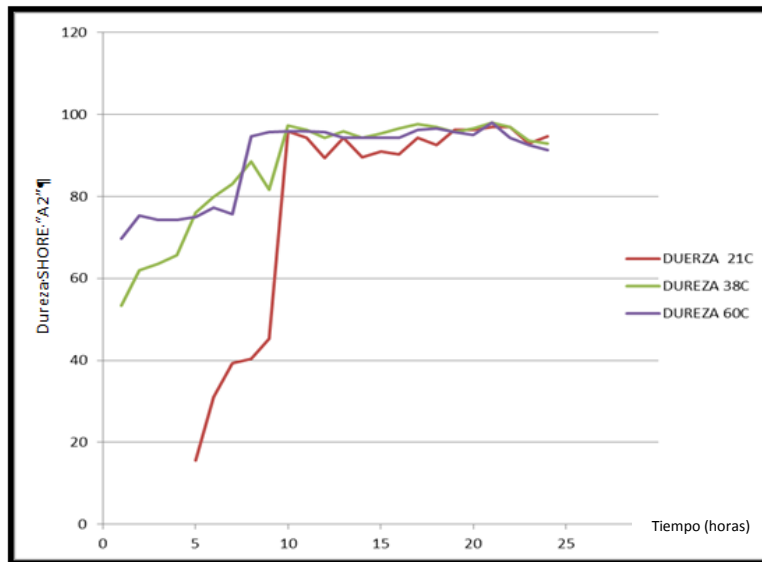


Figura 3. 5.- Diagrama de dureza vs tiempo a diferentes temperaturas de curado.

Una vez concluido el análisis de curado, se fabricaron las probetas y se sometieron a un ensayo de tensión bajo la norma ASTM D-638, con la intención de conocer su comportamiento bajo dicho estado de carga. Los especímenes ensayados a tensión fueron curados bajo los mismos parámetros citados anteriormente (fig. 3.6).

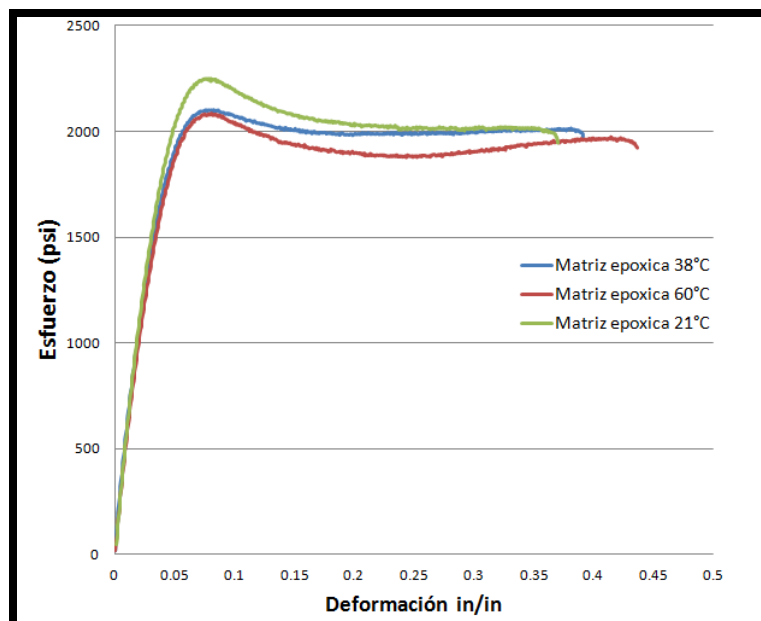


Figura 3. 6.- Diagrama esfuerzo vs deformación de matrices epóxicas curadas a distintas temperaturas.

En la figura 3.6 se observa el comportamiento de la resina epoxica curada a diferentes temperaturas, donde se muestra que la resistencia se ve afectada por la temperatura de curado ya que la resina curada a menor temperatura (línea verde) obtuvo valores más altos en resistencia pero menores en deformación, que de manera contraria, la resina curada a mayor temperatura (línea roja) arrojo valores menores en resistencia pero mayores en deformación.

Comportamiento de la resina poliéster:

Debido al funcionamiento del proceso de curado de la resina poliéster, este presenta una reacción exotérmica similar a la de la resina epoxica, solo que con un tiempo de reacción acelerado. La cantidad de catalizador y la temperatura de curado harán que el tiempo de endurecimiento varíe y posiblemente sus propiedades mecánicas (fig. 3.7).

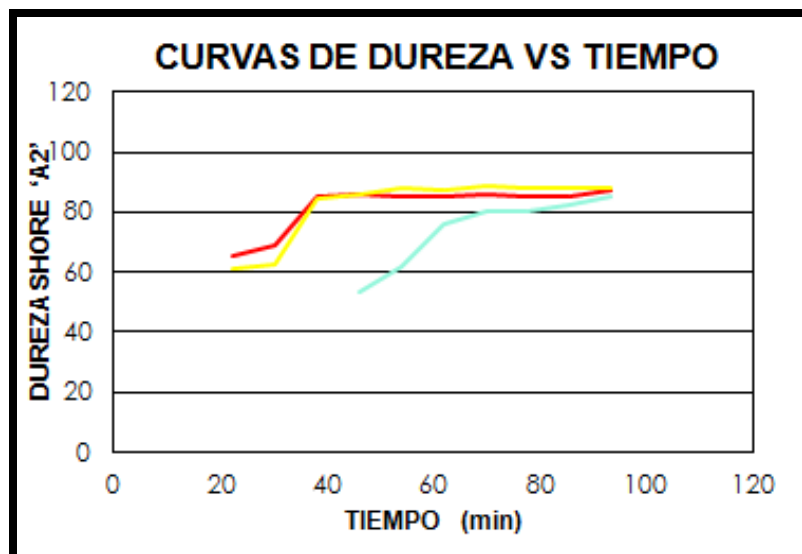


Figura 3. 7.- Curva de curado de resina polyester en base a la cantidad de catalizador empleado.

Una vez concluido el análisis de curado se procedió a fabricar las probetas y ensayarlas de la misma manera en la que se realizó para la resina epoxica..

En la figura 3.8 se observa el comportamiento de la resina poliéster bajo esfuerzo de tensión mostrando mayor rigidez que el de la epoxica ya que sus deformaciones fueron menores y la carga soportada mayor (fig. 3.8).

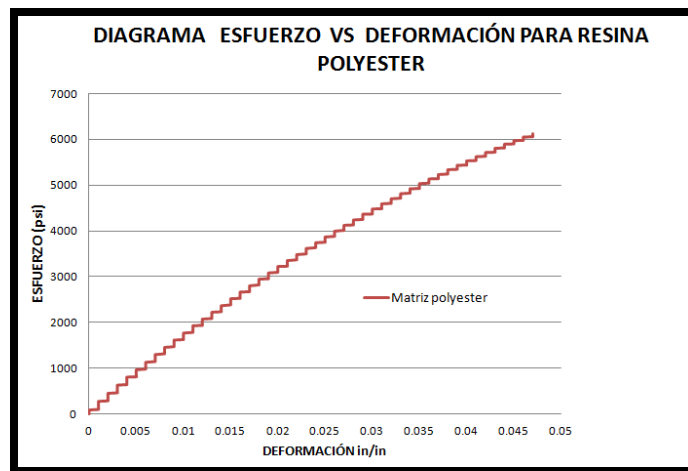


Figura 3. 8.- Diagrama representativo de esfuerzo vs deformación de las resinas polyester.

3.5. Probetas para ensayo de tensión y flexión de compuestos laminados

Cada uno de los compuestos laminados se sometió a las normas estandarizadas mencionadas en el capítulo II, las cuales, indican un dimensionamiento específico para las probetas así como un número mínimo de ensayos por prueba. Es por ello que la obtención de las probetas de los compuestos laminados se llevó a cabo utilizando herramientas giratorias de corte de alta velocidad y cortadores especiales siendo estos un moto-tool de 35000 rpm con disco de diamante para poder ejecutar cortes precisos, sin estallamiento ni delaminaciones en el compuesto. Se obtuvieron cinco especímenes de cada compuesto laminado para cada tipo de prueba, tomando como base los lineamientos de dimensión así como también los parámetros de prueba establecidos por cada una de las normas estandarizadas a implementar (fig. 3.9).



Figura 3. 9 .- Probetas de compuesto laminado para ensayo de tensión,(a) F. carbono, (b) F.aramida, (c) F. vidrio.

3.6. Probetas para ensayo de flexión en el compuesto tipo sándwich

La fabricación de compuesto de tipo sándwich se llevó a cabo utilizando los laminados anteriormente probados. El procedimiento consistió en tomar dos laminados de un mismo material y pegarlos con resina epoxica sobre el corazón de espuma de poliuretano procurando que la alineación de las fibras de la cara superior fuera igual a la de la inferior. Una vez alineados se les aplicó vacío con un valor de 28 inHg ya que esta presión uniforme sobre el sándwich propicia una adhesión más efectiva. De esta manera se fabricaron los cuatro tipos de sándwich siendo estos con caras de fibra de carbono, vidrio, aramida e híbrido carbón aramida (fig. 3.10).

