

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología

Unidad Valle de las Palmas



**“FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ
POLIMÉRICA REFORZADAS CON FIBRA DE VIDRIO”**

Tesis para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presenta

Ramos Lucero Leonel Armando

Director de tesis:

M.C. Paz González Juan Antonio

Tijuana, B. C.

Marzo, 2018.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por cada una de sus bendiciones que han logrado permitirme llegar a donde me encuentro.

A mis **padres**, José Ramos y Martha Lucero, que han sido todo el apoyo incondicional que he tenido, por todo su amor, sacrificios, y por posibilitarme todas las herramientas necesarias para ser exitoso en la vida.

A mi **director**, Juan Antonio Paz González por su apoyo y dedicación, al darme la oportunidad de realizar una investigación de Tesis en su especialidad.

A mi **novia**, Anna Kristyna Franco por todo su amor, apoyo incondicional y tiempo, a pesar de la distancia sus palabras y buenos deseos siempre están presentes.

A mi **hermano**, Alejandro Ramos por ser un gran ejemplo a seguir como persona y enseñarme a valerme por mis logros.

Al **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico**, por abrirme las puertas facilitando el uso de equipos especializados y brindarme apoyo académico.

Al **cuerpo académico de CENIDET**, el Dr. Arturo Abúndez y el M.C. Enrique Alcudia, por brindarme todo su apoyo para desarrollar la caracterización del laminado por medio de un ensayo de tensión.

A la **Universidad Autónoma de Baja California**, Unidad Valle de las Palmas, por brindarme las bases fundamentales de mi formación académica, y permitirme el uso de equipo e instalaciones dentro de esta institución.

¡GRACIAS!

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE	
1.1 Introducción	3
1.2 Estado del arte	3
1.3 Antecedentes de prótesis en México	6
1.4 Estadísticas	8
1.5 Objetivos	12
1.5.1 Objetivo General	12
1.5.2 Objetivos Específicos	12
1.6 Justificación	12
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
2.1 Introducción	13
2.2 Conceptos fundamentales	14
2.2.1 Compuestos fibrosos (Refuerzos)	14
2.2.2 Matrices	15
2.2.3 Tipos de compuestos estructurales	17
2.3 Métodos de fabricación	18
2.3.1 Laminado manual	19
2.3.2 Moldeo por compresión	20
2.3.3 Embolsado en vacío	20
2.3.4 Devanado de filamento	21
2.3.5 Moldeo por transferencia de resina	22
2.3.6 Infusión de resina	24
2.4 Método de ensayo tensión ASTM D 3039	27

CAPÍTULO III. FABRICACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 Introducción	29
3.2 Diagrama de flujo del proceso de infusión de resina para un acabado liso	29
3.3 Diagrama de flujo del proceso de infusión de resina para doble acabado liso	30
3.4 Equipo para el proceso de infusión de resina	30
3.5 Fabricación del material compuesto	40
3.5.1 Pasos a seguir utilizando el diagrama 3.2	41
3.5.2 Manufactura de probetas	58

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 Introducción	62
4.2 Desarrollo experimental	63
4.2.1 Medición de probetas	64
4.3 Resultados de tensión	65
4.4 Comparación de propiedades mecánicas de materiales	67

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones	69
5.2 Trabajos futuros	70

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	71
----------------------------	----

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, la tecnología ha ido evolucionando de la mano con el desarrollo de diferentes materiales, cada año se presentan nuevos retos en las ramas ingenieriles. Los materiales con más demanda requieren valores de resistencia especiales de acuerdo a la vida útil y al servicio que debe cumplir.

Los materiales más utilizados en la fabricación de componentes en las que se requiere baja relación masa-volumen y alta resistencia estructural son materiales compuestos, debido a sus considerables propiedades mecánicas, en comparación de materiales comunes, tales como; acero, aluminio, concreto, madera, etc. De la amplia gama de materiales compuestos, los que han tenido mayor desarrollo en el mercado son los formados por matrices orgánicas (poliéster, epoxi, viniléster) y fibras de alta resistencia (vidrio, carbono, aramidas y sintéticas) (Garcia, 2007).

Los materiales compuestos de fibra de vidrio con matriz polimérica se emplean en la industria automotriz, química, deporte protésica y construcción, debido a su alta capacidad a compactarse, sus grandes propiedades mecánicas, estabilidad química, vida útil, su bajo costo de fabricación, flexibilidad de fabricación y mantenimiento. De manera general, estos materiales se han utilizado recientemente en las áreas que demandan dichos materiales en base a sus propiedades (Viladoms Weber, 2003).

El presente trabajo se basa en el método de fabricación y caracterización de un material compuesto tipo laminado con matriz polimérica, considerando la sustitución de material para elementos mecánicos protésicos utilizados en aplicaciones biomédicas, debido a la existencia del gran déficit de atención en el área médica protésica en México. El INEGI reporta que el número de amputados en México es cerca de 780 mil. Mientras que la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición del 2012, registra que son más de 5 millones de personas la que tienen incapacidad para desplazarse. Por otra parte, la Academia Nacional de Cirugía reporta que se amputan 75 personas diarias. Los datos al 2014 muestran que hay cerca de 900 mil amputados en el país. Esta es la población que se sufre de una discapacidad y que se debe atender (Vázquez Vela, 2015).

El desarrollo de dicha investigación se divide en cinco capítulos:

- El capítulo I presenta el estado del arte, el cual menciona cronológicamente el descubrimiento y la evolución de los materiales compuestos, junto con el desarrollo de prótesis en México y su estadística a nivel nacional.
- El capítulo II contiene fundamentos teóricos básicos para el entendimiento de dicha investigación, y distintos métodos de fabricación.
- El capítulo III muestra la metodología de la fabricación del material compuesto, por método de infusión de resina.
- El capítulo IV presenta los resultados de las pruebas experimentales en ensayos a tensión, y la comparación de materiales utilizados en ortesis y prótesis.
- El capítulo V contiene las conclusiones de los resultados, incluyendo trabajos futuros en beneficio de otras investigaciones.

CAPÍTULO I:

Estado del Arte

1.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día el desarrollo de materiales compuestos ha ido incrementando con el paso del tiempo, debido a la demanda del crecimiento tecnológico, sin embargo, el descubrimiento de estos materiales fue desarrollada en épocas pasadas, en la cual el razonamiento del ser humano le permitía experimentar con distintos materiales mezclándolos unos con otros, formando otro material con nuevas composiciones para una gran versatilidad de aplicaciones.

1.2 ESTADO DEL ARTE

En épocas antiguas se realizaron múltiples invenciones de distintos tipos de materiales compuestos. Uno de los primeros registros, fue por los antiguos mesopotámicos alrededor del año 3400 A.C. Ellos engomaban tiras de madera con distintos ángulos para crear madera aglomerada. Por otra parte en el año 600 A.C. los egipcios hicieron invención del cartonaje, el cual consistía en remojar capas de lino en yeso, para el recubrimiento de mascarillas mortuorias (Mar-Bal, 2015). Sin embargo estos materiales fueron cambiando con el paso del tiempo, hasta finales del siglo XIX, donde Thomas A. Edison realizara los primeros experimentos con filamentos de carbón para probar su resistencia en la fabricación de la bombilla (Carrera, 2012).

El gran desarrollo de materiales compuestos dio inicio a principios del siglo XX, cuando en el año de 1907, el químico belga, Leo Baekeland (14 de Noviembre de 1863 – 23 de Febrero de 1944) Intentando solucionar un problema de síntesis química, descubrió un plástico al que le llamó baquelita, la primera de un encadenamiento de resinas sintéticas, que posteriormente revolucionarían la tecnología y la economía del momento, dando inicio a la “era del plástico” (Cuartero & Miravete, 2003).

Esta resina llamada baquelita (Figura 1.1), fue utilizada por su propiedad anti-conductiva y su resistencia al calor en distintos componentes como aisladores eléctricos, carcasas de radio, teléfonos, utensilios de cocina entre otros (Mar-Bal, 2015).



Figura 1.1 Primeras Bolas de billar hechas de baquelita, 1912.

Los años treinta, quizás la década más importante en el desarrollo de estos materiales sintéticos, y la industria de los compuestos. En 1935, la compañía Owens Corning, lanzó a la industria el polímero reforzado con fibra de vidrio, sus siglas en inglés (Fibre Reinforced Plastic)(Cindy, 2016). En 1936, las resinas de poliéster insaturado se patentaron, debido a las propiedades de curado, las cuales se convertirían en la elección primordial para la producción de resinas de hoy en día. Dos años más tarde las resinas de mayor rendimiento como las epóxicas llegaron a estar disponibles (Mar-Bal, 2015).

A medida que avanzaba la segunda guerra mundial, el esfuerzo de la guerra desarrolló rápidamente el incremento de tecnología. Para el año 1946 se crearon sistemas de propulsión en el que el movimiento es activado por algún agente externo al cuerpo, dando inicio a las prótesis neumáticas y eléctricas(González Hernández, Peña Vazquez, & Várquez Cervantes, 2011). La influencia de la incorporación de la ingeniería en el campo de los biomateriales, se evidenció en la aplicación de técnicas para caracterizar la estructura y superficie de los materiales, con el objetivo de observar las reacciones de los efectos biológicos.

A principios de la década de los 50's, se desarrollaron los métodos de manufactura tales como pultrusión, moldeo por bolsa de vacío, y devanado de filamentos a gran escala. El bobinado de filamentos se convirtió en la base para los motores de cohetes en gran escala, que impulsaron la exploración del espacio años después (Mar-Bal, 2015).

Posteriormente, investigaciones realizadas en 1958, demostraron la gran resistencia a la tracción que presentan abundantes hilos o filamentos de carbono unidos en forma de hebra, que adoptan el nombre de fibra de carbón (Carrera, 2012).

La primera fibra de carbono fue patentada en 1961, a pesar que años antes este material compuesto era comercialmente disponible. Estas fibras de carbono fueron de suma importancia por su termoestabilidad y la relación de peso-rigidez, de este modo abriendo más aplicaciones en los sectores, aeroespacial, automotriz, productos deportivos y bienes de consumo (Figura 1.2). El mercado marítimo era el mayor consumidor de materiales compuestos en la década de los 60's (Mar-Bal, 2015).

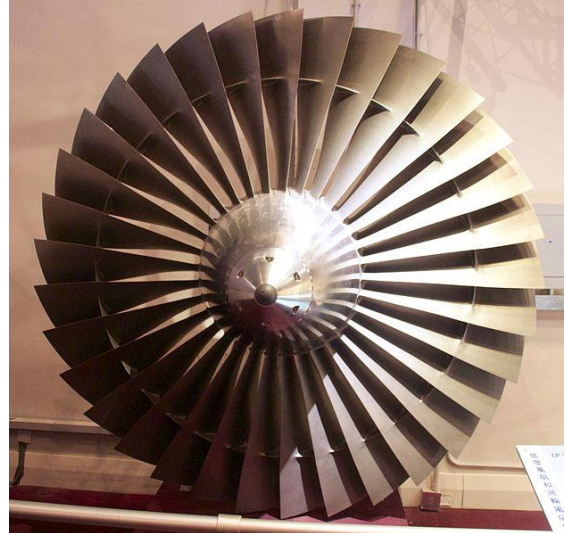


Figura 1.2 Primeros álabes de fibra de carbón, Rolls-Royce RB-211, 1968.

La incorporación de materiales cerámicos para el reemplazo de partes óseas y a su vez con el desarrollo de materiales compuestos, la comunidad científica que desarrollaba tareas en este campo se asoció en diversas sociedades, tales como la sociedad de Biomateriales (EE.UU) fundada en 1974 y la Sociedad Europea de Biomateriales. En 1978, se realizó el primer Congreso Internacional de Biomateriales. A partir de ese momento, se produjo un crecimiento notable en el número de investigaciones presentadas.

En la última década del siglo XX, los materiales compuestos impactaron en el área de fabricación y edificación industrial, haciendo reemplazos rentables de materiales tradicionales como el metal y termoplásticos reforzados. Ingenieros comenzaron a clasificar compuestos termoestables para distintos componentes dentro de las industrias, civil, eléctrica y transporte. (Wagner, Lourie, Feldman, & Tenne, 1998) comenzaron a investigar el doblado y colapso de materiales compuestos de nanotubos de carbonos y resinas epóxicas. Descubrieron que el encogimiento de una matriz epóxica durante el curado generaba una alta compresión en los nanotubos de carbono conocidos como (CNTs). Posteriormente Schaedler y Allaoui, encontraron

que la adición de diminutas cantidades de CNTs a resinas epóxicas, conduce a importantes mejoras en la resistencia mecánica y módulo de elasticidad (Cuartero & Miravete, 2003).

Stanley realizó el desarrollo de un material tipo sándwich con recubrimiento de fibra de carbono, resina epóxica, y un núcleo de espuma de poliuretano, con la singularidad de que las cubiertas estén cocidas entre sí, mediante fibras de Kevlar® (una poliamida sintetizada por primera vez en 1965, por la química polaco-estadounidense Stephanie Kwolek), esta permite fibras en sentido transversal aumentando así mismo la tolerancia al daño por separación de la cubierta con el núcleo (Hernández Moreno, 2002).

Para el siglo XXI, estos compuestos de fibras seguirán siendo los materiales del futuro, ya que el reducido peso y la gran resistencia por lo que son conocidos, los hacen extraordinarios en distintos sectores, tales como la aeronáutica y astronáutica. Además, el interés en estos compuestos no solo es de estas ramas, también despiertan el interés en los sectores de medicina, industria automotriz, construcción, aerogeneradores, industria marítima, entre otros. La construcción ligera es una tendencia única, y la continuidad a través de distintos sectores de producción, es en la que generará un gigantesco crecimiento.

1.3 ANTECEDENTES DE PRÓTESIS EN MÉXICO

El primer registro protésico se conserva en el museo Castillo de Chapultepec, en la Ciudad de México, es una prótesis para miembro inferior tallada en madera, que perteneció al General López de Santa Ana en el año de 1839. Posteriormente en el año de 1924, se encontró registro de algunas fábricas que se dedicaban a la manufactura de miembros artificiales, aparatos ortopédicos, sillas de ruedas y equipos de rehabilitación, pero fue hasta inicios de la década de los 40's cuando dio comienzo una etapa en la que diversos grupos clínicos, motivaron y patrocinaron la creación de los primeros talleres dedicados al diseño, fabricación y adaptación de sistemas protésicos (Hernández Stengele, 2008).

A mediados de la década de los 40's se dieron a conocer los pioneros profesionistas impulsores en el nuevo oficio de mecánicos ortopedistas, quienes con ciertos conocimientos en las aplicaciones de materiales, herramientas y equipo, lograron diseñar y fabricar dispositivos, estructuras y componentes que disminuyeron las secuelas invalidantes que presentaba la población amputada del país (Caudillo S, 2006).

En 1960, Rómulo O' Farril fundó el Instituto Mexicano de Rehabilitación, organismo independiente que beneficiaría a los discapacitados de México y América Latina, cuyo objetivo fue procurar la rehabilitación integral del sistema locomotor de quienes sufrían alguna minusvalía (Gómez, 2006). Este instituto formaba técnicos en el diseño, fabricación y adaptación de prótesis utilizando materiales de última generación como el nailon, resinas de poliéster y aluminio. Para poder apoyar a un mayor número de pacientes, se fabricaron aparatos ortopédicos, sillas de ruedas y prótesis que eran exportadas al resto de latino-américa. El transcurso del tiempo generó conflictos obrero-patronales y una mala administración llevaron al Instituto Mexicano de Rehabilitación cerrar sus puertas en 1983 (Rivero Serrano & Tanimoto, 2005).

En 1974 se formó la Asociación de Protesistas y Ortesistas de la República Mexicana, esta agrupación con el fin de desarrollar un programa de educación superior, para mantener un alto nivel de conocimientos técnicos y académicos con respecto a la protésica. Posteriormente en 1997 se fundó la Sociedad Mexicana de Ortesistas y Protesistas, A.C. dedicada a continuar la labor de la fundación anterior (Caudillo S, 2006). Además de estas asociaciones en México se tienen muchas otras instituciones que son participes en la atención de personas amputadas, como el Centro de Rehabilitación y Educación Especial CREE de la Secretaria de Salud, el Instituto Nacional de Medicina de Rehabilitación, Instituto Mexicano del Seguro Social IMSS, Instituto de Seguridad Social al Servicio de los Trabajadores del Estado ISSSTE, Sistema de Desarrollo Integral de la Familia DIF, Hospital Shriners para Niños con Diferencias en sus Extremidades, Centro de Rehabilitación Integral para el Minusválido del Aparato Locomotor CRIMAL.

En la actualidad, la Universidad Autónoma de Baja California es una de las instituciones que está a la vanguardia en investigación de diseño de prótesis en México. Esta institución desarrolla diseños de prótesis para partes motrices del cuerpo humano. La comercialización de este tipo de tecnología, es improbable debido al insuficiente apoyo financiero que esta institución recibe.

1.4 ESTADISTICAS

En México se reúne una serie de datos de diversos rubros por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía conocido como (INEGI). El INEGI presentó los resultados de la estructura y composición de la población con discapacidad en México, datos al 2014, de las cuales se distinguen en dos grupos de acuerdo con el grado de dificultad que experimentan para desempeñar actividades cotidianas: las personas con discapacidad grave o severa y las personas sin discapacidad ni limitación.