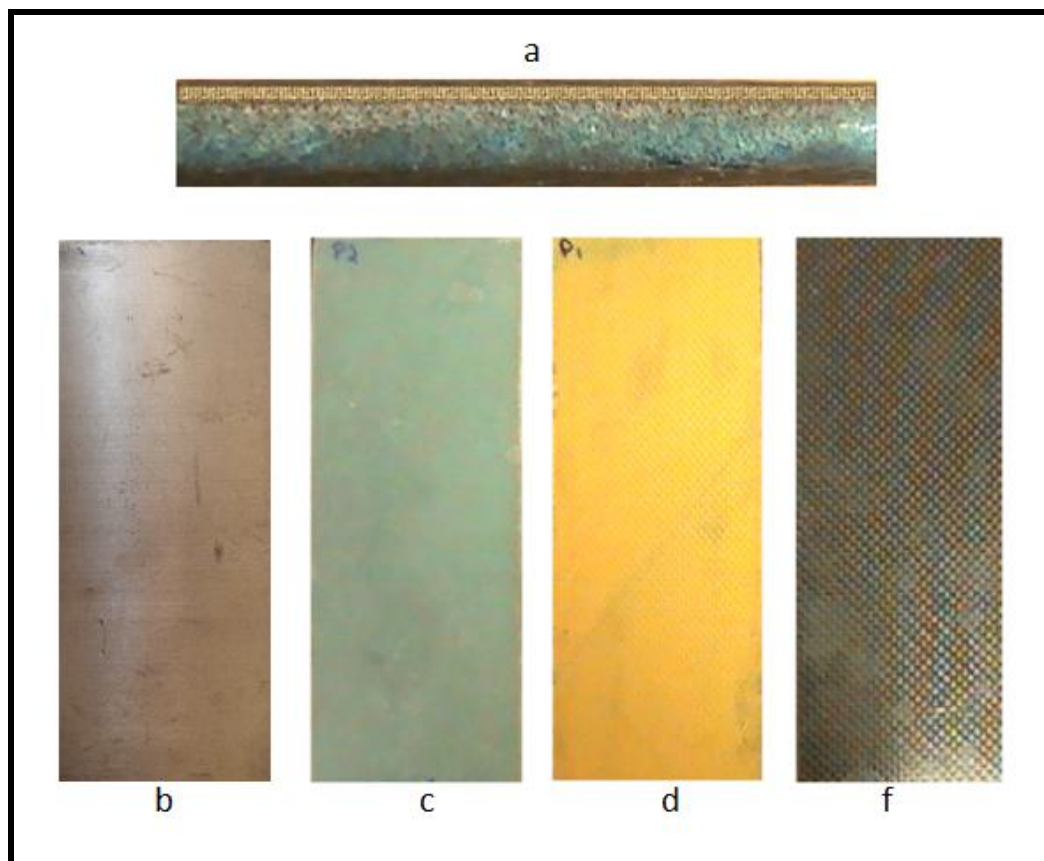


Figura 3. 10.- Probetas tipo sándwich para ensayo de flexión, (a) híbrido, (b) aluminio, (c) f. vidrio, (d) aramida y (f) carbono.

3.7. Caracterización de los compuestos laminados

Una vez obtenidos los valores óptimos para el curado de ambas matrices, se procedió a la fabricación de las probetas, que básicamente consistió en elaborar un laminado de cada tipo de material de refuerzo (fibra de vidrio, fibra de carbono, aramida) de los cuales, para cada tipo de ensayo, se extrajeron las probetas tomando en cuenta las dimensiones indicadas por las normas estandarizadas mencionadas en el capítulo II. Debido a que en el proceso de curado de las matrices poliméricas existieron variables que afectaban dicho proceso, en la fabricación de los compuestos laminados también fueron identificadas, por lo que se tuvo que llevar a cabo un proceso de experimentación previo a la fabricación de las probetas el cual tenía como objetivo encontrar la cantidad optima de vacío que nos proporcionara mejores propiedades tanto físicas como mecánicas, monitoreando así la densidad del compuesto y su resistencia a la tracción. En la figura 3.8 se puede apreciar el comportamiento del compuesto sujeto a un esfuerzo de tensión donde se observa que el lamiando con mejor rendimiento fue aquel que se fabricó con una cantidad de vacío igual a 14 in Hg, ya que su resistencia a la tensión fue mayor que los otros dos (fig. 3.11, 3.12).

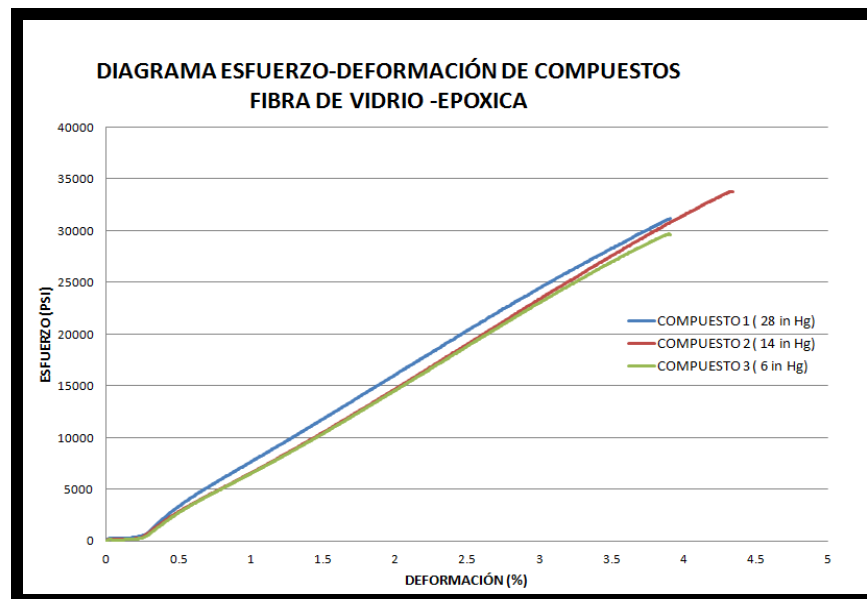


Figura 3. 11.- Comportamiento de las resistencia a la tensión vs cantidad.

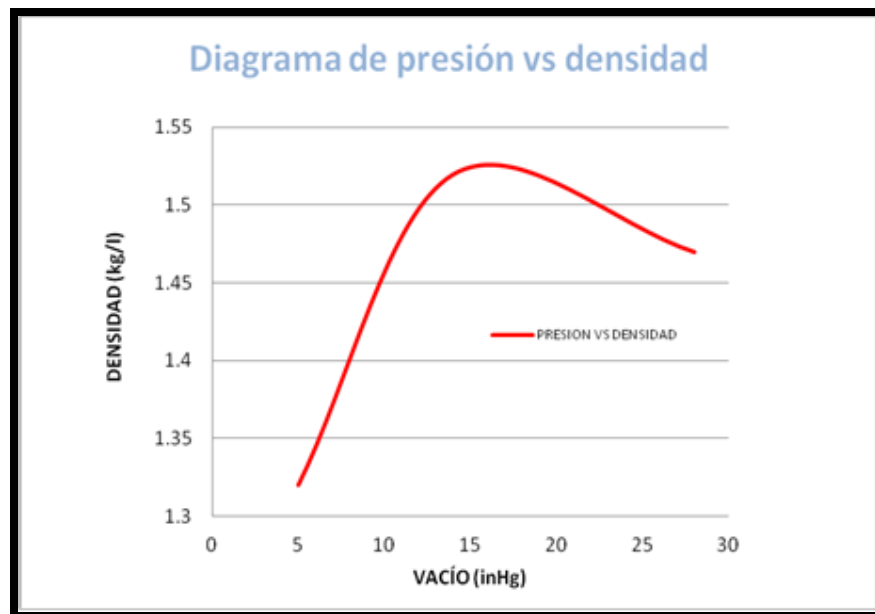


Figura 3. 12.- Comportamiento de la densidad del compuesto vs cantidad de vacío.

En la figura 3.12 se aprecia el comportamiento de la densidad del laminado contra la cantidad de vacío aplicada durante su fabricación, observando que la densidad más alta se encontró cuando el laminado se fabricó a 14 in Hg teniendo un valor de 1.47 kg/l lo que afecta directamente a la fracción volumétrica del compuesto, es decir, la cantidad de fibra y resina que lo conforman. Siendo así que bajo estas condiciones dicha fracción se obtuvo analíticamente basándose en la densidad total del compuesto y la de sus conformantes teniendo que el compuesto se conformaba de 0.46 partes de refuerzo por 0.53 de resina.

Todos los materiales empleados para el estudio de materiales compuestos, deben ser caracterizados por medio de ensayos normalizados, con el objetivo de conocer sus propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, resistencia a la tensión y resistencia a la flexión, por mencionar algunas, por lo que los materiales utilizados en esta investigación fueron sometidos a las pruebas mostradas a continuación. .

3.7.1. Ensayo de tensión (ASTM D-3039)

En este ensayo las probetas fueron sujetas a un esfuerzo de tensión con la intención de conocer el módulo de elasticidad y su resistencia a la tracción, obteniendo el diagrama que se muestra en la figura 3.10. Donde se puede apreciar que la resistencia a la tensión del compuesto de fibra de carbono fue superior a la de los otros dos materiales con un valor de 50.9 ksi, estando seguida del compuesto de fibra de aramida el cual presentó una resistencia de 31.7 ksi y por último el compuesto de fibra de vidrio el cual mostró una resistencia de 19.5 ksi. En cuanto a sus pendientes respecta la fibra de carbono presentó la mayor, la cual refleja el módulo de elasticidad con un valor de 998 kpsi seguido del compuesto de aramida con un valor de 440 kpsi y por último el del compuesto de fibra de vidrio igual a 118 kpsi (fig. 3.13).

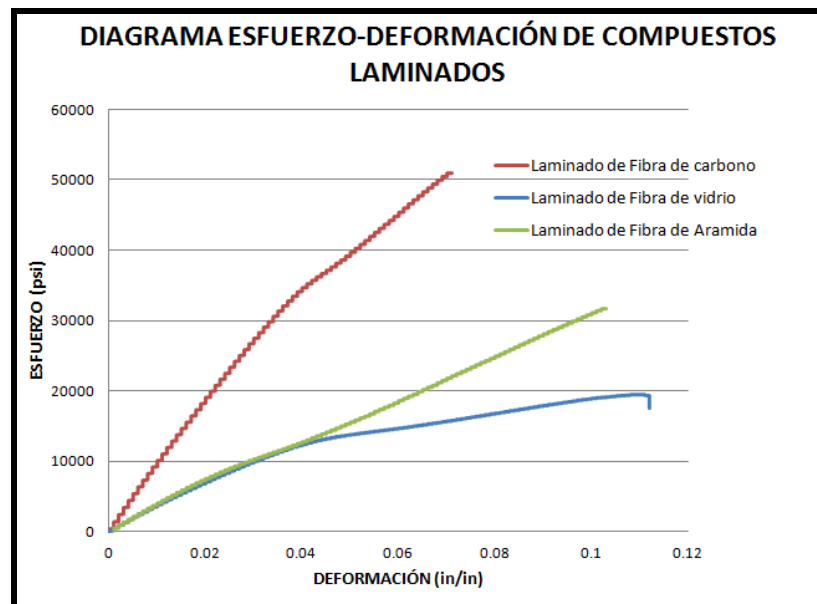


Figura 3. 13.- Diagrama esfuerzo deformación de los 3 laminados fabricados.

3.7.2. Ensayo de flexión en tres punto (ASTM D-790)

Durante el ensayo de las probetas bajo dicha norma, estas son sometidas a un esfuerzo de flexión en 3 puntos, lo que nos permitió conocer sus propiedades mecánicas bajo este tipo de esfuerzo obteniéndose el diagrama que se muestra en la figura 3.11, en donde podemos apreciar que la fibra de carbono posee mayor resistencia a la flexión con un valor de esfuerzo máximo 45 kpsi, estando seguida por la fibra de vidrio con un valor en su esfuerzo de flexión de 19 kpsi y por último la fibra de aramida con 12 kpsi (fig. 3.14).

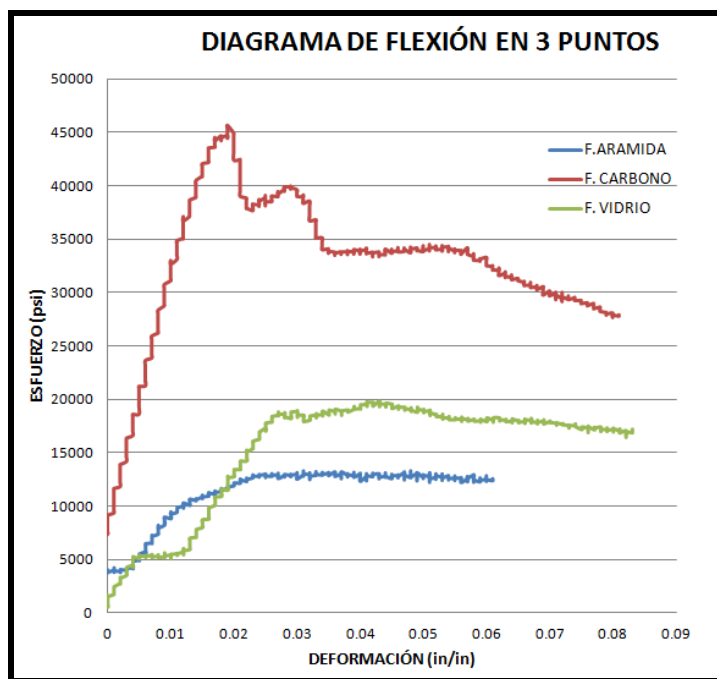


Figura 3. 14.- Comportamiento de los compuestos laminados bajo flexion en tres puntos.

El comportamiento de cada uno de los materiales bajo este específico estado de carga no necesariamente debe de ser semejante al de tensión, debido a que las propiedades de los compuestos laminados son muy diferentes bajo efectos de fuerzas en el plano y perpendiculares al mismo. Esto se puede apreciar de manera más clara entre los compuestos de aramida y fibra de vidrio ya que en este ensayo, el compuesto de aramida, presentó menor resistencia a la flexión que el de fibra de vidrio, que de manera contraria, en el ensayo de tensión, el compuesto de fibra de vidrio este mostró mayor resistencia a este estado de carga.

3.7.3. Caracterización de los compuestos tipo sándwich (ASTM D-393)

El desarrollo de este ensayo consiste en flexionar sobre tres puntos el compuesto tipo sándwich y así conocer la resistencia a la flexión de cada uno de los compuestos fabricados. Siendo que el compuesto conformado por caras de fibra de carbono mostró la mayor rigidez y resistencia a la flexión debido a la inherente rigidez de sus caras, de igual forma, el compuesto con caras de aramida presentó buena resistencia pero con menor rigidez tomando en cuenta que la falla se presentó a altas deflexiones. El compuesto de fibra de vidrio mostro un comportamiento más elástico que los dos materiales mencionados anteriormente solo que la falla se presentó a una carga menor que los mencionados. Es importante observar el comportamiento del compuesto híbrido ya que a pesar de ser el mismo material para ambas probetas, el único cambio fue de someter la probeta a flexión sobre la cara de aramida y en otro ensayo sobre la cara de fibra de carbono lo que nos arrojó resultados con ciertas diferencias en resistencia y deflexión, se puede apreciar que el compuesto cargado sobre la cara de fibra de carbono (fig. 3.15).

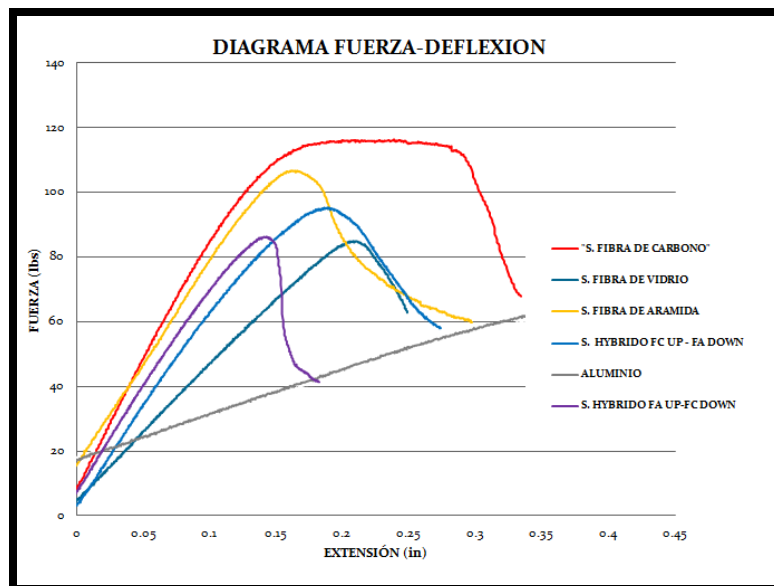


Figura 3. 15.- Comportamiento de los compuestos tipo sándwich bajo flexión en tres puntos.

CAPITULO IV.- Resultados y Discusiones

4. Discusión de resultados

4.1. Proceso de curado de las matrices

4.1.1. Dureza:

Debido a la naturaleza de las matrices y a su proceso de curado fue importante determinar, para cada una de ellas, los factores más importantes que afectan dicho proceso, debiendo ser posible su monitoreo. La variable en medición fue la dureza SHORE A₂, por lo cual los factores contemplados para el análisis fueron los siguientes (tabla 4.1).