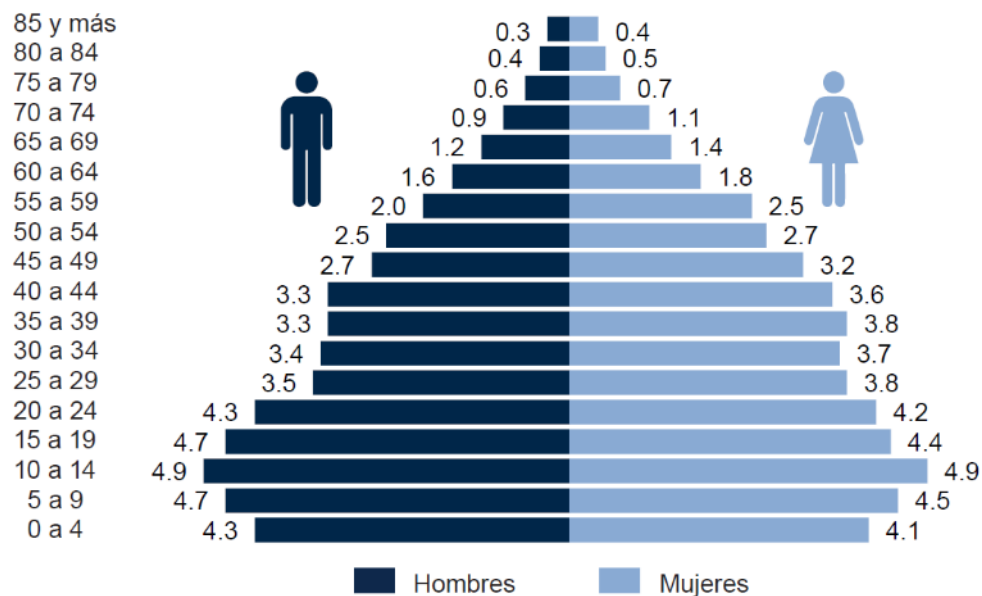


Figura 1.3 Estructura de la población, por grupo quinquenal de edad y sexo 2014.

Nota: No se incluye a la población que no especifico su edad. Fuente: INEGI. Encuesta de ENADID 2014.

En 2014, residían aproximadamente 120 millones de personas, 61.5 son mujeres y 58.5 hombres, de acuerdo con los resultados de la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADID) 2014. De cada 10 residentes en el país, 5 tienen menos de 30 años de edad, 4 están entre los 30 y los 59, y 1 tiene 60 años o más, (Figura 1.3).

La prevalencia de la discapacidad en México para el 2014 es de 6%, es decir que 7.1 millones de habitantes en el país tienen mucha dificultad o no pueden hacer alguna de las ocho actividades evaluadas: caminar, subir o bajar usando sus piernas; ver; mover, o usar sus brazos o manos; aprender, recordar o concentrarse; escuchar; bañarse, vestirse o comer; hablar o comunicarse; y problemas emocionales o mentales.

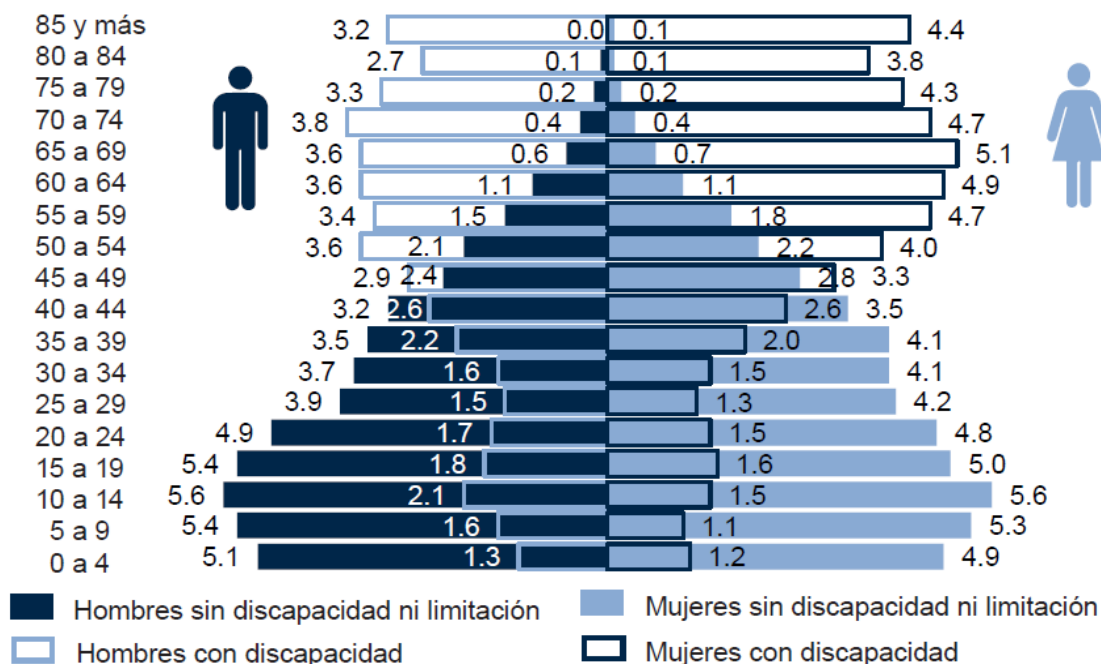


Figura 1.4 Estructura de la población, por condición de discapacidad según grupo quinquenal de edad y sexo 2014.

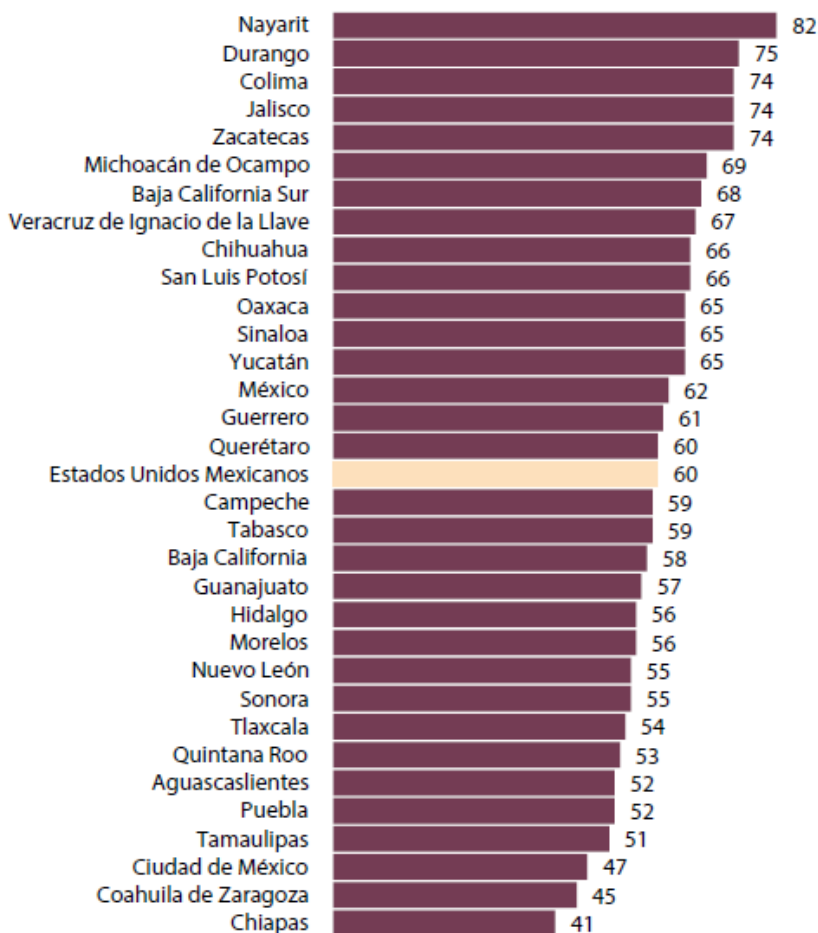
Nota: No se incluye a la población que no especifico su edad o su condición de discapacidad o limitación.

Fuente: INEGI. Encuesta de ENADID 2014.

La estructura por edad de la población con discapacidad muestra una mayor concentración en la etapa adulta, es decir en edades de 60 años y más con 47.3% y de 30 a 59 años con 34.8%. La discapacidad femenina supera al de su contraparte masculina (3.8 millones frente a 3.3 millones); el 6.2% de mujeres en el país viven con esta condición y 5.7% los hombres.

A medida que se toma en cuenta el porcentaje por género y grupos de edad, los resultados determinan que la discapacidad por grupo está relacionada con el incremento de edad o con la pérdida de capacidades físicas y quizás mentales, debido a la longevidad del mexicano.

El estado de Nayarit es el que posee la tasa más alta de personas con discapacidad, 82 por cada mil habitantes. Las tres entidades con las tasas más elevadas de discapacidad son; Jalisco (74), Michoacán (69) y Veracruz (67). El estado de Baja California está por debajo de la media nacional con 58 habitantes por cada mil (Figura 1.5).



(por cada 1 000 habitantes)

Figura 1.5 Tasa de población con discapacidad, por entidad federativa 2014.
Fuente: INEGI. Encuesta de ENADID 2014.

La principal discapacidad que se presenta en la mayoría de los mexicanos es la dificultad de caminar, subir o bajar usando sus piernas, que llega hasta el 64.1% (Figura 1.6). Sin embargo, al expresar estos valores no se refiere a que toda la población en el país este por igual, cada entidad varia de manera irregular y esta expresa que cada territorio tiene un nivel distinto de desarrollo socio económico, distinta cobertura y calidad del sistema de salud.

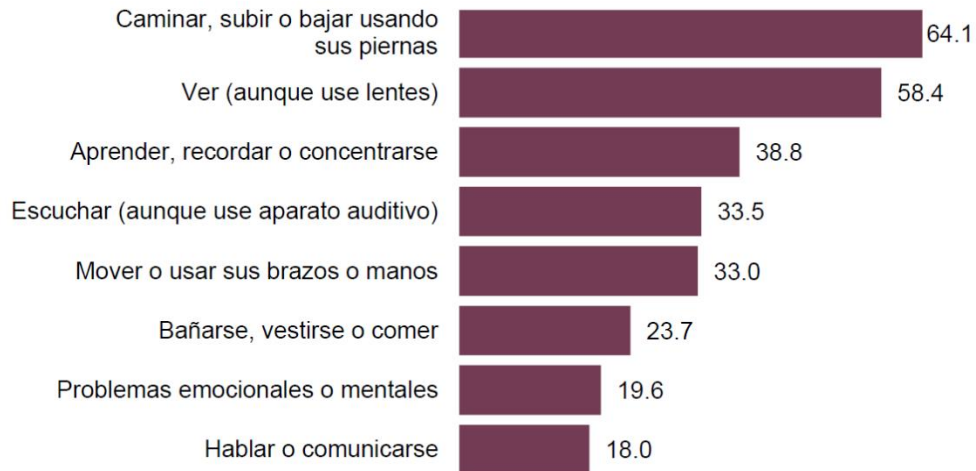


Figura 1.6 Porcentaje de población con discapacidad, por tipo de discapacidad 2014.

Nota: El porcentaje se calculó con base en el total de la población con discapacidad.

Fuente: INEGI. Encuesta de ENADID 2014.

La discapacidad motriz muestra un porcentaje superior a las demás discapacidades (Figura 1.6), siendo así una de las discapacidades más frecuentes sobre la población por tipo de discapacidad. Esta discapacidad se agrupó con las discapacidades músculo-esqueléticas y neuromotrices. Las discapacidades músculo-esqueléticas, se refiere a la dificultad que enfrenta una persona al intentar caminar, mantener posturas, y limitaciones en habilidades manipulativas al sujetar objetos. Del mismo grupo las neuromotrices, son aquellas que dificultan la movilidad de algún segmento corporal a consecuencia de un daño neurológico, incluyendo las secuelas de traumatismo, y de enfermedades, como la poliomielitis, lesiones medulares y la atrofia muscular (INEGI, 2016).

La realidad que enfrenta la mayoría de discapacitados en México es la discapacidad motriz, la imposibilidad de caminar, subir o bajar usando sus extremidades, por lo que esta investigación de Tesis sentará las bases de manufactura de un material compuesto laminado, para una futura aplicación motriz del cuerpo humano dentro de la institución académica, para el uso y beneficio de aplicaciones biomecánicas, lo cual será una contribución de supervivencia dirigido a la población con discapacidad en México.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Fabricar material compuesto tipo laminado a través del método de infusión de resina y caracterizar mecánicamente el módulo elástico longitudinal utilizando la norma ASTM D3039.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Obtener conocimientos sobre los materiales compuestos y los distintos métodos de manufactura.
- Llevar a cabo la fabricación de un material compuesto por medio de infusión de resina.
- Obtener y estudiar experimentalmente los laminados de material compuesto, por medio de ensayos a tensión.
- Comparar las propiedades mecánicas del compuesto contra materiales convencionales que se utilizan en aplicaciones biomédicas.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Los materiales compuestos han evolucionado a tal punto que en el área médica se han implementado con el fin de igualar o mejorar las cualidades del cuerpo humano y garantizar una mejor calidad de vida. Dichos materiales poseen grandes propiedades mecánicas que llegan a superar las resistencias mecánicas de los materiales convencionales; para ello se demostrarán las ventajas de un laminado compuesto por fibra de vidrio con matriz polimérica implementado el método de infusión de resina, comparando a su vez las propiedades mecánicas obtenidas con materiales del mismo grado de resistencia, y así comprobar que los materiales compuestos pueden ser sustitutos de materiales naturales para este tipo de aplicación.

CAPÍTULO II:

Fundamentos Teóricos

2.1 INTRODUCCIÓN

Un material compuesto se realiza mediante la combinación de dos o más materiales, para dar una combinación única de propiedades. La definición anterior es más general y puede incluir aleaciones de metales, polímeros, minerales y madera. Los materiales compuestos reforzados con fibras difieren de los materiales anteriores, en que los materiales constituyentes son diferentes en el nivel molecular y son mecánicamente separables. Los materiales compuestos trabajan juntos, pero permanecen en sus formas originales. Las propiedades finales de los materiales compuestos, son mejores que las propiedades de los materiales constituyentes.

El concepto de los materiales compuestos no fue inventado por los seres humanos; estos se encuentran en la naturaleza. Un ejemplo es la madera, que es un compuesto de fibras de celulosa en una matriz de pegamento natural llamado lignina. La cáscara de los invertebrados, como caracoles y ostras, es ejemplo de un compuesto. Estas cáscaras son más fuertes y más resistentes que algunos materiales compuestos avanzados hechos por el hombre. Los científicos han encontrado que las fibras tomadas de una tela de araña son más fuertes que las fibras sintéticas. En la India, Grecia, y otros países, las cáscaras o pajuelas mezcladas con arcilla se han utilizado para construir casas durante varios cientos de años. La cascarilla o aserrín en una arcilla es un ejemplo de un material compuesto de partículas y la mezcla de pajas en una arcilla es un ejemplo de un corto compuesto de fibra, estos refuerzos se realizan para mejorar la durabilidad. La idea principal de un material compuesto es que contiene materiales de matriz. Típicamente un material compuesto está formado por fibras de refuerzo en una resina de matriz. Los refuerzos pueden ser fibras, partículas, y los materiales de la matriz pueden ser metales, plásticos, o cerámicos (Mazumdar, 2002).

2.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Entre los materiales compuestos se ha tenido especial interés por el tipo laminado, el cual presenta una alta rigidez en flexión y elevadas relaciones de resistencia contra peso. Este tipo de materiales son muy utilizados en la fabricación de equipos deportivos, componentes de aviones, tuberías para la industria petrolera y tanques de almacenaje de combustibles y agua (García, 2007).

Los compuestos tradicionales son elaborados por capas de distintas fibras y son reforzados con distintos tipos de resina. La matriz (resina) es el único material que absorbe los esfuerzos interlaminares a la separación entre estas capas y se le conoce como delaminación, que es un modo de falla bastante frecuente. Los textiles surgen al estudiar la posibilidad de colocar fibras en dirección transversal, para evitar la delaminación. Los compuestos textiles se basan en cocer las capas de refuerzo con las fibras en sentido transversal, lo que proporciona a los compuestos una mayor tolerancia a la presencia de un daño por delaminación.

2.2.1 Compuestos fibrosos (Refuerzos)

Uno de los principales componentes a considerar, son los compuestos fibrosos, que son fibras tejidas en preformas completas, para después ser impregnadas por resinas, mediante procesos de infusión (Hernández Moreno, 2002). Este refuerzo es una fibra con una relación longitud-diámetro muy alta. Las fibras pueden ser continuas o discontinuas, estas últimas pueden ser aleatorias o unidireccionales (Figura 2.1).

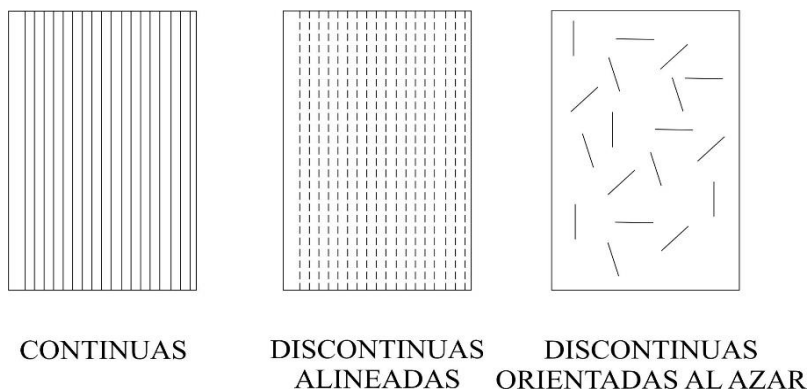


Figura 2.1. Comparación de orientación de las fibras.