Tabla 4. 1.- Parámetros de experimentación para el curado de resinas poliméricas.

MATRIZ POLYESTER	
Temperatura	Ambiente (28°C)
% de catalizador	0.5%, 1.5%, 3% MEKP
MATRIZ EPÓXICA	
Temperatura	21 °C, 38°C, 60°C

+

La matriz de polyester mostró un comportamiento de curado en fases debido a que el endurecimiento de las probetas con 3% y 1.5% de catalizador inició a los 15 minutos aproximadamente, posteriormente hubo un aumento considerable en la dureza ya que presentó un incremento que fue de las 70 -75 unidades a las 90 unidades aproximadamente en un periodo de tiempo de 10 minutos, tomando en cuenta que la generación de calor debido a la reacción exotérmica era mayor en las probetas con de mayor porcentaje de catalizador. Es importante recalcar que en el lapso de tiempo transcurrido la probeta con 0.5 % de catalizador aun no presentaba dureza alguna, siendo hasta el minuto 35 cuando presentó una dureza de 65 unidades. Posterior a los 35 minutos la dureza se fue incrementando lentamente por lo que se puede concluir que la cantidad de catalizador acelera el curado mas no aumenta la dureza más allá de

las 95 unidades ya que al minuto 80 todas las probetas presentaba la misma dureza (95 unidades).

En cuanto a la matriz epoxica, esta mostró un comportamiento similar a la de matriz poliéster ya que se distinguen distintas fases en el proceso. Debido a la naturaleza de esta matriz el tiempo de curado es más prolongado que el de la polyester siendo este de 24 horas. Uno de los principales catalizadores de curado de esta matriz es la temperatura ya que las probetas curadas a 60 °C y 38 °C presentaron durezas de 70 y 55 unidades respectivamente después de una hora de haber iniciados el proceso, mientras que la resina que curaba a 21° C no presentaba dureza alguna. Pasadas las 10 horas se presentó un fenómeno importante ya que las tres probetas presentaron una dureza de 94 unidades lo que indica una aceleración en el curado de la matriz.

4.1.2. Resistencia a la tensión:

Una vez reconocido el comportamiento de las resinas poliéster y epóxica durante el proceso de curado, se sometieron a un ensayo de tensión bajo la norma ASTM D-638 de donde se obtuvieron los siguientes resultados.

En la figura 4.1, se aprecia un comportamiento de tipo frágil en la resina polyester ya que a pesar de ser un polímero este presenta muy pocas deformaciones durante el ensayo de tensión llegando a la fractura aproximadamente a las 4000 psi, lo que nos indica que es un material resistente a la tensión pero no muy elástico. En el caso de la resina epóxica, en la figura 4.2 se pueden apreciar en tres curvas las cuales representan a una misma matriz curada a distintas temperaturas lo que propicia un comportamiento ligeramente distinto entre ellas. Se observa que la resina curada a 21 °C presenta mayor resistencia a la tensión que las otras dos (2200 psi) pero una vez que ha cedido no es capaz de resistir tanta elongación como las que se curaron a mayor temperatura. La matriz curada a 60 °C presenta una menor resistencia a la tensión que la anterior (2070 psi) pero puede soportar mayores deformaciones antes de presentar la fractura. En cuanto a la matriz curada a 38 °C esta muestra una media, tanto en resistencia a la tensión como deformaciones ya que es ligeramente más resistente a la tensión que la de 60 °C (2090 psi) y soporta más deformaciones que la de 21°C. (fig. 4.1, 4.2)

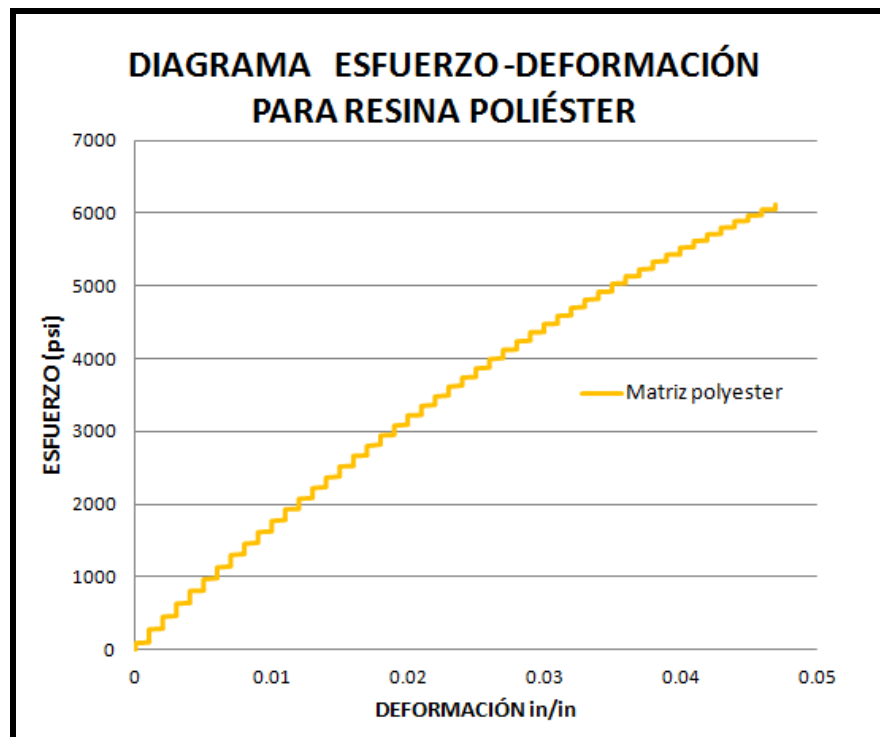


Figura 4. 1.- Diagrama de esfuerzo-deformación de la resina poliéster sujeta a tensió.,

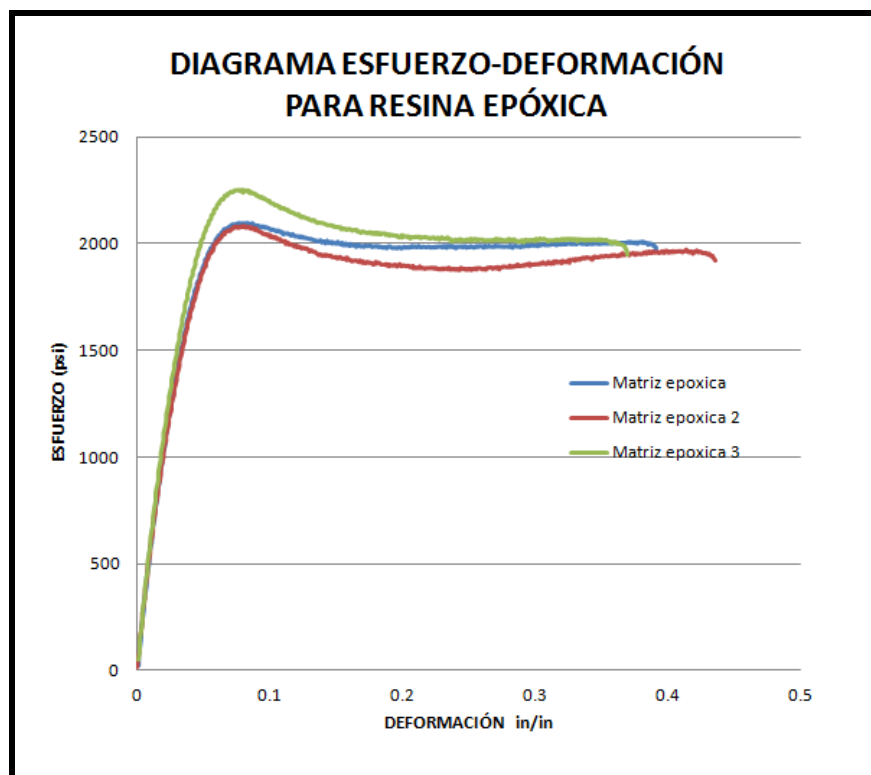


Figura 4. 2.- Diagrama esfuerzo-deformación de resina epóxica curada a distintas temperaturas.

4.1.3. Resistencia a la flexión

Una vez realizadas las pruebas de tensión en las matrices, se observó el comportamiento que presentaba cada una de ellas bajo este tipo de carga, lo que nos ayudó a darnos una idea del comportamiento de dichas matrices al ser sujetas a un esfuerzo de flexión en tres puntos, de donde se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 4.2).

Tabla 4. 2.- Resultados de la prueba de flexión a las resinas poliméricas.