Las fibras constituyen el refuerzo del compuesto, aportando rigidez y resistencia. Los tipos de fibra más comunes son; vidrio, carbono y orgánica.

- Fibra de vidrio: Es uno de los refuerzos más utilizados en la fabricación de materiales compuestos en aplicaciones industriales, debido a su alta disponibilidad, bajo costo y sus buenas propiedades mecánicas (García, 2007). Estas se clasifican; Vidrio-E, para aplicaciones generales.
Vidrio-S, para mayor resistencia y rigidez.
Vidrio-C, para estabilidad química.
Vidrio-M, para una alta rigidez.
Vidrio-D, para una baja constante dieléctrica.
- Fibra de carbono: Este tipo de fibra, posee propiedades muy características como, alta flexibilidad, alta resistencia, bajo peso, tolerancia a altas temperaturas y baja expansión térmica. Estas características la hacen muy popular en la industria aeroespacial, ingeniería civil, aplicaciones militares, deportes entre otras. Sin embargo, son relativamente costosas en comparación con las fibras similares, tales como fibras de vidrio o fibras de plástico.
- Fibra orgánica: Esta fibra se obtiene a partir de poliamidas aromáticas, una de las más conocidas es el Kevlar®. Un material formado con una combinación única de alta dureza, alto módulo de resistencia y estabilidad térmica (DuPont, 2017).

2.2.2 Matrices

Los materiales compuestos están conformados por matrices poliméricas, estas se derivan en dos tipos de polímeros; termoestables y termoplásticos. Las resinas termoestables son aquellas que cambian irreversiblemente bajo la influencia de calor y agentes químicos, pasando de un material fusible y soluble a otro no fusible e insoluble.

El proceso de endurecimiento de una resina se denomina reticulación; durante este proceso en las resinas termoestables, se forman cadenas tridimensionales entrelazadas entre sí, por lo que las moléculas no son flexibles, y por lo tanto no se pueden fundir, ni remodelar para volver al estado original de la resina. Cuál mayor sea el número de cadenas tridimensionales entrelazadas, mayor será la rigidez del producto final, y también mayor será la temperatura de transición vítrea del mismo. Por esa razón, es importante procurar trabajar con temperaturas adecuadas cuando se manipulan resinas termoestables.

Tipos de resinas termoestables

Tabla 2.1

Propiedades de resinas termoestables más comunes

Material Resina	Densidad (g/cm ³)	Módulo de Young Gpa	Resistencia a la tracción MPa
Epoxi	1.2-1.3	2.7 -4.1	50-130
Ester Vinílico	1.1-1.3	3.0 – 3.5	73-81
Poliéster	1.1-1.4	2.1 – 4.1	35-103

Fuente: (Escudero López, 2001).

Resinas Poliéster

Las resinas de tipo poliéster son de bajo costo y ofrecen una excelente resistencia a la corrosión. El curado de una resina poliéster es menor al de una resina epóxica. Su gran versatilidad demuestra que pueden ser resinas termoestables o termoplásticas. Ampliamente son utilizadas en procesos de manufactura como pultrusión, devanado de filamentos y moldeo por transferencia de resina.

El curado de una resina poliéster, comienza al mezclar un endurecedor, creando una red de moléculas tridimensionales y resultando en un sólido, que ofrece una alta resistencia química y a la corrosión. La temperatura de transición vítrea de este tipo de resinas es de los mayores, aportando un buen rendimiento de temperaturas hasta 80-100 °C (Mazumdar, 2002).

Resinas Viniléster

La resina de tipo viniléster se encuentra en el grupo de los materiales orgánicos, la cual se caracteriza por poseer una red tridimensional completa formada por cadenas cruzadas. Este tipo de resina es altamente resistente a la fatiga, baja viscosidad y resistente al fuego (Garcia, 2007).

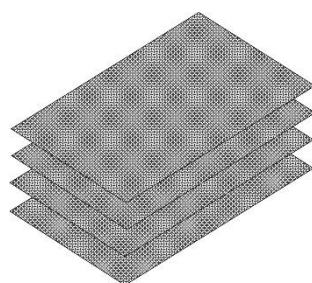
Resina Epoxi

Este tipo de resina es muy versátil, ya que posee una amplia gama de propiedades y distintas funciones de procesamiento. Muestra un bajo encogimiento y una excelente adhesión a una gran variedad de superficies de materiales. Los epoxis son ampliamente utilizados, desde aplicaciones aeroespaciales hasta artículos deportivos. Cambiando la formulación de éste, el tiempo de curado puede ser modificado, la temperatura del proceso requerida puede ser modificada, la duración del ciclo puede ser modificado, la dureza, entre otras más.

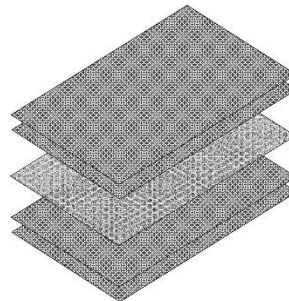
Los epoxis pueden resistir temperaturas de 90°C a 120°C, como también existen distintos epoxis que soportan temperaturas de 200°C, entre más temperatura y más desempeño se requiera, los costos aumentan. Estos vienen en formas líquidas, sólidas, y semi sólidas. Para los procesos de infusión de resina, son utilizados en estado líquido (Mazumdar, 2002).

2.2.3 Tipos de compuestos estructurales

La combinación de materiales compuestos y materiales homogéneos, se clasifican en dos tipos de compuestos estructurales que son; materiales laminados (constituidos por apilamiento de láminas) y paneles tipo sándwich (compuestos de un núcleo y tapas) (Figura 2.2).



LAMINADO



ESTRUCTURA SANDWICH

Figura 2.2. Comparación de compuesto laminado vs compuesto tipo sándwich.

Al desarrollar un material compuesto, se debe poseer una buena comprensión del comportamiento del compuesto, como también un buen conocimiento de los tipos de fibras y los materiales de matriz. Estas funciones importantes de fibras y materiales de matriz se discuten a continuación.

Las funciones principales de las fibras en un material compuesto son;

- Para realizar la carga en un material compuesto estructural, el 70 a 90 % de la carga se realiza por fibras.
- Para proporcionar rigidez, resistencia, estabilidad térmica, y otras. Estas dependen del modelo estructural del compuesto.
- Para proporcionar la conductividad eléctrica o aislamiento. Depende del tipo de fibra utilizada.

Las funciones principales de un material de matriz incluyen las siguientes;

- El material de la matriz se une a las fibras entre sí y la carga se transfiere a las fibras. Se proporciona rigidez y forma a la estructura.
- La matriz aísla las fibras de modo que las fibras individuales pueden actuar separadamente. Esto detiene o retarda la propagación de una grieta.
- Dependiendo del material de la matriz seleccionada, el rendimiento también está influenciado por características tales como ductilidad, resistencia al impacto, etc.
- Una matriz dúctil aumentará la tenacidad de la estructura. Para mayor tenacidad en el compuesto, se recomiendan compuestos a base de termoplásticos.

2.3 MÉTODOS DE FABRICACIÓN

En la actualidad existe una gran variedad de materiales compuestos, con distintos métodos de fabricación, que son utilizados actualmente en la industria, entre estos se encuentra el laminado manual uno de los más antiguos, posteriormente se desarrollaron otras técnicas de manufactura tales como, moldeado por compresión, embolsado en vacío, devanado de filamentos, moldeado por transferencia de resina y método de infusión de resina.

2.3.1 Laminado Manual

Es el método de moldeo abierto más sencillo y más antiguo de los procesos de fabricación de compuestos. Se trata de un método de trabajo intensivo, porque involucra un impregnado manual de fibras reforzadas con resina.

Esta fibra de vidrio u otro material utilizado para refuerzo, se coloca manualmente en el molde abierto, y la resina se vierte, mientras se disperse con una brocha sobre la colchoneta. Este aire atrapado que se genera dentro de la colchoneta se retira manualmente haciendo uso de un rodillo para finalizar la estructura del laminado. Las resinas termoestables son las más utilizadas para el método de laminado manual, ya que el curado se inicia mediante un catalizador en el sistema de resina, que este endurece la resina sin la necesidad de calor externo (Dorworth, Gardiner, & Mellema, 2009).

Ventajas

- No hay límite de dimensión de pieza que se desea fabricar.
- Bajo costo de materia prima.
- Sencillo uso de equipo.
- Método ideal para piezas de gran tamaño y para producciones cortas.
- Se puede emplear en todo tipo de refuerzos y resinas.
- No requiere de procesos térmicos posteriores.

Desventajas

- Los laminados son de calidad irregular.
- Los refuerzos son de bajo porcentaje.
- Bastante mano de obra.
- La producción es baja debido al proceso artesanal.

2.3.2 Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es un proceso de fabricación que utiliza un molde macho y un molde hembra. El tejido de refuerzo se humedece con una matriz o un material previamente impregnado. Se coloca en el molde hembra y un molde macho se utiliza para formar el perfil de la pieza. Si se utiliza un material de núcleo, el tejido se envuelve alrededor del núcleo de la forma deseada. Una vez más, las dos partes de los moldes se utilizan para aplicar presión y dar a la parte su forma final (Figura 2.3).

Estos tipos de moldes frecuentemente están equipados con la facilidad de curar laminados rápidamente a una temperatura específica, ya sea por componentes calientes o la circulación de aceite calentado a través del molde. Debido a las altas presiones y un curado rápido, este sistema es ideal para una producción de alta calidad y para un proceso de manufactura de alto volumen de "Clase-A", como la carrocería de los autos en la industria automotriz (Wanberg, 2010).

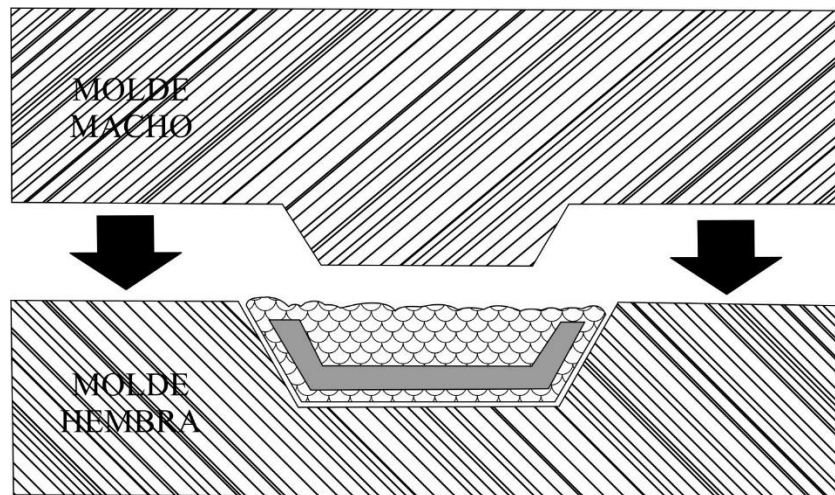


Figura 2.3. Moldeo por compresión

2.3.3 Embolsado en vacío

La función principal de esta técnica de embolsado de vacío es proporcionar presión e integración de las capas dentro del laminado. Con esta técnica, el objeto que está por ser curado se coloca en una bolsa de plástico y el aire es succionado por una fuente de vacío. Cuando se evacúa el aire, se aplica presión al componente de la atmósfera circundante. Una buena fuente de

vacío para materiales compuestos retira aproximadamente 29.9 pulgadas de Hg a nivel del mar, lo que resulta cerca de 14.7 libras por pulgada cuadrada de presión se aplican a la superficie. La técnica de la bolsa de vacío se puede utilizar en combinación con los moldes. Este método aplica una presión muy uniforme de formas un tanto complicadas y con capacidad moderadamente en objetos grandes. El embolsado en vacío es el método más comúnmente utilizado para aplicar presión para reparaciones de materiales compuestos (Figura 2.4), (Dorworth et al., 2009).

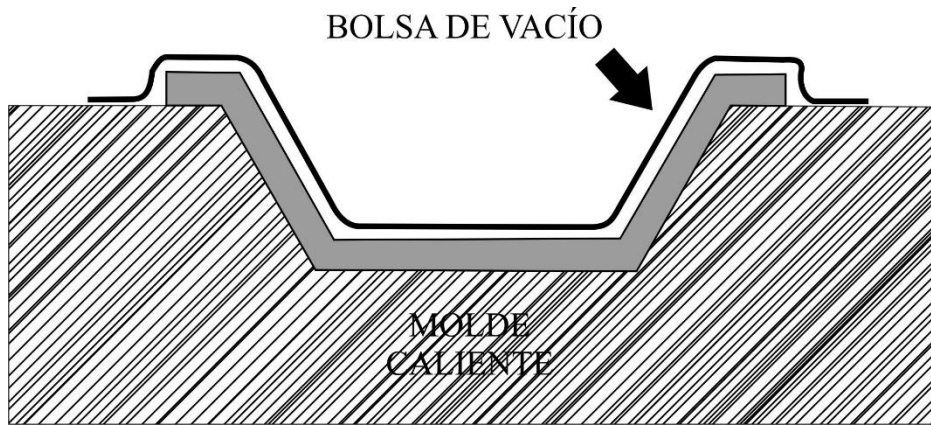


Figura 2.4. Moldeo por embolsado en vacío.

2.3.4 Devanado de filamentos

Este método de manufactura es uno de los más antiguos y fue originalmente inventado para fabricar revestimientos de misiles. Este proceso es ampliamente utilizado por su rentabilidad de fabricación, que incluyen materiales de bajo costo, precisión, automatización y repetibilidad.

Este proceso consta de que una fibra de refuerzo se enrolla como un hilo continuo alrededor de un mandril de la forma deseada. Con el fin de proporcionar la precisión requerida en la colocación de este hilo (Figura 2.5).

Algunos devanados de filamentos utilizan hilos previamente impregnados, mientras que otros sumergen los hilos en un baño de resina, y hacen uso de un área de secado para secar la resina extra. Una vez que el filamento se ha enrollado en el patrón deseado, la mezcla de material compuesto se cura. Usualmente la pieza se embolsa al vacío y se cura en autoclave para compactar más las fibras. Después del curado el eje se queda en la misma posición. En ocasiones

el tejido se encuentra envuelta alrededor del eje seco sin ninguna resina, es entonces cuando se utiliza como base para otra forma de fabricación, tales como el moldeo por transferencia de resina RTM (Dorworth et al., 2009).

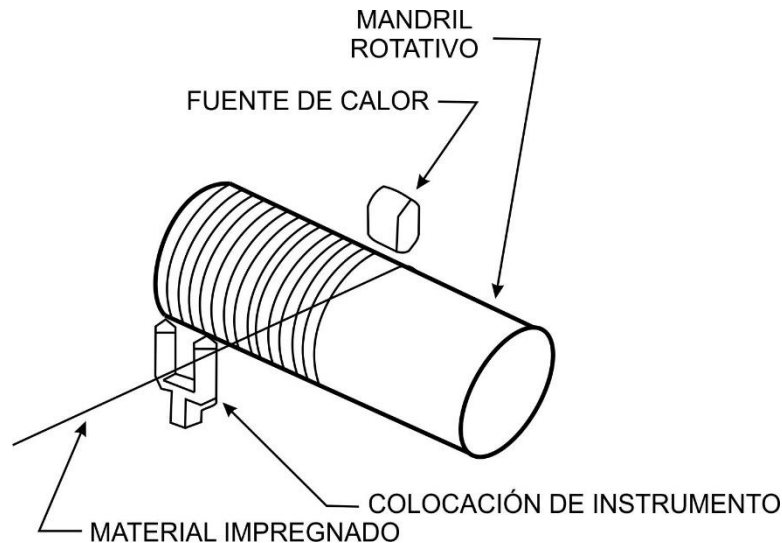


Figura 2.5. Básico devanado de filamentos.

2.3.5 Moldeo por transferencia de resina

El proceso de moldeo por transferencia de resina es también conocido como moldeo por transferencia líquida. Es un proceso que combina un material seco fibroso de refuerzo o de la mezcla de materiales, generalmente referido como una “preforma”, con resina líquida durante el proceso de moldeo, con lo que los materiales combinados se curan para producir un componente de 3 dimensiones.

RTM es un término que se aplica ampliamente para describir un número de variaciones de este enfoque general de fabricación. El RTM convencional emplea herramientas de cerrado “duro”, similar al moldeo por inyección, la cual encierra completamente la preforma y controla con precisión todas las superficies del componente de una variación (Figura 2.6). En los procesos de RTM convencional asistida por vacío (VARTM), emplea útil una sola cara, teniendo enfoque en esta misma con una barrera de película flexible (bolsa de vacío) para definir la superficie. Del mismo modo algunas variaciones pueden definir libremente la preforma como formas de simples capas que se colocan sobre la superficie de la herramienta de moldeo con respecto a la

orientación o el control de ubicación, mientras que otros emplean materiales adicionales, herramientas y se aplican pasos de proceso para controlar con precisión estas características de la preforma (Mazumdar, 2002).

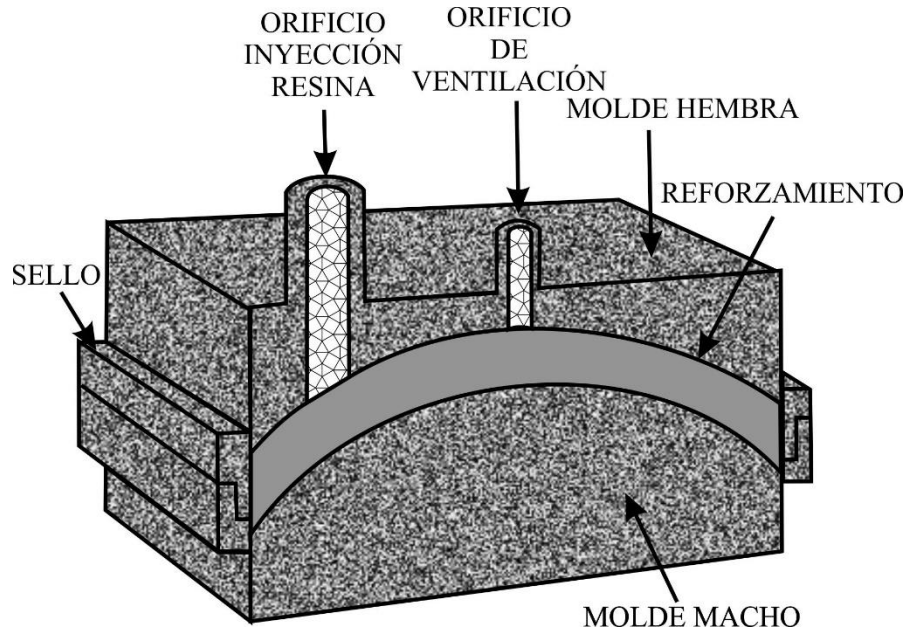


Figura 2.6. Moldeo por transferencia de resina.

Ventajas

- Buen acabado superficial en ambas caras.
- Los laminados poseen buenas propiedades mecánicas.
- Mayor control durante el proceso.
- Reducción de pérdidas de material.
- Reducción de Compuestos Volátiles Orgánicos (VOC), debido al proceso cerrado.

Desventajas

- Alto costo en equipos, esencialmente en moldes.
- Moldes específicamente para este tipo de proceso.
- Mecanismos de control de temperatura, aumentan considerablemente el costo.

2.3.6 Infusión de resina

La infusión de resina es un proceso más limpio y más preciso que el laminado húmedo, debido a que todos los refuerzos se colocan en seco, y la resina se introduce en el embolsado de vacío a través de la tubería, utilizando la presión de vacío y curado. (Esto también se le llama infusión por vacío). El refuerzo de fibra seca de “preforma” se coloca en el molde (ya sea con o sin una capa de revestimiento de superficie), después se coloca una serie de tuberías de vacío o canales donde se suministra la resina en la parte trasera de la bandeja. Una bolsa de vacío se instala sobre todo el conjunto (Figura 2.7).

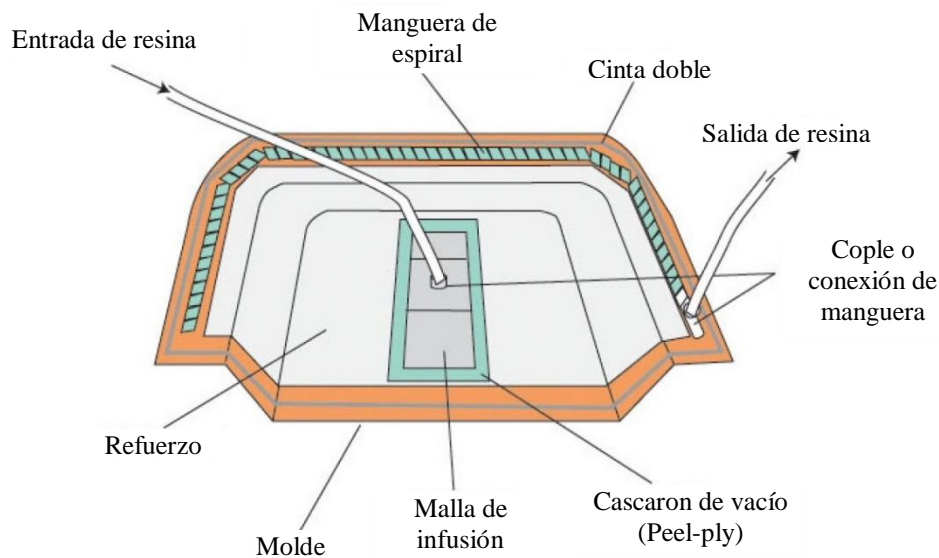


Figura 2.7. Método por infusión de resina.
Fuente: (Performance Composites Inc., n.d.)

El vacío es extraído de la bolsa, la preforma es compactada en su lugar antes de que la resina penetre en el laminado. El proceso se basa en la dinámica de fluidos, donde el flujo de la resina se impone por el diferencial de baja presión creada bajo la bolsa. La resina fluirá hasta que el equilibrio de presión se obtenga debajo de la bolsa. La distancia que fluirá la resina se determina por la cantidad de presión disponible (cantidad de vacío), la viscosidad de la resina, y la permeabilidad de la preforma de fibra. Múltiples entradas de resina suelen instalarse en ubicaciones seleccionadas para permitir infusión de piezas de mayor tamaño. Como regla general, no más de 30 pulgadas se debe intentar entre las entradas con capacidades llenas de infusión de vacío.

El proceso de infusión de resina provee propiedades de laminado bastante consistentes con volúmenes de fibra hasta un 70 por ciento. Al iniciar el método de infusión de resina no se encuentra ningún reactivo presente, hasta que es mezclada la resina con el catalizador, antes de ese proceso el tiempo para el montaje y la instalación de la "Preforma" en el molde no está limitado en comparación al molde abierto de bandeja húmeda también conocido como laminado manual. Esto permite un control más preciso de la colocación de material y orientación de las fibras. La cantidad de desperdicio con este proceso también se reduce al mínimo y los compuestos orgánicos volátiles (VOC) pueden ser contenidos mejor (Dorworth et al., 2009).

Ventajas

- Piezas laminadas con buenas propiedades mecánicas. La calidad tiene menor dependencia del operario.
- Reducción de emisiones al ambiente, causando un ambiente cómodo de trabajo.
- Bajo costo de moldes y reutilizable en un proceso abierto.
- Menor tiempo de fabricación.
- Ahorro y control de materia prima.
- No hay límite en la dimensión de la pieza.

Desventajas

- Se requiere un equipo de vacío.
- Las resinas utilizadas deben poseer una menor viscosidad.
- El proceso puede ser afectado por condiciones del medio ambiente.
- El acabado superficial es por una de las ambas caras.
- El proceso no es rentable para una baja producción de piezas pequeñas.

Tabla 2.2

Tabla comparativa de métodos de fabricación de materiales compuestos

Métodos de Fabricación Características	Laminado Manual	Moldeo por Compresión	Embolsado en Vacío	Devanado de Filamentos	Moldeo por Transferencia de Resina	Infusión de Resina
Uso sencillo de equipo	X	-	-	-	-	-
Bajo Costo de Materia prima	X	-	-	-	-	X
Sin límite de dimensión	X	-	-	X	-	-
Laminados de alta calidad	-	-	X	-	X	X
Refuerzos de alto porcentaje	-	X	X	X	-	X
Alta producción	-	X	X	X	X	-
Baja ventilación de trabajo	-	X	-	-	X	X
Corto tiempo de fabricación	-	X	-	X	X	X

2.4 MÉTODO DE ENSAYO DE TENSION ASTM D 3039

Este método determina las propiedades a tensión de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de alto modulo. Las formas del material compuesto son limitadas a fibras continuas o fibras compuestas reforzadas discontinuas en el que el laminado esta balanceado simétricamente respecto a la dirección de la prueba.

El método de ensayo consta de una delgada tira de material compuesto, una sección rectangular transversal constante es montada en las mordazas de la máquina de tensión y es monotónicamente cargada a tensión mientras registra la carga. El esfuerzo último del material puede determinarse desde la última carga máxima soportada antes del fallo. Si la prueba de muestreo es monitoreada con convertidores de esfuerzo o desplazamiento, entonces el comportamiento de esfuerzo-deformación del material puede ser determinado, desde el cual el esfuerzo último, módulo de elasticidad, el rango de Poisson's, y la transición de esfuerzo pueden ser derivadas.

Tabla 2.3

Recomendaciones de la muestra geométrica de tensión

Orientación de la fibra	Ancho (mm)	Largo completo (mm)	Grosor (mm)	Largo de pestaña (mm)	Grosor de pestaña (mm)	Angulo oblicuo de pestaña
0° unidireccional	15	250	1.0	56	1.5	7 o 90
90° unidireccional	25	175	2.0	25	1.5	90
Balaceado y simétrico	25	250	2.5	Tela esmerilada	-	-
Aleatorio discontinuo	25	250	2.5	Tela esmerilada	-	-

Fuente: (ASTM International, 2002).

Este método está diseñado para generar información de propiedades y características, investigación, desarrollo, calidad, diseño y análisis estructural de materiales a tensión. Los factores que influyen la respuesta de tensión y por lo tanto debería de contener lo siguiente: material, métodos del material, preparación y colocación, secuencia, alineación y sujeción, velocidad de prueba, tiempo y temperatura. Se pueden obtener las siguientes propiedades en dirección del ensayo. Las propiedades en dirección del ensayo pueden ser obtenidas en por este método y son los siguientes: El esfuerzo último, la resistencia a la ruptura, módulo de elasticidad, la relación de Poisson's y el esfuerzo de transición (ASTM International, 2002).

CAPÍTULO III:

Metodología (Fabricación Experimental)

3.1 INTRODUCCIÓN

La metodología del proceso de laminación por infusión de resina, se emplea principalmente en piezas de alta calidad. La pieza que se pretende fabricar requiere de un molde plano, en el cual se colocan capas de fibra (en este caso de vidrio) sobre el mismo, luego la resina de poliéster es transferida al laminado mediante una diferencia de presión. Para realizar el proceso por infusión de resina es necesario hacer uso de materiales no reutilizables, tales como, bolsa de aislamiento, tejido pelable, tubería de PVC, y malla de infusión como se aprecia en los diagramas de las secciones 3.2 y 3.3. Los materiales de mayor importancia como la resina y la fibra, es necesario conocer su permeabilidad, porosidad, viscosidad de la resina y tiempo de secado.

La elección de resina es fundamental por lo cual se debe de utilizar una resina tipo polylite® por la que sus propiedades permiten su facilidad de adaptabilidad para este proceso de manufactura, permitiendo un tiempo de trabajo de 30 minutos y una viscosidad menor que 400 Cp's (Tabla 3.2).

3.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE INFUSION DE RESINA

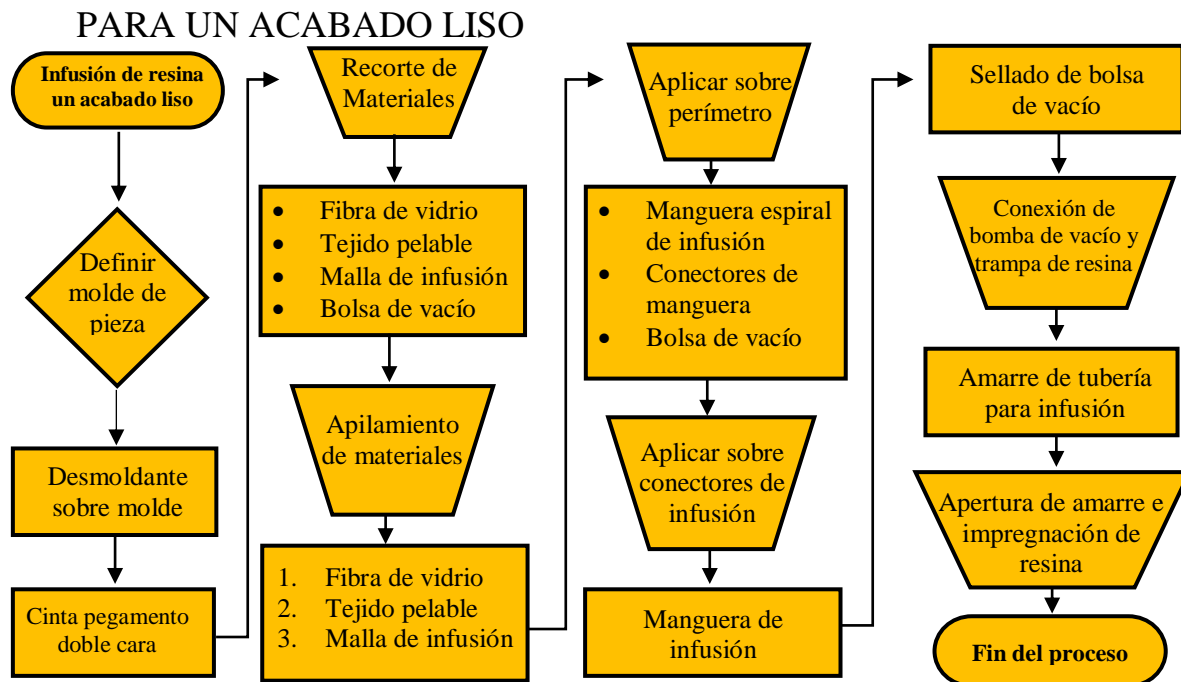


Figura 3.1. Diagrama del proceso de infusión de resina para un acabado liso.

3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE INFUSION DE RESINA PARA DOBLE ACABADO LISO

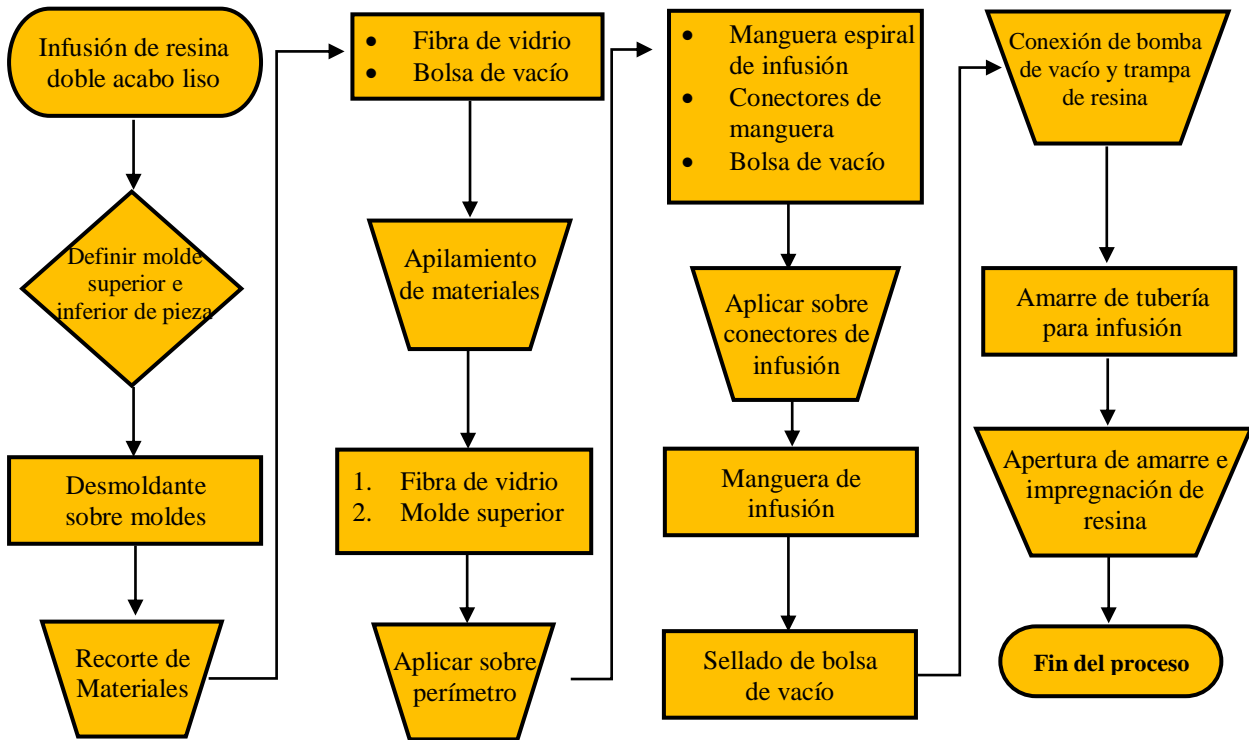


Figura 3.2. Diagrama del proceso de infusión de resina para doble acabado liso.

3.4 EQUIPO PARA EL PROCESO DE INFUSIÓN DE RESINA

El proceso de infusión de resina consta de varios componentes, tanto materiales reutilizables como no reutilizables. Este proceso inicia a transferir resina desde el recipiente de resina, pasa sobre las tuberías espirales ayudando a distribuir la resina que a su vez impregna el refuerzo de fibra de vidrio, esta sale por el segundo conector llegando al depósito o trampa, para que esta no llegue a la bomba de vacío (Figura 3.3).