MATRIZ	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (psi)	DESPLAZAMIENTO (in.)
Epóxica	2700	0.16
Polyester	10500	0.1

Como se observa en la tabla 4.2 la resina poliéster soportó mayores esfuerzos que la epoxica comportándose con cierta fragilidad debido a que no presentó un desplazamiento considerable, a diferencia de esta la resina epoxica que mostró mayor desplazamiento siendo así más flexible que resina poliéster, que para los fines de esta investigación, era necesaria una resina con gran plasticidad.

Durante el experimento de flexión se observó que la falla de la resina poliéster era de tipo explosivo, es decir, cuando se presentaba la ruptura el material estrellaba y salía despedido de los soportes, a diferencia de la resina epoxica la cual presentaba la falla debido al agrietamiento del material, es importante mencionar que dicho agrietamiento no era abrupto como el de la matriz de polyester lo que nos demuestra mayor tenacidad o resistencia a la propagación de la fractura.

4.2. Fabricación de los compuestos laminados por el método VARTM

4.2.1. Optimización del proceso VARTM

Debido a que dicho proceso de manufactura envuelve diversas variables entre las que sobresalen la cantidad de vacío y la densidad final del compuesto, fue necesario llevar a cabo un experimento en el cual se determinara la presión negativa óptima para obtener la mayor densidad en los materiales compuestos a fabricar en donde se obtuvieron los siguientes resultados.

En el diagrama de presión-densidad de la figura 3.13 se observa que conforme aumenta la cantidad de vacío, la densidad lo hace de igual manera llegando a un punto óptimo el cual se sitúa a una presión negativa de 14 inHg con densidad en el compuesto ya curado de 1.47 Kg/m³. Esto se debe a que conforme se aplica más vacío al sistema, el compuesto comienza a expresirse y la cantidad de resina que se extrae del mismo es cada vez mayor lo que afecta directamente en la densidad del compuesto final. Como lo muestra la figura se sobrepasan las 14 inHg de vacío, la densidad del material decae lo que sucede de igual manera si estamos por debajo de la presión negativa ya mencionada (fig.4.3).

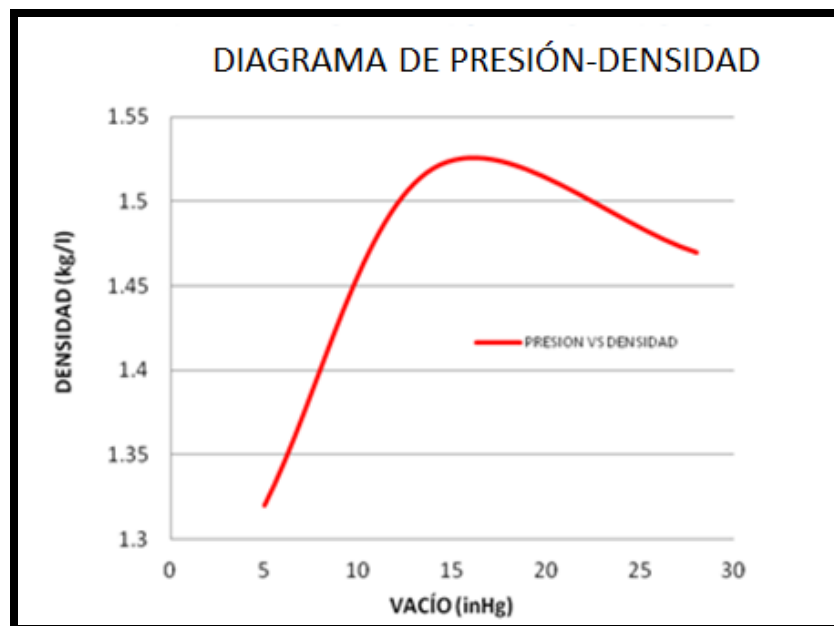


Figura 4. 3.- Diagrama de variación de la densidad del compuesto laminado en función del vacío aplicado

En lo que respecta al diagrama esfuerzo-deformación de la figura 4.4 se pueden apreciar los materiales compuestos fabricados con resina epóxica utilizando el método VARTM a distintas presiones presentan un comportamiento similar, en cuanto sus pendientes pero cabe destacar que el que se fabricó a 14inHg obtuvo mayor resistencia a la tensión que los fabricados a 28inHg y 6inHg. Esto se debe a que la matriz del primero distribuyo de mejor manera los esfuerzos en las fibras siendo este el de mayor densidad. En cuanto a los otros dos materiales, el fabricado a 28 inHg y 6 inHg se observó que el primero sufrió de extracción de resina debido a la excesiva presión negativa lo que derivó en menor cantidad de matriz y una distribución de esfuerzos menor, de la misma manera, el segundo material careció de una distribución equitativa de

esfuerzos esto se debió a que el material carencia de vacío suficiente para llevar a cabo una impregnación completa del laminado así como la extracción de aire en el sistema (fig.4.4).

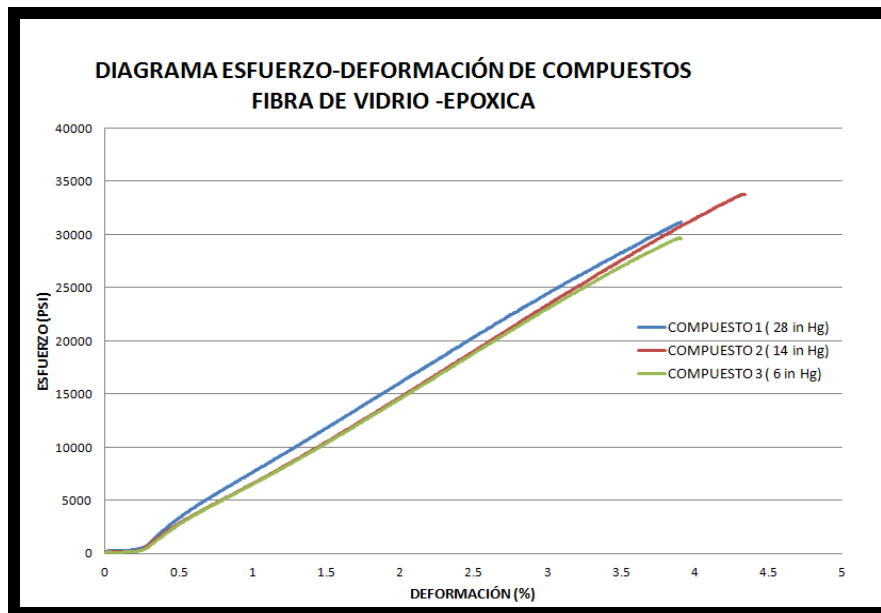


Figura 4. 4.- Diagrama esfuerzo-deformación de un compuesto fabricado a distintas presiones negativas.

4.2.2.Densidad y fracción volumétrica :

Las propiedades físicas más relevantes que se calcularon en los materiales compuestos de tipo laminado desarrollados en investigación, fueron la densidad y la fracción volumétrica obteniendo los siguientes valores para cada uno de los materiales (tabla 4.3).

$$1 = V_f + V_m$$

$$V_f = \text{Fracción volumétrica del refuerzo}$$

$$V_m = \text{Fracción volumétrica de la matriz}$$

Tabla 4. 3.- Propiedades físicas y fracciones volumétricas de los compuestos laminados.

MATERIAL	DENSIDAD DEL REFUERZO (kg./m ³)	DENSIDAD DE LA MATRIZ (kg./m ³)	MASA (kg)	VOLUMEN (m ³)	DENSIDAD DEL COMPUESTO (kg./m ³)	F. VOLUMÉTRICA (refuerzo – matriz)
Comp. de Fibra de Carbono	1750	951.8	0.0010964	8.93E-07	1227.75781	40% 60%
Comp. Fibra de Vidrio	2065	951.8	0.0007624	5.41E-07	1409.34635	40% 60%
Comp. Fibra de Aramida	1440	951.8	0.0007622	7.03E-07	1083.77886	30 % 70%
Aluminio 6061	2713	951.8	0.0668434	2.33E-05	2713	no aplica

De acuerdo con la tabla mostrada podemos observar primeramente que la densidad del compuesto de fibra de vidrio fue más alta, seguida del compuesto de carbono y por último el

de aramida, dicha variación se debe a las densidades inherentes de cada uno de los materiales y a su vez al comportamiento que tiene el flujo de resina durante el proceso de manufactura en donde el flujo más lento se presentó en la fibra de aramida lo que indica una impregnación de resina más dificultosa debido al empaquetamiento de las fibras.