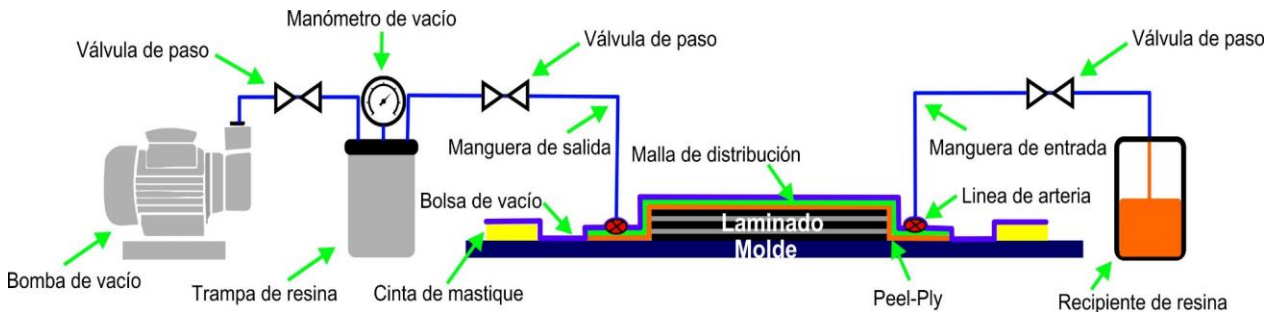


Figura 3.3. Mapa del proceso de infusión de resina.

A continuación, se enlista el equipo necesario para llevar a cabo el método de infusión de resina apropiadamente, los materiales deben de ser tal cuales, ya que, de no ser así, este método no se logrará con éxito.

Bomba de vacío: Diseñada para ofrecer niveles muy altos de vacío (99.995%) para períodos prolongados, el cual se requiere con frecuencia en los procesos de materiales compuestos por infusión, esta bomba de vacío portátil (Figura 3.4) ofrece alto rendimiento para este tipo de aplicaciones.



Figura 3.4.- Bomba de vacío entregada por el fabricante.

Tabla 3.1

Propiedades de bomba de vacío

Especificaciones	
Modelo	15500
Desplazamiento libre de aire	141.6 l/min
Vacío Final	99.995%
Motor	1/3 HP
Voltaje	115V/60Hz
Energía	185w
Peso	10.88kg
Dimensiones	336mm x 140mm x 241mm

Referencia: (Bosch Automotive, 2014)

Esta bomba es ideal para casi cualquier proceso de vacío a compuestos, incluyendo:

- Bolsas de vacío.
- Infusión de resina.
- Moldeo por Transferencia de Resina (RTM).
- Vacío presionando (paneles tipo sándwich).
- Recubrimientos.
- Resinas de desgasificación al vacío y siliconas.

Resina PolyLite®: Esta resina de poliéster de alto rendimiento ha sido específicamente formulada para su uso en materiales compuestos de resina.

Tabla 3.2

Propiedades físicas y propiedades mecánicas de la resina de poliéster.

Propiedades	Unidades	Especificaciones
Material	Resina Poliéster (no saturada)	-
Apariencia	-	Líquido Café Transparente
Viscosidad Brookfield	Cp's	300-400
Tiempo de Gel*	Minutos	15-18
Estabilidad a 105°C	Horas	4
Tiempo de Vida mínimo en Almacenamiento	Meses	3
Resistencia a la tensión	Psi	22 882.6
Módulo de tensión	kPsi	1 411.8
Resistencia a la flexión	Psi	40 198.3
Módulo de flexión	kPsi	1 405.5
Elongación hasta ruptura	%	2.2

Nota. Resina Líquida @ 25°C

¹Postcurado: 24 horas a temperatura ambiente, y 2 horas a 120°C

²Construcción del laminado: relación resina/fibra de vidrio (colchoneta de 450 g/m²)

Fuente: (Reichhold, 2010)

La resina de poliéster posee muy baja viscosidad asegurando penetrar rápidamente a través de una serie de refuerzos (Figura 3.5). Su excelente resistencia mecánica hace que sea ideal para su uso con refuerzos de alto rendimiento, tales como la fibra de vidrio, fibra de carbono y aramidas como el Kevlar®.



Figura 3.5.- Resina Poliéster.

Manguera de Vacío PVC: Esta manguera es adecuada para el transporte de resina y vacío en las conexiones del método de infusión de resina (Figura 3.6), estas conexiones tienden a llenarse de resina por lo que es conveniente desecharlas después de su uso. La manguera de aspiración de PVC debe estar conectada a través de la bolsa, bomba de vacío y otros componentes. Esta manguera de PVC tiende a suavizarse a altas temperaturas.



Figura 3.6.- Tubería de PVC para aspiración de resina.

Película de embolsado de vacío: Alto rendimiento al vacío adecuado para su uso en todas las aplicaciones de materiales compuestos de bolsa de vacío, incluyendo bolsas de vacío convencional, infusión de resina y pre-impregnado (Figura 3.7). Posee características mecánicas de soportar una temperatura hasta 204 °C y una resistencia a la tracción de 55 MPa.



Figura 3.7 - Película transparente para el embolsado en vacío.

Cinta selladora para bolsa de vacío (alta temperatura): Esta cinta es comúnmente utilizada para crear sellos fuertemente adheribles entre la película de embolsado de vacío (Figura 3.8). Además, es adecuada para su uso a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas de hasta 150 °C.



Figura 3.8.- Adhesivo en forma de cinta selladora de alta temperatura.

Cascaron de vacío (Peel Ply): Cáscara de nylon para embolsado de vacío, es adecuado para la amplia gama de materiales compuestos incluyendo aplicaciones para el embolsado de vacío. El (Peel ply) se utiliza como la primera barrera entre el compuesto y el resto de la bolsa de vacío. Está cubierta provisional no se unirá al material compuesto y puede ser removida después de que el producto haya curado, con el propósito de proporcionar una superficie con textura perfecta (Figura 3.9).

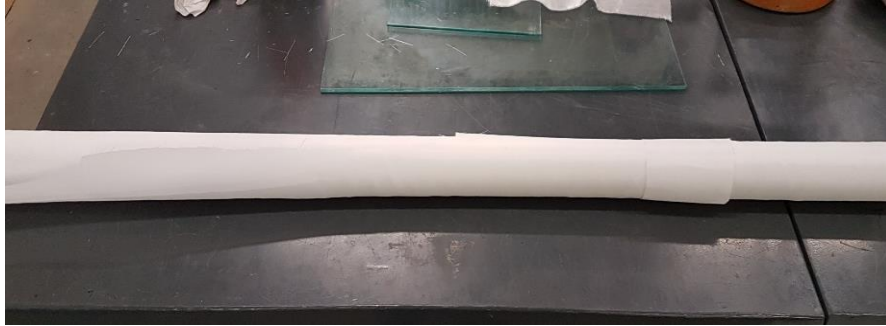


Figura 3.9.- Cascaron de vacío.

Malla de infusión: La principal aplicación de la malla de infusión es la distribución de resina a través de la misma sobre todo el laminado. La malla es un patrón tipo “Cross-Cross” de plástico flexible (Figura 3.10), permite garantizar alcance en todas las partes de la pieza que se pretenda laminar. Esta malla de infusión también se puede utilizar selectivamente para aumentar el flujo de resina a ciertas áreas del molde y aumentar la velocidad de dispersión. Este material es no re-utilizable, considerándose un consumible desechable en el proceso de infusión.



Figura 3.10.- Malla de infusión para la distribución de resina.

Tabla 3.4

Propiedades de malla de infusión.

Propiedades	Descripción
Material	Polipropileno
Fabricación	Envoltura de tejido
Dimensiones (Ancho)	1.4 m (55")
Dimensiones	140 g/m ³

Fuente: (Easy Composites, 2015).

Espiral de infusión: Es un tubo de plástico en forma de espiral seccionado en diagonal, lo que facilita el flujo de resina desde la fuente de alimentación de resina hasta el contorno del molde (Figura 3.11). Esta tubería de tipo caracol tiene un diámetro de 5mm y su uso es recomendado para pequeños y medianos proyectos de infusión (límite del tamaño de un capó de un automóvil). Al igual que la malla de infusión, el tubo de espiral no puede ser reutilizado una vez que la resina haya recorrido a través de él y por lo tanto debe considerarse como un desechable del proceso.



Figura 3.11.- Tubería en espiral utilizada para permitir un mayor flujo de resina.

Conector de silicona/aluminio: El material con el que este fabricado el conector, permite al componente reutilizarlo en el proceso de infusión de resina. Este conector se coloca dentro de la bolsa de vacío y admite la manguera del vacío. En la parte inferior del conector hay un

distribuidor de 4 canales que asegura un buen conducto de aire para la línea de vacío en el proyecto y/o un buen flujo de resina en la espiral de infusión (Figura 3.12).



Figura 3.12.- Conectores de aluminio para el proceso de infusión de resina.

Líneas de amarre: Las líneas son de acero inoxidable y son utilizadas para el amarre de las mangueras de vacío y las mangueras de alimentación de resina, permaneciendo cerradas durante ciertas partes del proceso (Figura 3.13).



Figura 3.13.- Amarre de acero inoxidable para líneas de infusión de resina.

Depósito de infusión de resina: El depósito o trampa de resina se fabrica a partir de un tubo de acero con 2mm de espesor y base, con recubrimiento de pintura polvo para un acabado resistente a prueba de químicos. Cuenta con una tapa cortada a láser de 10 mm de acrílico transparente (para permitir una buena visibilidad en la olla), soportes de goma anti-derrapante, un sello positivo de caucho de silicona de alta resistencia, manómetro de vacío y conexiones de las

líneas de vacío (Figura 3.14). El depósito está diseñado para colocar un recipiente de plástico o papel, que se puedan sustituir con facilidad, para evitar cualquier derrame sobre las paredes del interior.



Figura 3.14.- Depósito o trampa de resina con manómetro de vacío.

Cera desmoldante: Es una pasta cerosa diseñada para lograr una fácil y uniforme desprendimiento de moldes, de secado rápido y fácil de pulir (Figura 3.15).



Figura 3.15.- Cera Desmoldante.

Petatillo de fibra de vidrio: Esta fibra de vidrio es una tela de construcción pesada diseñada para reforzar laminados estándar en aplicaciones de moldeo y tanto compatible con resinas de poliéster como viniléster (Figura 3.16). Estas fibras están orientadas a 0°/90° en un solo plano y son fabricadas con Vidrio Tipo E.

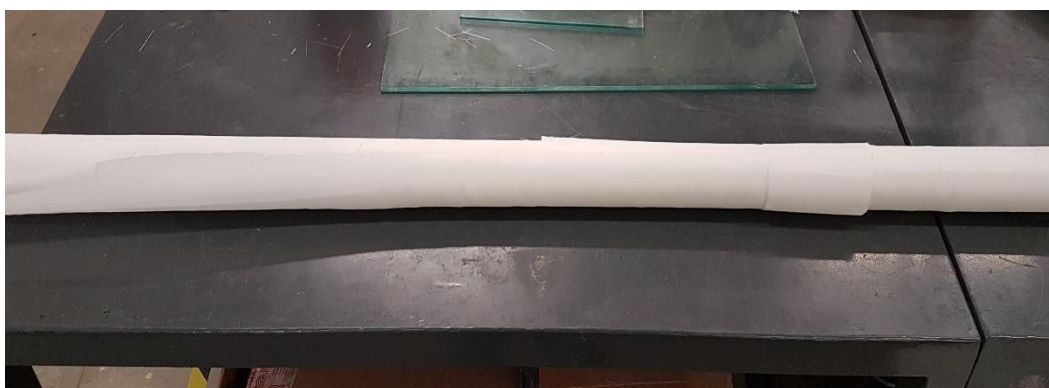


Figura 3.16.- Petatillo de fibra de vidrio (woven roving).

Tabla 3.5

Propiedades petatillo de fibra de vidrio.

Propiedades	Valores	Unidades
Ancho Estándar	125	centímetros
Peso Nominal Estándar	350	gm/m^2
Distribución Uniformidad de peso ^{1 2}	175/175	gm/m^2

Nota. (1) Uniformidad de peso a 0°. (2) Uniformidad de peso a 90°. *Fuente:* (Owens Corning, 2003).

Colchoneta de fibra de vidrio: En particular esta fibra de vidrio es conocida como colchoneta de fibra de vidrio de hilo cortado M710A (Figura 3.17). Esta colchoneta está conformada por una pequeña cantidad de aglutinante de poliéster, permitiendo ser compatible con sistemas de resinas de poliéster, estas fibras están orientadas en forma multidireccional en un solo plano.



Figura 3.17.- Tela de fibra de vidrio M710A.

Tabla 3.6

Propiedades colchoneta de fibra de vidrio de hilo cortado M710A.

Propiedades	Valores	Unidades
Ancho Estándar	127	centímetros
Peso Nominal Estándar	450	gm/m^2
Distribución Uniformidad de peso ¹	45	$g/0.1m^2$

Nota. (1) El peso del Mat incluye vidrio y aglutinante. *Fuente:* (Owens Corning, 2010)

3.5 FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

El método de infusión de resina es una técnica que conlleva una serie de pasos continuos con el objetivo de transportar la resina por medio de una bomba de vacío para formar un laminado a partir de dos materiales. Esta serie de pasos permite tener un área de trabajo ordenado, limpio, y seguro, para lograr identificar fácilmente las dificultades que se pudieran generar en el sistema.

Tijuana como ciudad fronteriza de Estados Unidos un país con alto índice de desarrollo de materiales compuestos, permiten tener mayor facilidad de adquirir estos tipos de materiales específicos. Sin embargo, uno de los objetivos del método de fabricación es tener la posibilidad de adquirir estos tipos de materiales con facilidad en gran parte de la república mexicana. A continuación, se describen una serie de pasos a seguir, para llevar a cabo este método de fabricación.

3.5.1 PASOS A SEGUIR UTILIZANDO EL DIGRAMA 3.2

Paso No.1 Se define el molde necesario para la pieza que se pretende fabricar, este molde debe ser rígido y poseer un acabado superficial liso y brillante, de esto modo se puede determinar el volumen de material que será necesario para la fabricación del mismo, como también la fácil adherencia de los refuerzos.

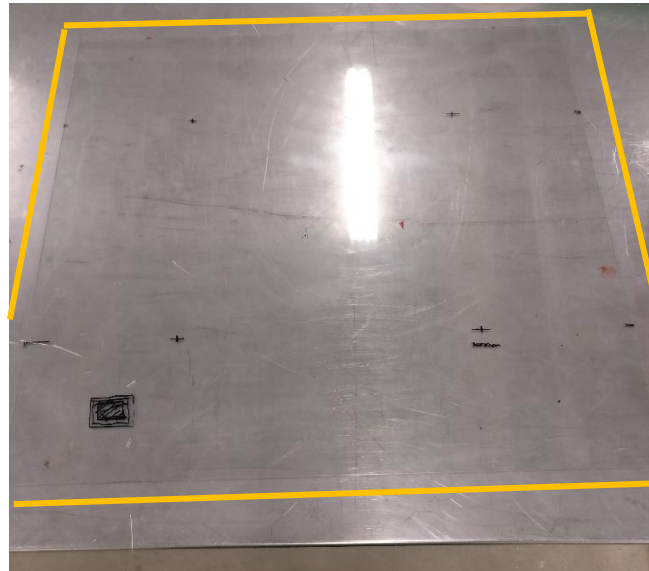


Figura 3.18. Molde de material cerámico amorfo (Vidrio) 30cm x 30cm.

Paso No.2 Para iniciar el proceso de fabricación se aplica desmoldante en cera al molde. Se coloca con un paño de forma vertical y horizontal, esto con el propósito de facilitar la separación de la pieza al concluir la infusión.

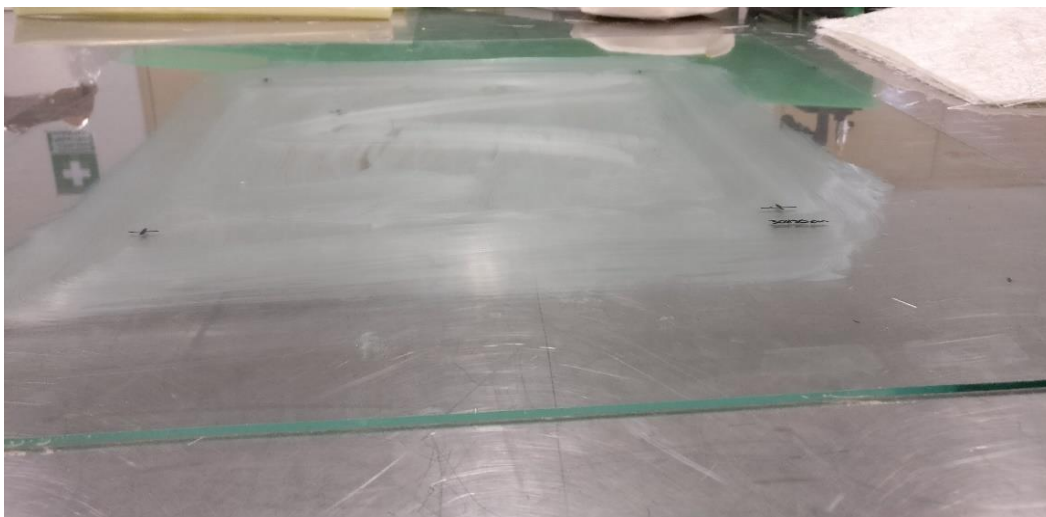


Figura 3.19. Aplicación de cera desmoldante.

Paso No. 3 Se coloca cinta selladora 7 cm de margen excedente al perímetro donde se colocarán las capas de fibra de vidrio. El lado superior de la cinta permanece sin descubrir.

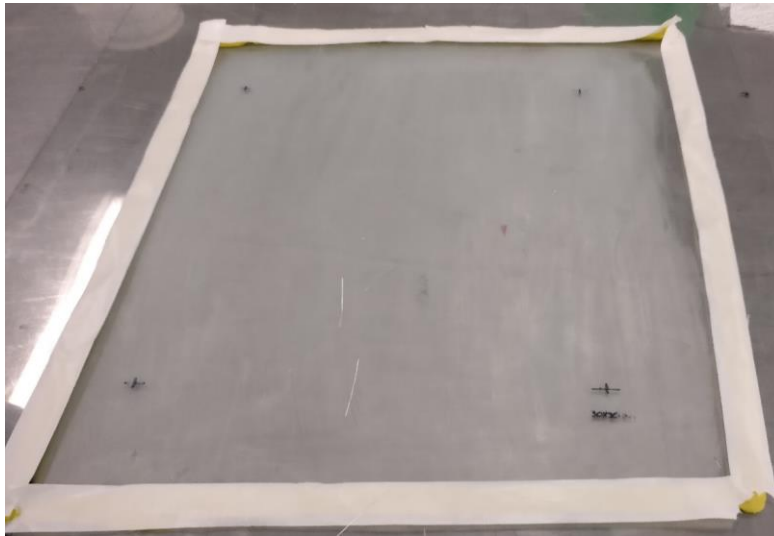


Figura 3.20. Aplicación de cinta adhesiva.

Paso No. 4 Se selecciona el refuerzo (Fibra de vidrio), para este tipo de laminado se utiliza $[tela/dispersa/dispersa]_s$, el termino **tela** hace referencia a una lámina de tejido bidireccional ($0^\circ/90^\circ$) en forma de tela de fibra de vidrio de 6 onzas (Figura 3.21) y para el termino **dispersa** se hace referencia a una lámina de fibra de vidrio dispersa (Figura 3.22) (Paz González et al., 2017). Consta de dos cuadros de petatillo de fibra de vidrio y cuatro cuadros de colchoneta de fibra de vidrio, con un total de seis cuadros de 35cm x 35cm, esto para llegar a la configuración deseada.



Figura 3.21. Tejido de fibra de vidrio.

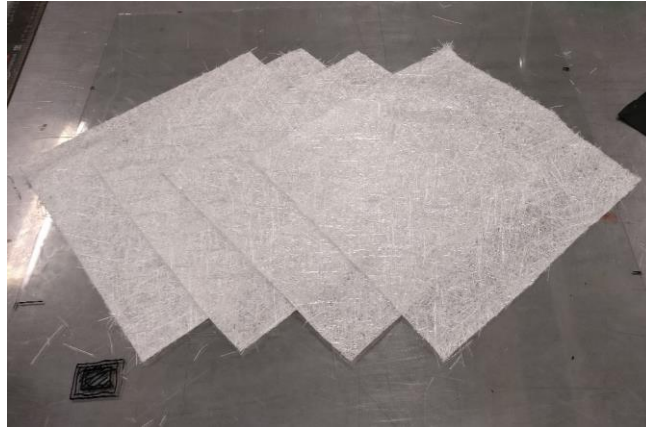


Figura 3.22. Colchoneta M710 cortada.

Paso No.5 Se corta una sección del rollo de tejido pelable, también conocido como (Peel-ply), con un excedente de 5 cm a las mismas dimensiones de la fibra de vidrio.

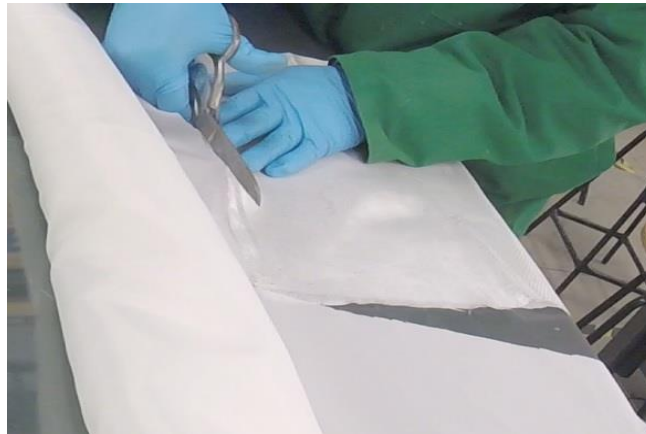


Figura 3.23. Tejido pelable (Peel-Ply).

Paso No.6 Se corta un cuadro del rollo de la malla de infusión de resina, con las mismas dimensiones a la del tejido pelable.



Figura 3.24. Malla de infusión de resina.

Paso No.7 Una vez que se sabe la dimensión del laminado, es momento de cortar la bolsa de aislamiento. Esta bolsa debe ser estrecha, pero a la vez tener suficiente espacio para colocar las redes de tubería. Demasiado corta o demasiado grande puede resultar en acumulación de resina en una sección o una mala infusión. Se corta un tramo de bolsa de aislamiento, con dimensiones que sobrepasen las del molde no mayor a un 10%.



Figura 3.25. Bolsa de aislamiento.

Paso No.8 Se coloca el primer refuerzo de fibra de vidrio, previamente cortado con dimensiones a las del perímetro del proyecto (Figura 3.26). Para este proyecto serán necesarias 2 capas de tejido de fibra de vidrio.



Figura 3.26. Primera capa de fibra de vidrio.

Paso No.9 Se apilan las 4 capas de colchoneta de fibra de vidrio sobre la primera capa previamente colocada.

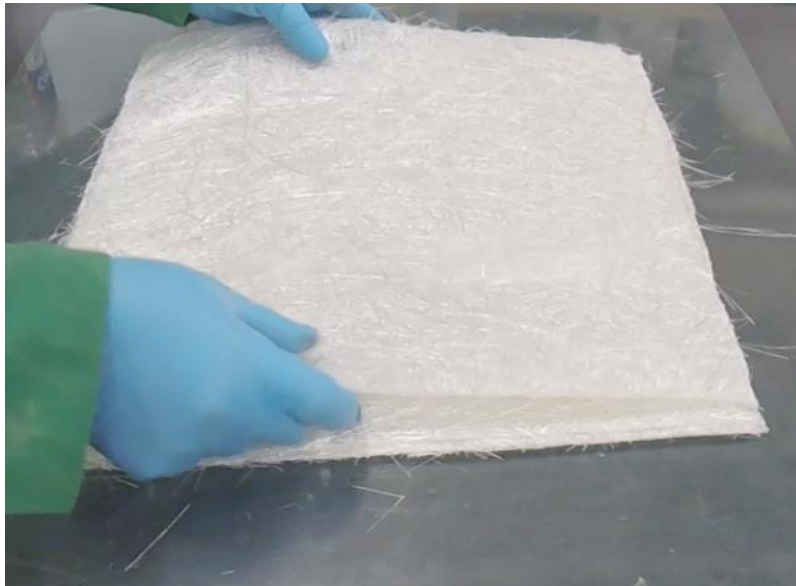


Figura 3.27. Apilamiento de capas de colchoneta de fibra de vidrio.

Paso No.10 El último refuerzo de fibra se coloca en la parte superior de las fibras previamente colocadas con un tejido de fibra de vidrio.



Figura 3.28. Última capa de fibra de vidrio.

Paso No.11 Una vez colocado el refuerzo (capas de fibra de vidrio), se incorpora la tela previamente cortada de tejido pelable (Peel Ply). Este corte se tendrá que mantener en una orientación horizontal o vertical.

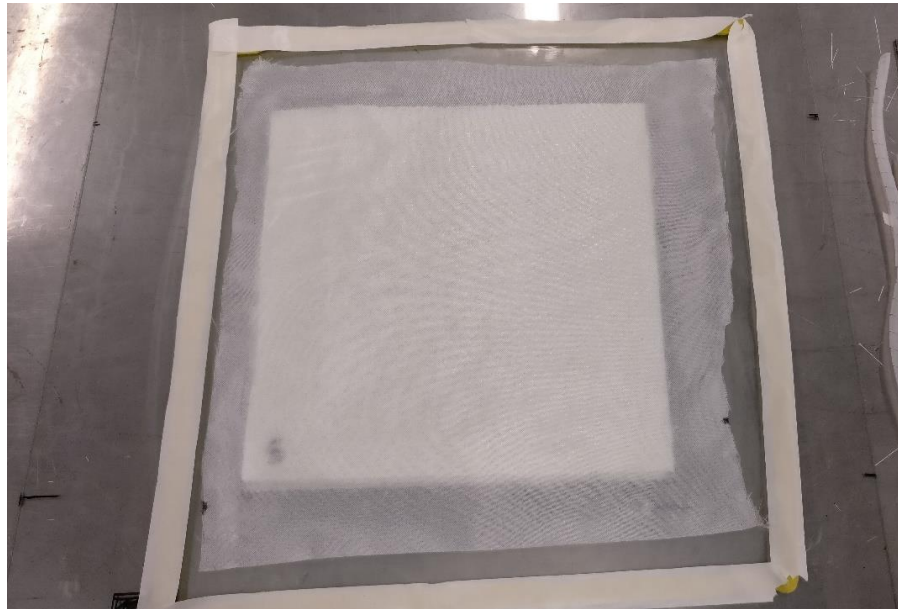


Figura 3.29. Colocación de tejido pelable sobre la fibra de vidrio.

Paso No.12 La malla de infusión de resina se coloca sobre el tejido pelable.

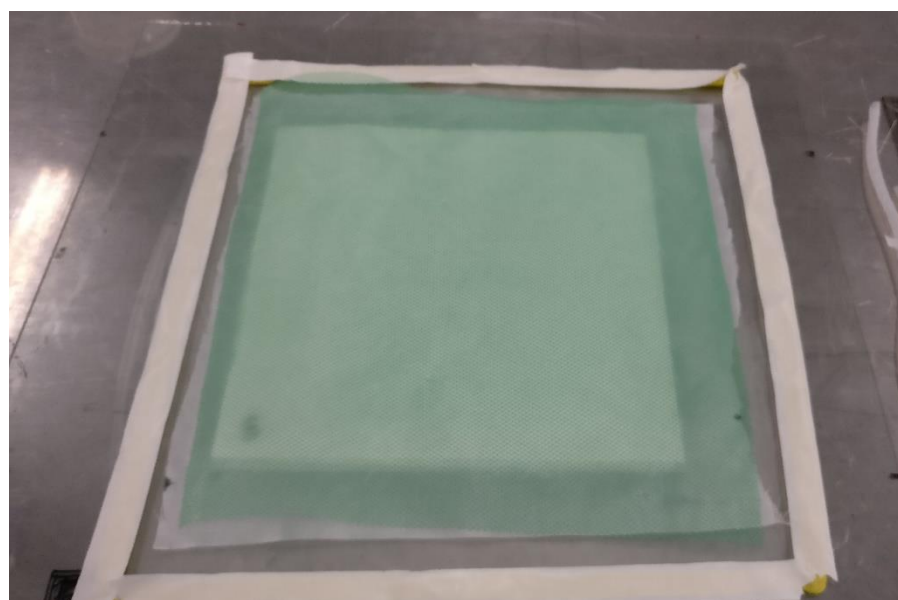


Figura 3.30. Colocación malla de infusión.

Paso No.13 Se coloca en los dos extremos manguera espiral de infusión, colocando dos conectores de aluminio en el centro de cada tramo, previamente cubiertos de cera desmoldante sobre la entrada y salida de resina, la cantidad de conectores depende de las dimensiones del proyecto, esto con la finalidad de tener mayor flujo y distribución de resina.

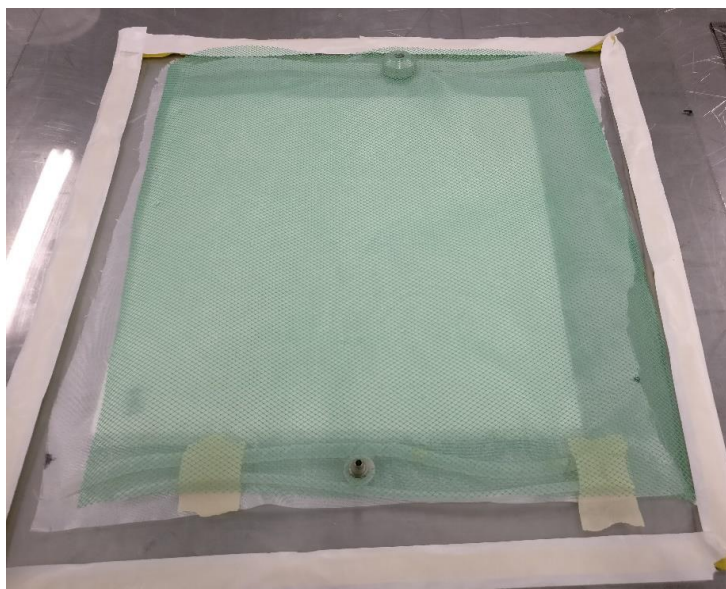


Figura 3.31. Colocación de manguera espiral y conectores de infusión.

Paso No. 14 Una vez colocada la manguera espiral y los conectores de aluminio (entrada y salida), se coloca la película transparente de vacío, esta película se perfora coincidiendo con los conectores de aluminio.



Figura 3.32 Perforación de película de vacío.

Paso No.15 Posterior a la perforación de la bolsa de vacío, se procede a sellar las capas colocadas de los materiales, el sellado se realiza con la cara superior de la cinta selladora y la bolsa de vacío en el perímetro del proyecto. Es importante sellarlo con un excedente de 5-7 centímetros, inspeccionando visualmente que no se encuentren burbujas o espacio entre la cinta selladora y la bolsa de vacío, evitando que se generen fugas dentro del sistema. Después se introduce la manguera de PVC en ambos conectores de aluminio. La longitud de la manguera debe ser proporcional a la distancia que hay entre bomba-sistema sistema-deposito.

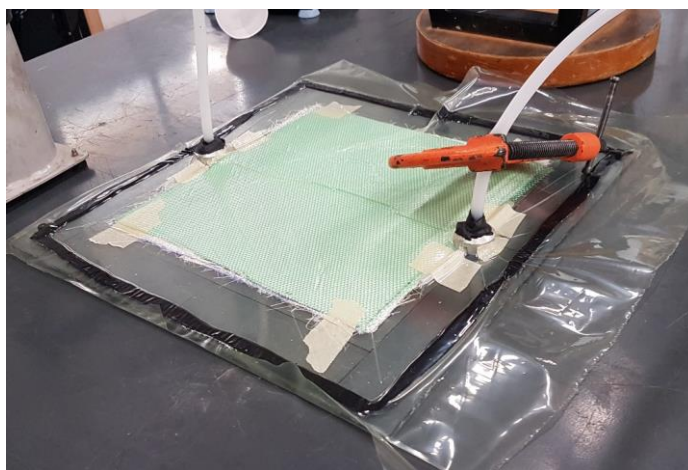


Figura 3.33 Sellado de bolsa de vacío sobre cinta doble cara y colocación de manguera de infusión.

Paso No.16 Se posiciona los componentes de bomba de vacío y depósito (trampa) en el extremo de salida del sistema. En la trampa de resina se conecta al centro la manguera infusión que viene del sistema y en el otro conector se introduce otra manguera que va de la trampa de resina a la bomba de vacío.



Figura 3.34. Trampa de resina con manómetro de presión y bomba de vacío.



Figura 3.35. Trampa de resina con manómetro de presión y mangueras de infusión.

Paso No.17 Una vez colocadas las mangueras, se posicionan las líneas de amarre en cada manguera, con la finalidad de evitar fugas de aire en el sistema. Después se acciona la bomba de vacío. En el lado posterior del sistema (entrada de resina), se coloca la mezcla de resina de poliéster y catalizador.

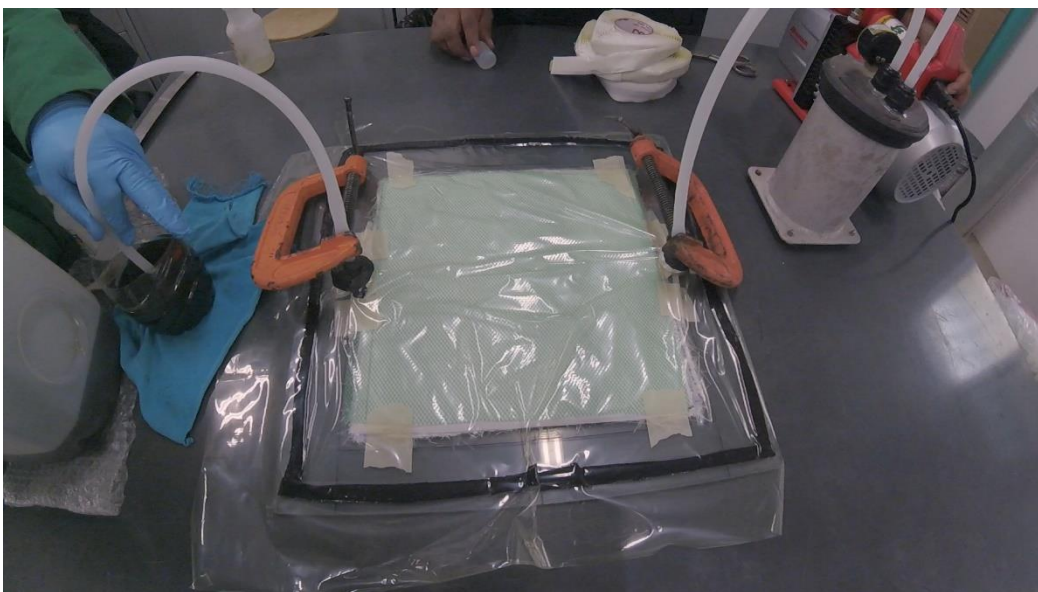


Figura 3.36. Sistema de infusión de resina con sujetadores en las mangueras de infusión.