En los compuestos de Fibra de carbono y fibra de vidrio la velocidad de flujo e impregnación fue mayor que la anterior y equiparable entre ambos y debido a que dichas fibras pueden compactarse mejor que las de aramida por lo que las densidades fueron mayores. Es importante resaltar que las propiedades mecánicas de cada uno de los tipos de las fibras son distintas por lo que la densidad simplemente nos permite conocer la fracción volumétrica del compuesto en base a las densidades de sus conformantes. La obtención de dicho parámetro se llevó a cabo por medio de un sistema de ecuaciones en el cual se introdujeron las densidades de cada compuesto así como las de la matriz y el material de refuerzo obteniendo de esta manera las fracciones volumétricas de cada uno de ellos. Como se aprecia en la tabla 4.3, los porcentajes de material de refuerzo y matriz fueron de 40% y 60% respectivamente tanto para el compuesto reforzado con fibra de carbono como para el reforzado con fibra de vidrio esto se debe a que en el proceso de fabricación hubo muy buena compactación entre las capas de material de refuerzo lo que permitió que no hubiera resina en exceso entre capa y capa siendo así que el compuesto de fibra de carbono y aramida presentaron la misma fracción volumétrica.

Para el compuesto de fibra de aramida la fracción volumétrica fue distinta que las anteriores (30%-70%) esto se debe a que las fibras que conforman este material poseen un empaquetamiento distinto ya que los filamentos presentan mayor grosor y el espacio libre entre los mismos es más grande, por lo que la resina tiende a ocuparlos durante el proceso de infusión permitiendo de esta manera retener más resina y por consiguiente modificar la fracción volumétrica obteniendo un compuesto con mayor porcentaje de resina de fibras.

4.3. Ensayo de los compuestos laminados

4.3.1. Resistencia a la tensión:

Cada uno de los compuestos laminados se sometió a un esfuerzo de tensión bajo la norma ASTM D-3039 de donde se obtuvieron los siguientes resultados para cada tipo de laminado (Tabla 4.4).

Tabla 4. 4.- Resultados del ensayo de tensión de los compuestos laminados.

LAMINADO	RESISTENCIA A LA TENSIÓN(psi)	ELONGACIÓN (%)
F. de Carbono	50900	7.1
F. de Aramida	31700	10.3
F. de Vidrio	19500	11

El

análisis de estos valores es importante ya que para la aplicación en la que se desean implementar es necesario que el material sea resistente pero a la vez soporte deformaciones considerables debido al efecto de los impactos sobre el material.

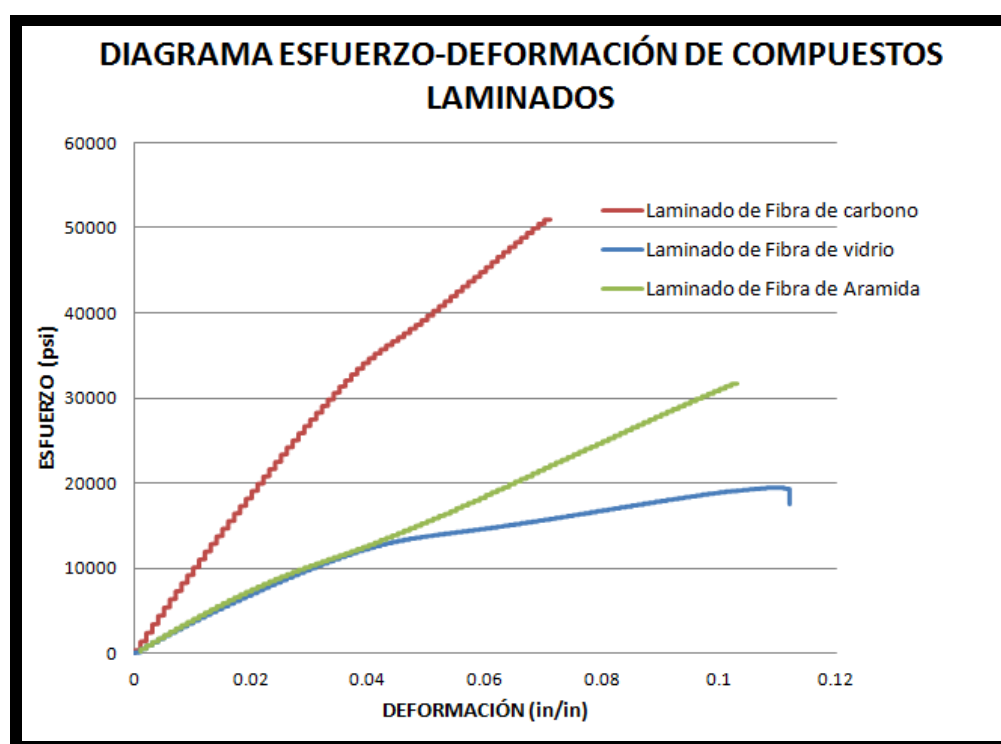


Figura 4. 5.- Diagrama esfuerzo-deformación de los compuestos laminados sujetos a tensión.

Como se observa en la figura 4.5 y en la tabla 4.4, el laminado de fibra de carbono es el que presenta mayor rigidez y resistencia a comparación del laminado de fibra de vidrio y aramida. En el caso del compuesto de aramida, este muestra una resistencia considerable, resaltando que el porcentaje de elongación que presentó fue de 10.3 % el cual es mayor al de la fibra de carbono y muy cercano al laminado de fibra de vidrio. Esto le da una ventaja considerable sobre los laminados de fibra de carbono y fibra de vidrio, ya que al no ser tan rígido este puede deformarse más sin perder su resistencia lo que ayuda a la absorción de

energía al momento de un impacto. A pesar de que el laminado de fibra de vidrio presenta una rigidez similar a la del compuesto de aramida, su resistencia es menor por lo que no es muy buen candidato para la aplicación requerida.

Si se fabricara un compuesto de tipo sándwich con ambas caras de compuesto de fibra de carbono, este sería resistente pero muy rígido lo que no sería apto para la absorción de energía al momento de ser impactado, y si las caras del compuesto tipo sándwich fueran únicamente de aramida sería resistente pero carecería de rigidez por lo que es posible que la

combinación de una cara de compuesto de fibra de carbono y la otra de aramida pudieran mejorar las propiedades del compuesto tipo sándwich debido a que una de ellas aportaría rigidez y la otra resiliencia siendo que obtendríamos un material rígido, resiliente, tenaz y liviano para la aplicación en perfiles resistentes a impactos.

4.3.2. Resistencia a la flexión:

Los compuestos laminados se sometieron a esfuerzos de flexión en tres puntos bajo la norma ASTM –D790 para conocer la resistencia de cada uno de ellos bajo este tipo de carga (Tabla 4.5).

Tabla 4. 5.- Resultados del ensayo de flexión de los compuestos laminados.

LAMINADO	Esfuerzo de flexión (psi)	EXTENSIÓN (in)
F. de Carbono	41400	0.036
F. de Aramida	12490	0.076
F. de Vidrio	19840	0.06

Observando el diagrama esfuerzo deformación de la figura 4.6 podemos apreciar que el laminado de fibra de carbono es el más resistente a la flexión (41400 psi), seguido de la fibra de vidrio en la cual la resistencia a la flexión es aproximadamente la mitad que la del laminado de fibra de carbono. El laminado de fibra de aramida resultó menos resistente a la flexión que el de vidrio y carbono pero como dato particular fue más resistente que la fibra de vidrio en el ensayo de tensión (fig. 4.6).

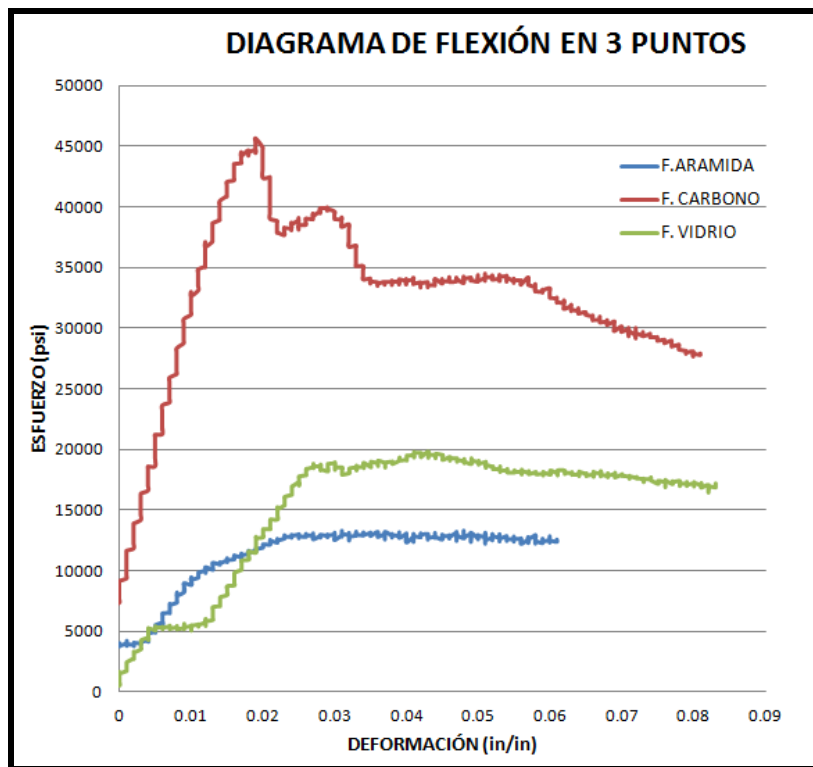


Figura 4. 6.- Diagrama esfuerzo-deformación de los compuestos laminados sujetos al ensayo de flexión.