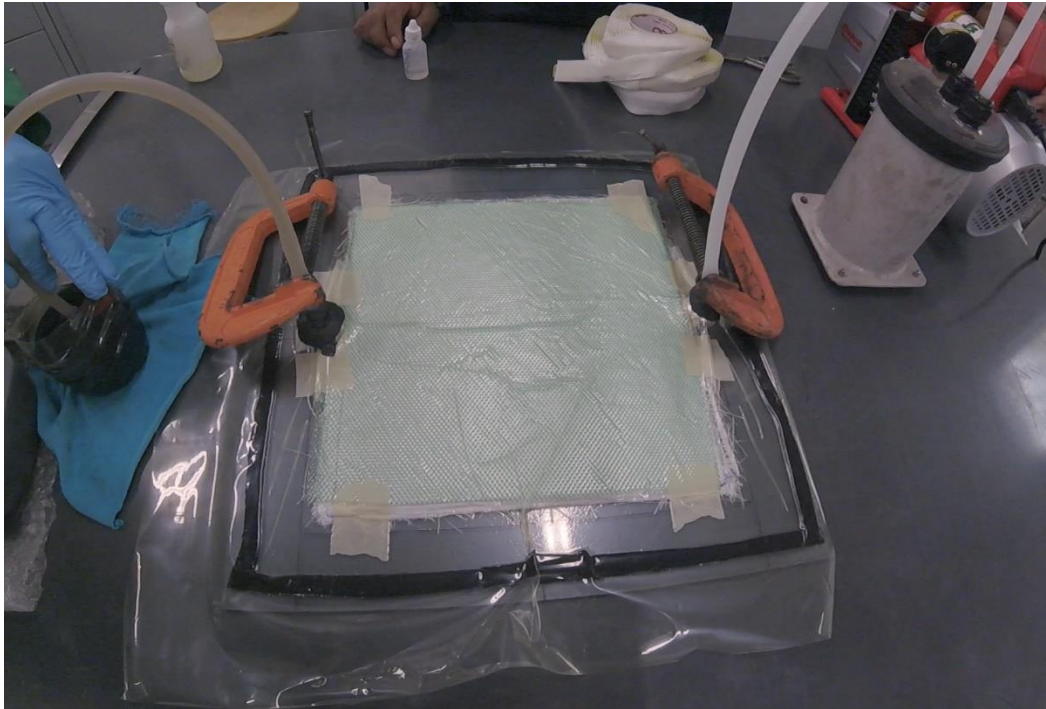


Figura 3.37. Sistema de infusión de resina accionando bomba de vacío.

Paso No.18 Una vez completada la serie de pasos, por último, se abren las líneas de amarre, permitiendo fluir la resina sobre el sistema de infusión.

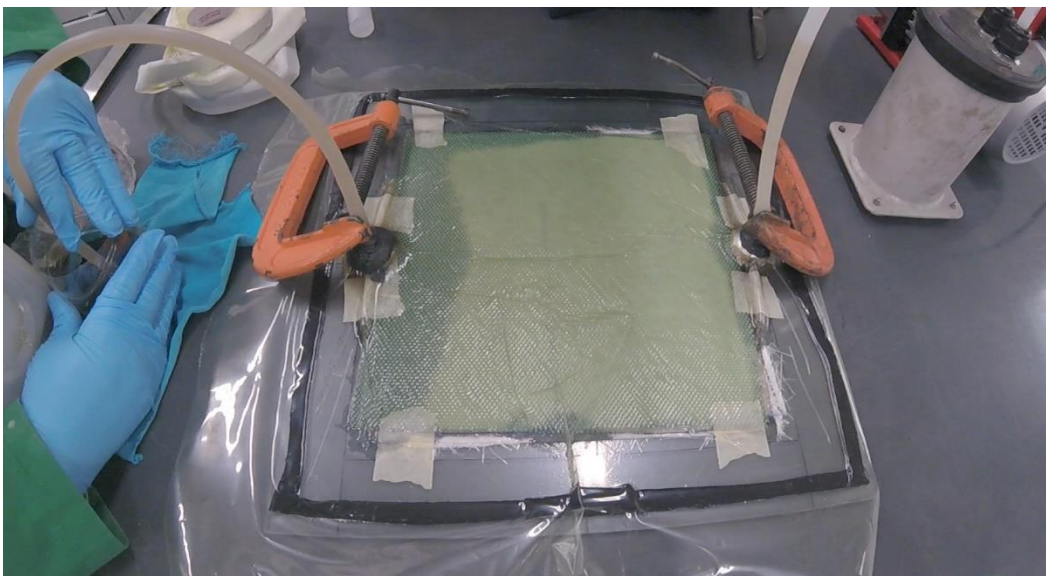


Figura 3.38. Impregnación de fibra de vidrio.

Paso No.19 Al terminar la impregnación de la preforma con resina de poliéster, se deja reposar a temperatura ambiente aproximadamente 2 horas, después se retira la bolsa de aislamiento junto con la cinta adhesiva.

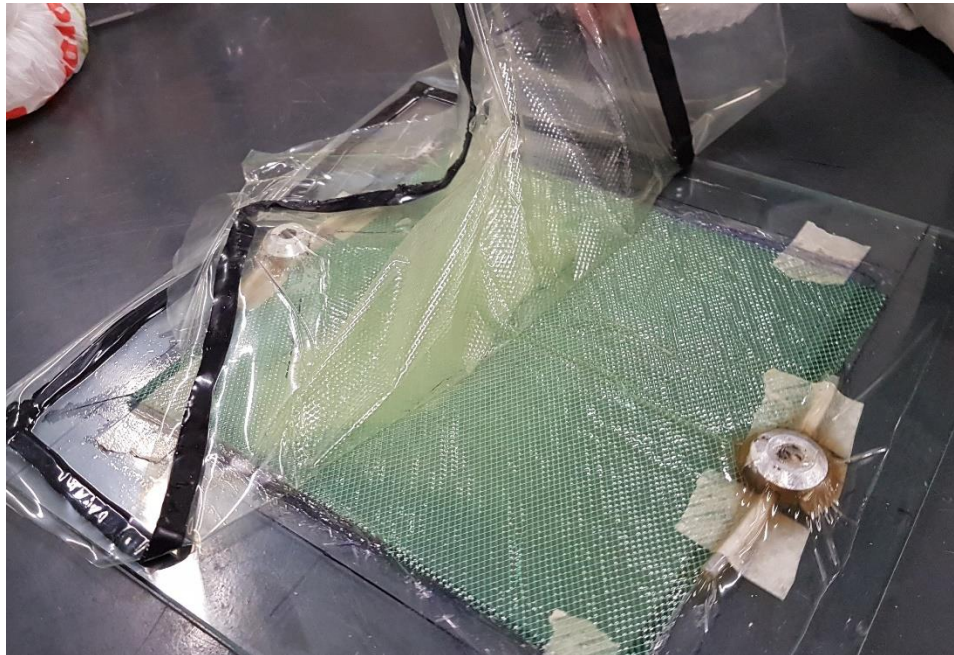


Figura 3.39. Separación de la bolsa de aislamiento con el laminado.

Paso No.20 Se desprende la malla de infusión para obtener el laminado con un acabado superficial rugoso y liso por la parte inferior.

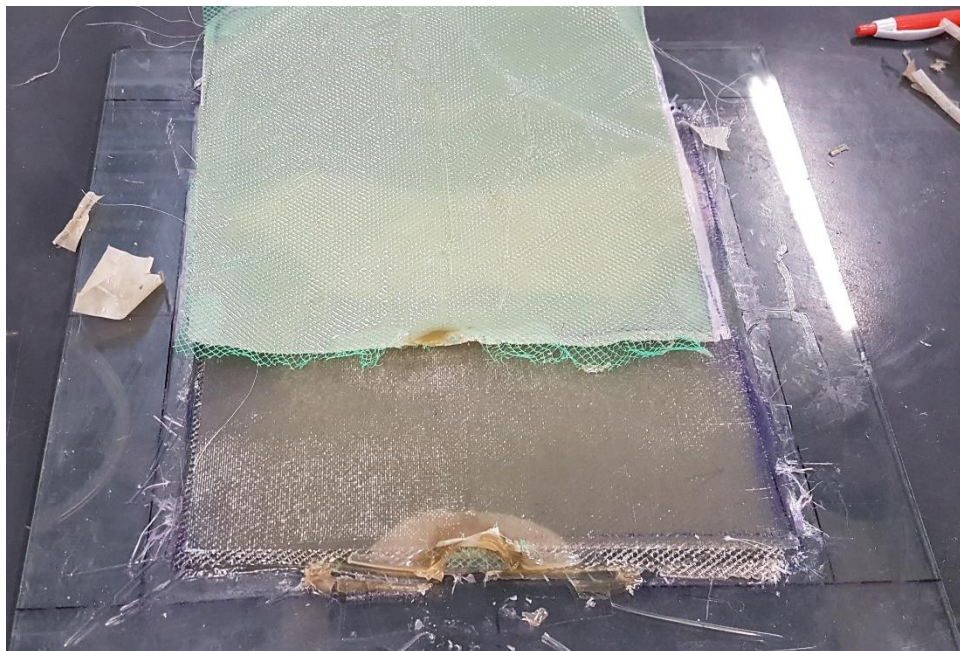


Figura 3.40. Separación de la malla de infusión.

La secuencia anterior se fundamenta para la obtención de un laminado con acabado superficial liso y rugoso, sin embargo, para la caracterización del material se realizaron varios laminados con distintos acabados superficiales, dicha intención es poder seleccionar el mejor laminado en base a su acabo superficial. A continuación, se describe la secuencia de pasos, para la elaboración de un laminado con doble acabado superficial liso utilizando el diagrama 3.3.

Paso No.1 Se definen los moldes, estos moldes deben poseer un acabado superficial liso y brillante, de este modo se puede determinar el acabado final y la cantidad de material a utilizar.

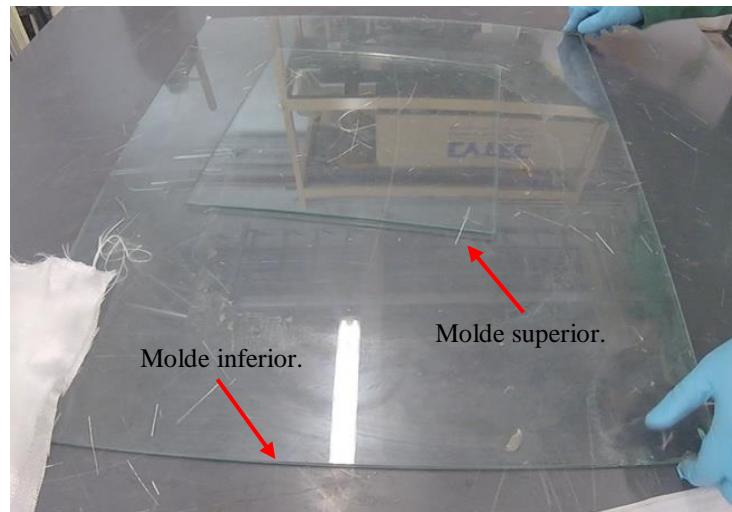


Figura 3.41. Selección de moldes lisos.

Paso No.2 Para iniciar el proceso de fabricación se aplica cera desmoldante sobre las superficies que harán contacto con la fibra de vidrio.

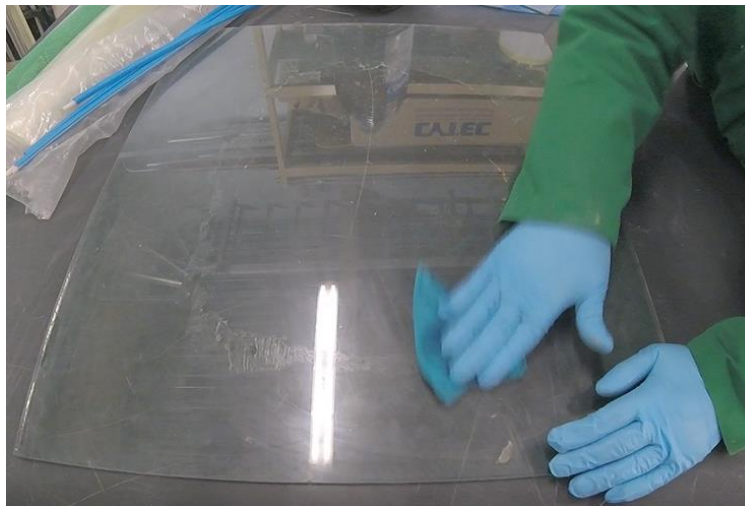


Figura 3.42. Aplicación de cera desmoldante.

Paso No. 3 Se selecciona y se corta el refuerzo de fibra de vidrio, para este tipo de laminado se utilizan dos capas de tela de tejido bidireccional y cuatro capas de colchoneta de fibra de vidrio. Estas capas deben tener una dimensión de 35cm x 35cm.



Figura 3.43. Recorte de fibra de vidrio.

Paso No. 4 Una vez que se sabe la dimensión del laminado y se haya realizado el corte del refuerzo de fibra, es momento de cortar la bolsa de aislamiento (vacío). Esta bolsa debe poseer una dimensión mayor a los moldes, ya que esta misma a la hora de accionar la bomba de vacío esta se reduce en tamaño.

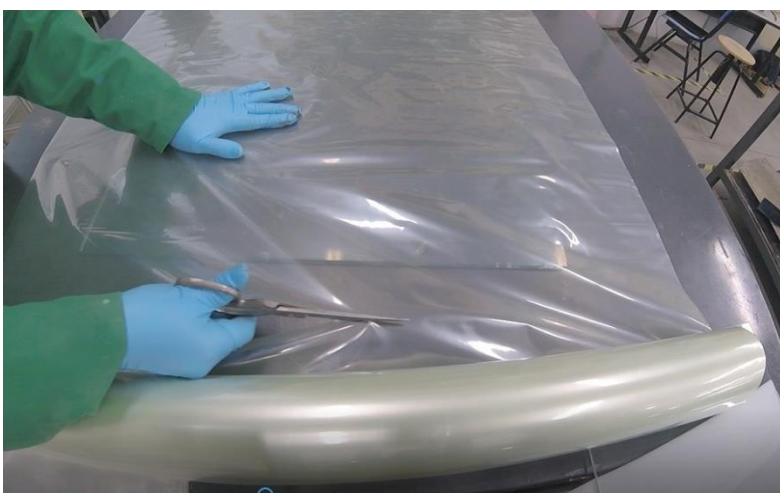


Figura 3.44. Recorte de bolsa de vacío.

Paso No.5 Una vez recortados los materiales, las capas de fibra de vidrio se apilan entre sí, primero colocando una capa de tejido bidireccional, seguido de cuatro capas de colchoneta de fibra de vidrio, y por último una capa de tejido bidireccional.

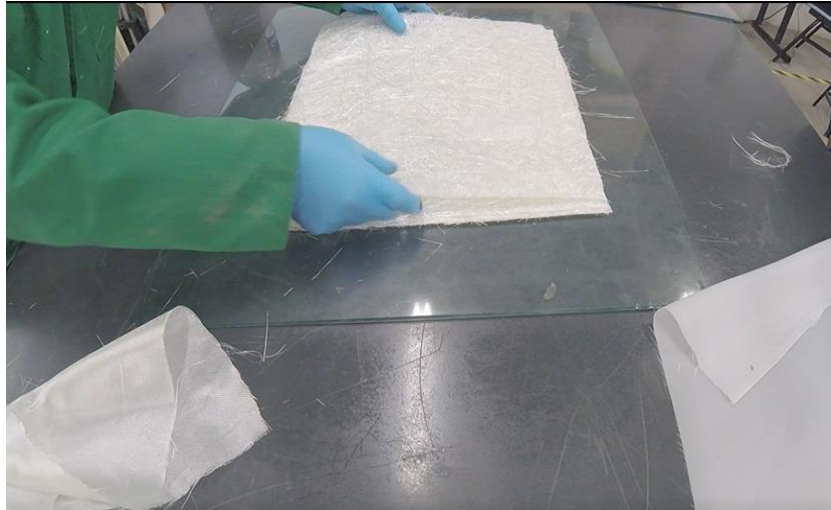


Figura 3.45. Apilamiento de refuerzos de fibra de vidrio.

Paso No.6 Después de haber colocado las seis capas de fibra de vidrio, se coloca nuevamente otra superficie lisa con la misma característica superficial que la del molde. Seguido se colocan las mangueras de infusión de resina en cada extremo con los conectores de infusión.