El punto a discutir es que si se fabrica un compuesto tipo sándwich con cada uno de los diferentes laminados unos serán más rígidos que otros pero tomando en cuenta el objetivo de esta investigación es posible combinar las propiedades de rigidez de la fibra de carbono con la capacidad de absorber impactos de la aramida y de esta manera fabricar un sándwich a base de materiales compuestos el cual tenga la suficiente rigidez para evitar pandeos bajo cargas fuera del plano así como buena resistencia a impactos en una de sus caras (aramida).

4.4. Ensayo de los compuestos tipo sándwich

Resistencia a la flexión: Se fabricaron los compuestos tipo sándwich utilizando como corazón espuma de vinyl de 0.125in. de espesor. Cada configuración de dichos compuestos fue sometida a un ensayo de flexión en tres puntos bajo la norma ASTM C-373, para determinar su resistencia y el comportamiento bajo este tipo de carga. De este experimento se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 4.6).

Tabla 4. 6.- Resultados del ensayo de flexión para los compuestos tipo sándwich.

MATERIAL	ESFUERZO DE FLEXIÓN (KSI)	CARGA MÁXIMA (lbf)	DEFLEXIÓN (in)
S.F. Carbono	8.3	120	0.28
S.F. Aramida	5.9	113	0.191
S. Híbrido FC-FA	6.4	98.37	0.21
S. Híbrido FA-FC	5.7	89	0.15
S.F. Vidrio	5.6	85.6	0.21

La tabla 4.6 está basada en la carga y la deflexión debido a la configuración de los compuestos laminados, ya que estos no presentaban el mismo espesor por lo que sus secciones transversales eran distintas, es por ello que los valores de esfuerzo y carga difieren entre los materiales. Por este motivo nos inclinamos a analizar las cargas y las deflexiones. Appreciando la tabla 4.6 se observa que el sándwich de fibra de carbono soportó la mayor carga pero a su vez presentó la mayor deflexión de todos los compuestos. El compuesto de aramida soportó menor carga pero sus deflexiones fueron menores que el compuesto de fibra de carbono, lo que indica que mostró mayor rigidez que el anterior, esto se debe a que el sándwich de fibra de aramida, presentaba un espesor mayor que el de carbono ya que en los ensayos de flexión de los compuestos laminados la fibra de carbono demostró mayor rigidez que el de vidrio y aramida. En la tercera posición tenemos al sándwich híbrido de fibra de carbono y aramida que se flexionó con la cara de fibra de carbono hacia arriba y la aramida hacia abajo, este soportó menor carga que los dos anteriores pero sufrió deflexiones similares al de aramida y menores al de carbono lo que indica que por su configuración presenta una rigidez intermedia entre el sándwich de fibra de carbono y aramida.

Posteriormente se tiene el mismo sándwich híbrido mencionado anteriormente solo que está flexionado con la cara de carbono hacia abajo y la de aramida hacia arriba resultando en la configuración más rígida de todas pero con baja resistencia a la carga, esta rigidez se debe a que

al momento de flexionarse, la cara inferior del sándwich es más rígida que la superior y si se analiza el elemento como una viga, la parte inferior del sándwich está sujeta a tensión siendo en el análisis a tensión de los compuestos laminado el compuesto de fibra de carbono resultó ser el más rígido de los tres ensayados (fig. 4.7).

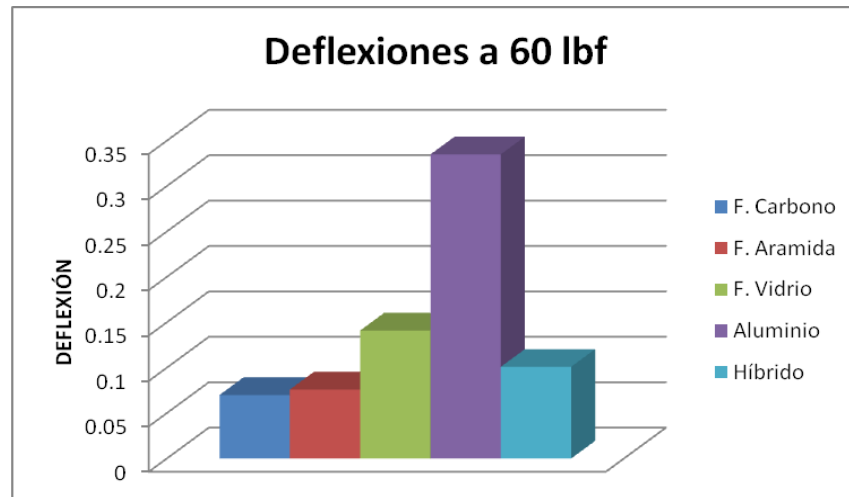


Figura 4. 7.- Diagrama de deflexiones a una carga determinada en cada una de las probetas.

En la figura 4.7 se muestra el comportamiento de los diferentes materiales ensayados bajo una carga de flexión, observando que bajo la misma magnitud de carga el aluminio presentó la mayor deflexión (0.320 pulgadas) a diferencia de los compuestos de carbono, aramida e híbrido (0.052, 0.057, 0.157 pulgadas) respectivamente, lo que muestra una marcada diferencia en las rigideces de los materiales.

4.4.1. Prueba de impacto

Las cinco configuraciones de compuestos tipo sándwich, así como el aluminio 6061 fueron sometidos a la prueba de impacto para determinar su comportamiento bajo este tipo de carga, se ensayaron tres especímenes por material, en donde se apreció que el aluminio presentó baja absorción de energía (2.28 ft·lb), destacando que las deflexiones en la probeta fueron las más grandes de todas, estando esta evidentemente en la región plástica del material. El sándwich con caras de fibra de carbono fue el que menos energía logró absorber de todas las probetas ensayadas debido a la rigidez de sus caras, que por la naturaleza de la prueba, se genera un esfuerzo de corte fuera del plano el cual es capaz de guillotinar la probeta; en cambio el compuesto de fibra de vidrio mostró mayor absorción de energía que el de aramida, y que el de carbono ya que el daño aparente en las caras y el corazón fue menor,

y la lectura del indicador así lo mostraba. El compuesto de aramida presentó buena absorción de energía, no tanta como la del compuesto de fibra de vidrio, pero el daño de la probeta, tanto en sus caras como el corazón fue menor que el de la dos probetas mencionada anteriormente. Posteriormente se ensayó el compuesto híbrido el cual fue impactado primeramente en la cara con material de aramida el cual mostró buena resistencia al impacto superior a todos los materiales mencionados anteriormente, cabe mencionar que el daño presente en la probeta fue muy bajo a comparación de los ensayos precedentes destacando que no se presentaron delaminaciones aparentes ni desprendimientos de material. De igual manera se ensayó este mismo compuesto sólo que ahora se impactó la cara de fibra de carbono, que a su vez presentó buena absorción de energía pero dicha cara sufrió delaminaciones y astillamiento, aun así presento la mayor absorción de energía de todos los compuestos tipo sándwich probados. Es importante remarcar que en todos los compuestos se presentó una falla a corte y aplastamiento en el material que conforma el corazón de cada probeta, lo que puede explicar que a pesar de que los materiales que conforman las caras de los sándwiches poseen propiedades muy distintas entre sí, al poseer un mismo material de corazón este falla en todos los casos, en unos es más evidente que otros. Esto se debe a que la cara, al ser impactada, absorbe cierta cantidad de energía al igual que el corazón y debido a que la resistencia al corte de este último es inferior a la de las caras, bajo una misma deflexión, este fallará inminentemente.

Es por ello que el material del corazón debe ser resistente no solo a compresión, sino a corte en el plano ya que el efecto de este tipo de pruebas genera estados de carga críticos tanto para las caras de compuesto como para el material del corazón (**fig. 4.8**).

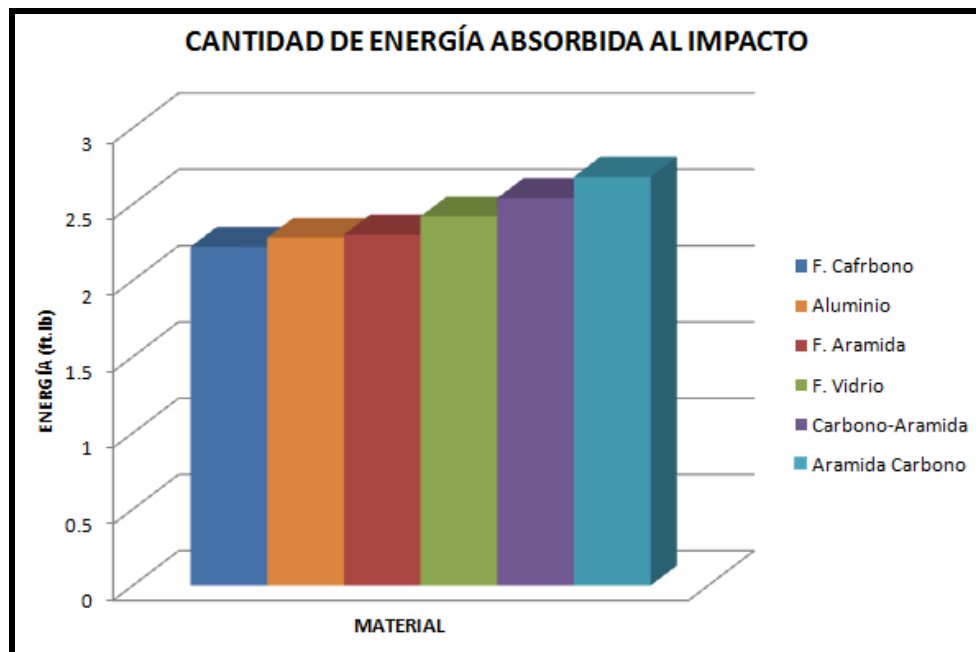


Figura 4. 8.- Cantidad de energía absorbida en cada una de las probetas durante la prueba de impacto.

Conclusiones:

Se pudo fabricar y caracterizar un material compuesto tipo sándwich capaz de igualar e incluso superar las propiedades mecánicas del aluminio 6061 de 0.095 pulgadas de espesor el cual es empleado en pisos de automotores de alto desempeño.

Se logró caracterizar las matrices poliméricas empleadas en la fabricación de los compuestos laminados y tipo sándwich en donde se observó que:

- Conforme transcurrieron las 24 horas de curado, las tres probetas presentaron una dureza de 96 unidades pudiendo concluir que la temperatura acelera el proceso de curado mas no la dureza del material lo que puede derivar en un ahorro de energía si el proceso se está llevando a cabo en un horno, ya que no es necesario elevar la temperatura más de 38 °C para obtener valores altos de dureza después de las 10 horas de curado.
- En el ensayo de tensión la resina poliéster presentó un comportamiento frágil en comparación de la resina epóxica a pesar de que ambas poseen durezas iguales.
- En el ensayo de tensión la resina epóxica mostró un agrietamiento más pausado que la resina polyester ya que ésta última, al presentarse la ruptura, fue más abrupta y además la probeta se fracturó en más partes, lo que dio pauta de que la resina epóxica posee mayor tenacidad que la de poliéster haciéndola apta para los fines de esta investigación.
- En el ensayo de flexión se observa un comportamiento similar que el ensayo de tensión, es decir, la resina polyester presenta mayor rigidez que la epóxica lo que no la hace apta para grandes deformaciones.
- En el ensayo de flexión la resina epóxica soportó mayores deformaciones antes de fracturarse lo que de nuevo indica mayor tenacidad y plasticidad que la resina de poliéster.
- En base a los resultados obtenidos de las pruebas antes mencionados, se eligió la resina epóxica curada a 38 °C como la matriz conformante de los materiales compuestos a fabricar en esta tesis, debido a que presenta una excelente dureza y a pesar de que la resistencia a la tensión de esta es inferior a la de la resina polyester, es capaz de soportar mayores deformaciones lo que la hace propicia para la absorción de energía al ser sometida a impactos, es decir , presenta mayor plasticidad y tenacidad .

Se logró analizar y controlar las variables del proceso de síntesis VARTM, siendo que durante el proceso se encontró que:

- La presión negativa ejercida sobre el laminado durante el proceso de fabricación afecta directamente la velocidad de impregnación y por consiguiente la densidad del compuesto final y su fracción volumétrica de manera no lineal.
- A mayor presión negativa mayor es la compresión entre las capas por lo que el compuesto laminado final es más compacto.
- El empaquetamiento de las fibras afectan de manera directa el flujo de resina y por consiguiente la fracción volumétrica del compuesto final.
- Es necesario tomar en cuenta la densidad inherente del material de refuerzo, la densidad de la matriz y la fracción volumétrica entre ambos si se desea obtener una densidad específica en el compuesto final.

Se pudo fabricar y caracterizar, bajo las normas de prueba estandarizadas ASTM, una variedad de cinco materiales compuestos laminado, encontrando que:

- La combinación del laminado de fibra de carbono y aramida en un compuesto tipo sándwich permite a dicho compuesto absorber energía durante el impacto y a su vez poseer rigidez suficiente para evitar pandeos al someterse a esfuerzos fuera del plano.
-

Se logró fabricar y caracterizar, bajo las normas de prueba estandarizadas, una variedad que cuatro materiales compuestos tipo sándwich, observando que:

- La configuración híbrida del compuesto tipo sándwich que fue impactada sobre la cara de fibra de carbono presentó mayor absorción de energía que el aluminio 6061, a su vez las deformaciones en la probeta fueron menores que en aluminio, pero cabe destacar que el aplastamiento del corazón en todas las probetas fue catastrófico, lo que indica que el material de corazón aporta la mayor capacidad de absorción de energía del compuesto lo que deriva estructuras más resilientes con caras de compuesto laminado lo suficientemente rígidas para soportar cargas de flexión.

4.5. Trabajos futuros

- Siguiendo los procesos de síntesis y caracterización citados en esta investigación es posible continuar el estudio en elementos estructurales a base de materiales compuestos tipo sándwich con diferentes geometrías.
- Realizar análisis de fatiga en materiales compuesto tipo sándwich para obtener la curva S-N utilizando diversos materiales tanto en las caras del compuesto como en el corazón.
- Correlacionar la respuesta a cierto estados de carga de distinto materiales compuestos tipo sándwich utilizando software para análisis de elemento finito (ANSYS, NASTRAN).

Referencias bibliográficas

- [1] Tucker, N.L., Kevin ,**Introduction to Automotive Composites**.2002: Smithers Rapra
- [2] Jones, R.M., **Mechanics of Composites Material**.,1999: Taylor & Francis.
- [3] Committee., A.I.H., **ASM HANDBOOK**. 2005.
- [4] Akovali, G., **Handbook of Composite Fabrication**. 2001: Smithers Rapra
- [5] Agarwal, B.D., **Analysis and Performance of Fibre composites**. 2006 Wiley
- [6] ASTM, **COMPOSITES TESTING STANDARDS**.
- [7] Campbell, F.C., **Structural Composite Materials**. 2010: ASM International
- [8] **High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites**.
2005, National Academies Press
- [9] **High Performance Synthetic Fibers for Composites**.1991: National Academies Press
- [10] Thomas, S.J., Kuruvilla Malhotra, S.K., **Polymer Composites Volume 1 : Macro- And Microcomposites**.2012: Wiley-VCH
- [11] Vinson, J.R.S., Robert L., **Behavior of Structures Composed of Composite Materials (2nd Edition)**. 2002 : Kluwer Academic Publishers
- [12] Ting, T.C., **Anisotropic Elasticity: Theory and Aplications**. 1996: Oxford University Press. 591.
- [13] Internacional, A., **Engineered Materials Handboock Composites**. 1987: ASM Internacional

- [14] Milton, G.W., **Theory of Composites**. 2001: Cambridge University Press
- [15] Singh, D.K., Waltraud M., **Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites IV**. 2009: Wiley-American Ceramic Society
- [16] Forrest, M.J., **Analysis of Thermoset Materials, Presursors and Products**. 2003.
- [17] John, B.R.N., C.P., **Update on Syntactic Foams**. 2010: Smithers Rapra
- [18] Grove, S.M.a.S.M., **Composite Sandwich Panel Manufacturing Concepts for a Lightweight Vehicle Chassis**. ACMC, University of Plymouth.
- [19] Davis, J.R., **Tensile Testing (2nd Edition)**.2004 ASM International
- [20] Kollar, L.P.S., George S., **Mechanics of Composite Structures**.2003: Cambridge University Press
- [21] S.A. Smith, L.L.E., R.L. Sadler, and K.N. Shivakumar, **Evaluation of Composite sandwich panels fabricated using vacuum assisted resintransfer molding**. Center for Composite Materials Research, North Carolina A&T State University Greensboro, 2000.]
- [22] K. Malekzadeh, M.R.K., R. Olsson, A. Jafari **Higher-order dynamic response of composite sandwich panels with flexible core under simultaneous low-velocity impacts of multiple small masses**. ELSEVIER, 205.
- [23] Riber, H.J., Response **Analysis of Dynamically Loaded Composite Panels**. Departmen of Naval Achitecture and Offshore Engineering, 1997.
- [24] Ratna, D., Epoxy Composites : **Impact Resistance and Flame Retardancy**. 2005: Smithers Rapra
- [25] Defense D.O., **COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK**. Department of Defense, 2002.