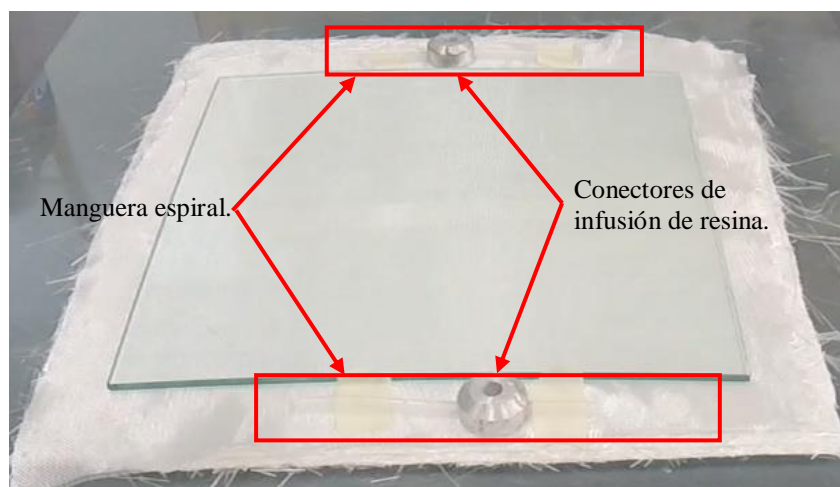


Figura 3.46. Molde superior y conexión de manguera espiral con conectores.

Paso No.7 Se introduce la bolsa de vacío, sobre el sistema. Es importante recubrir los bordes del molde con cinta adhesiva, ya que podría romper la bolsa de vacío.

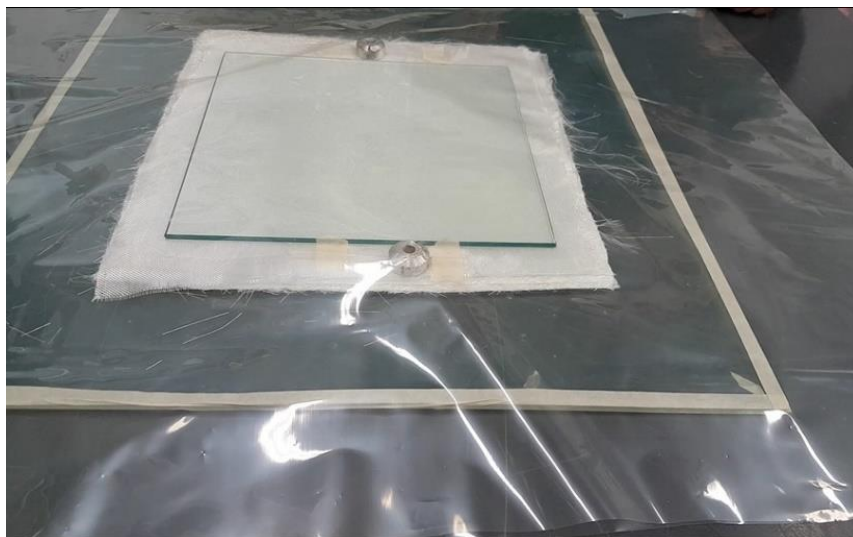


Figura 3.47. Aplicación bolsa de vacío.

Paso No.8 Para esta configuración de doble acabado superficial liso, se utilizó un sistema de cierre de bolsa, el cual consta de una manguera seccionada con una vara rígida, simulando el cierre de una bolsa hermética.



Figura 3.48. Cierre de bolsa de vacío.

Paso No.9 Se introduce la manguera de infusión de resina, perforando sobre los conectores de aluminio.

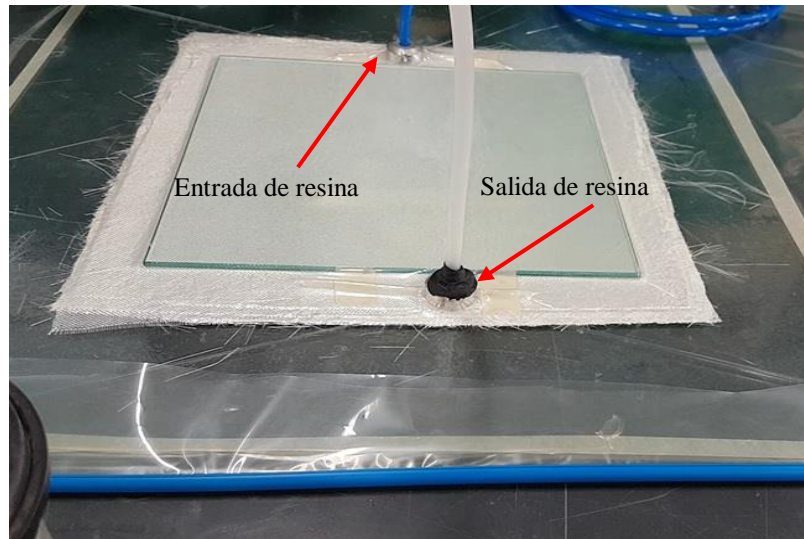


Figura 3.49. Manguera de infusión sobre entrada y salida de resina.

Paso No.10 Se posicionan los componentes de bomba de vacío, depósito (trampa) y línea de amarre en el extremo de salida del sistema. En el depósito se conecta al centro la manguera de infusión que viene del sistema y en el otro conector se introduce otra manguera que va de la trampa de resina a la bomba de vacío.

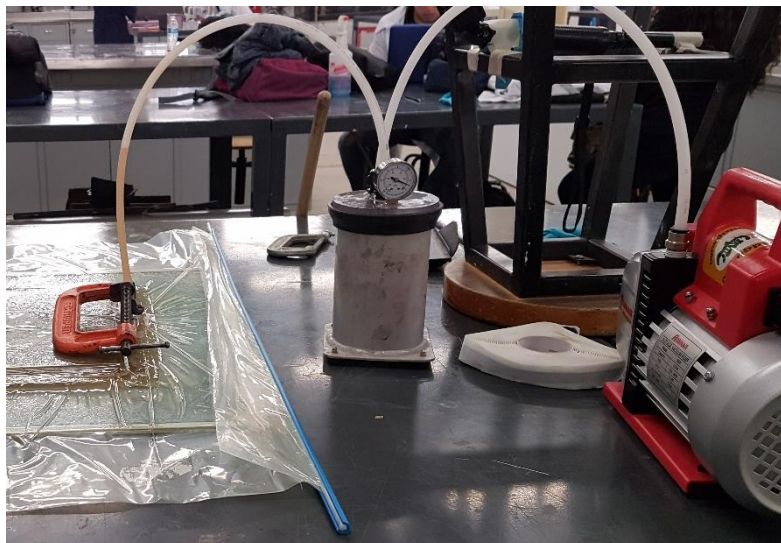


Figura 3.50. conexión de manguera de infusión a depósito y bomba de vacío.

Paso No.11 En el extremo de entrada de resina, se coloca la mezcla de resina de poliéster y catalizador. Una vez accionada la bomba de vacío, la manguera se introduce en la mezcla para poder llevarse a cabo el método de infusión de resina.



Figura 3.51. Infusión de resina por medio de bomba de vacío.

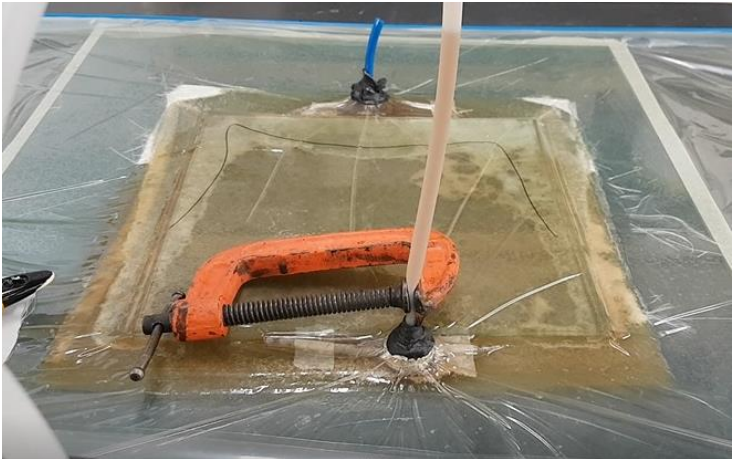


Figura 3.52. Doble acabado superficial liso.

3.5.2 MANUFACTURA DE PROBETAS

El proceso de fabricación es en base al laminado de fibra de vidrio con matriz polimérica obtenida por el método de infusión de resina, cuya operación principal fue el fresado de probetas rectangulares de 25mm x 250mm de acuerdo a la norma ASTM D 3039.

A continuación, se encontrará la secuencia de operación para el maquinado de las probetas.

Paso No.1 Se sujeta el laminado a la mesa de trabajo.



Figura 3.53. Sujeción de laminado.

Paso No.2 Se marca el centro o donde se desea iniciar para maquinarse, (en este caso se marcó el centro para indicarle a la maquina donde es su punto cero).

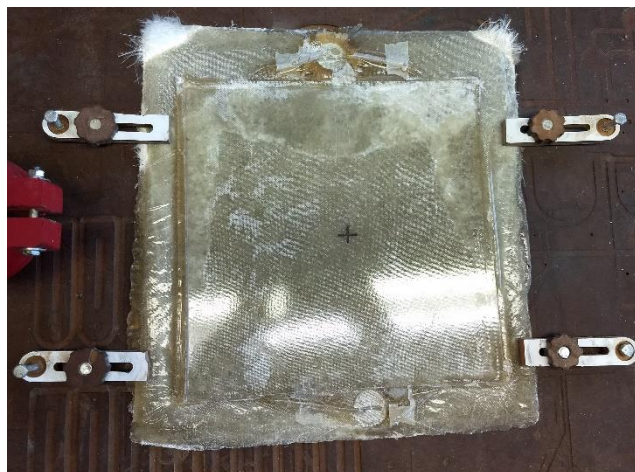


Figura 3.54. Centro de laminado.

Paso No.3 Una vez marcado el centro, se inicia con la operación de maquinado. Es importante utilizar un aspirador, ya que la fibra de vidrio tiende a ser filosa y de ser inhalada sería nocivo para la salud.

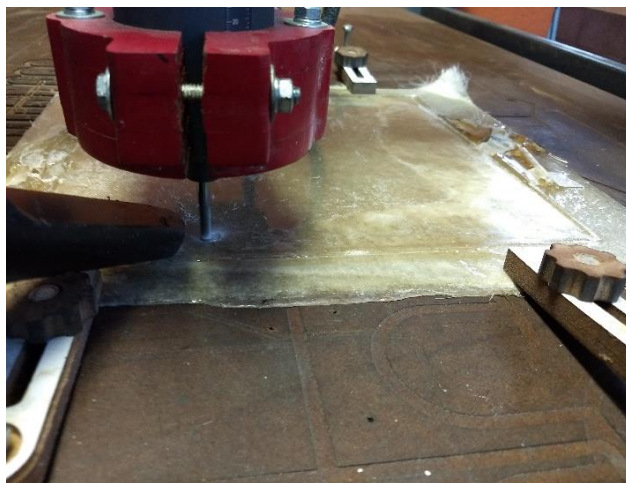


Figura 3.55. Uso de aspirador para maquinado de probetas.



Figura 3.56. Avance de maquinado de probetas.

Paso No.4 Se retiran las probetas ya cortadas para no ocasionar ninguna obstrucción.



Figura 3.57. Separación de probetas.



Figura 3.58. Maquinado de 5ta probeta.

Paso No.5 Una vez maquinadas las probetas, es necesario colocarlas en agua, para eliminar los restos de fibra.



Figura 3.59. Colocación de probetas en agua.

Paso No.6 Es necesario secar las probetas después de haberlas enjugado en agua.



Figura 3.60. Probetas terminadas

Paso No.7 Medir probetas en varios puntos, para corroborar sus dimensiones por probeta.



Figura 3.61. Medición de probeta con vernier.

CAPÍTULO IV:

Resultados.

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de la fabricación del material compuesto y la caracterización experimental, de las cuales se obtuvieron 5 probetas y su gráfica *esfuerzo vs deformación* para determinar las propiedades mecánicas de este compuesto (Figura 4.1).



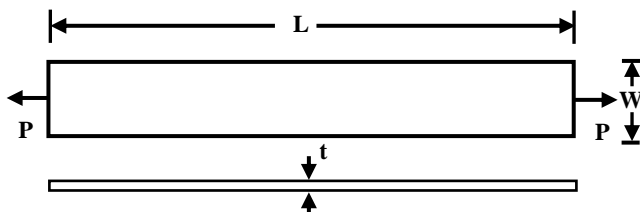
Figura 4.1. Probetas del laminado de infusión de resina.

Los resultados correspondientes a la caracterización mecánica a tensión del laminado, se obtienen valores importantes promedio como; el módulo de elasticidad, la resistencia última y el porcentaje de elongación. Estas propiedades mecánicas, son utilizadas para determinar la rigidez, elasticidad y resistencia del material.

4.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se utilizó el proceso de fabricación de material compuesto por infusión de resina, del cual se fabricaron distintos laminados con la misma configuración. Posterior a eso, se eligió el laminado con mejores características en base a una correcta impregnación de fibra y matriz de manera visual, del cual se fabricaron cinco probetas. La nomenclatura de las probetas será la siguiente LP#, donde LP significa (*laminado probeta*) y (#) es el número de probeta a caracterizar.

De acuerdo a la norma ASTM D3039 se recomienda que sean probetas rectangulares de 250 mm de largo, 25 mm de ancho y de espesor variable (Figura 4.2). Se tomaron en cuenta cinco probetas del laminado (LP1-LP5) (Figura 4.3), las que se sometieron a pruebas de tensión axial en la máquina universal Shimadzu AG-X Plus, para obtener el módulo de elasticidad longitudinal efectivo (E), la resistencia última (σ_u) ó también conocida como de tracción y el porcentaje de elongación (%). Esto con la finalidad de poder ser comparadas con materiales convencionales utilizados en manufactura de prótesis y ortesis (ASTM International, 2002).



L = Largo (250 mm); W= Ancho (25 mm); t = Espesor; P=Carga

Figura 4.2.- Dimensiones de probetas en base a la norma ASTM D3039
Fuente: (ASTM International, 2002).



Figura 4.3.- Probetas LP.

4.2.1 MEDICIÓN DE PROBETAS

Considerando los estándares que propone la norma ASTM D3039 se obtuvieron 5 probetas. Teniendo en cuenta estos estándares, se realizó una medición por probeta en 5 puntos, para obtener el ancho, espesor y largo (Figura 4.4), a manera de obtener el promedio y desviación estándar muestral para cada una de ellas (Tabla 4.1).

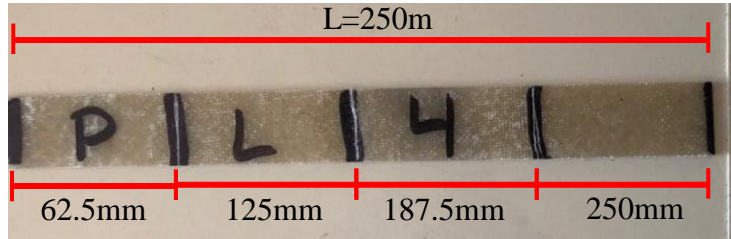


Figura 4.4.- Medición de ancho y espesor cada 62.5 mm.

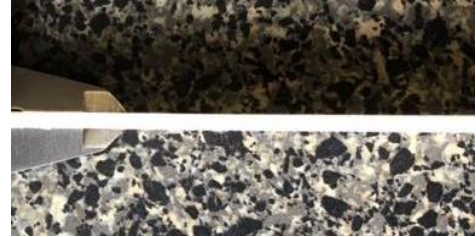


Figura 4.5.- Medición de espesor de probeta.

Tabla 4.1

Medición de probetas del laminado LP.

Descripción	#1	#2	#3	#4	#5	Promedio	Desviación estándar
Ancho probeta 1	25.07	25.24	25.23	25.15	25.12	25.162	0.072594766
Ancho probeta 2	25.09	25.15	25.09	24.96	24.97	25.052	0.083186537
Ancho probeta 3	25.20	25.19	25.22	25.28	25.18	25.214	0.039749214
Ancho probeta 4	25.04	25.01	25.07	25.13	25.19	25.088	0.072249567
Ancho probeta 5	25.24	25.18	25.11	25.17	25.15	25.17	0.047434165
Espesor probeta 1	2.84	2.7	2.76	2.71	2.79	2.76	0.057879185
Espesor probeta 2	2.74	2.68	2.73	2.64	2.73	2.704	0.042778499
Espesor probeta 3	2.71	2.64	2.68	2.61	2.67	2.662	0.038340579
Espesor probeta 4	2.61	2.52	2.58	2.51	2.63	2.570	0.053385391
Espesor probeta 5	2.54	2.43	2.52	2.47	2.65	2.522	0.083486526
Promedio ancho	25.1372			Desviación estándar ancho		0.0657054	
Promedio espesor	2.6436			Desviación estándar espesor		0.0971329	

Nota. Todos los valores están expresados en milímetros. Distancia entre cada medición 62.5 milímetros. Cada probeta tiene un largo de 250mm.

4.3 RESULTADOS DE TENSIÓN

En la (Figura 4.6) se muestra la curva de *esfuerzo vs deformación* para cada probeta sometida a tensión del laminado LP. En esta figura se puede observar la curva de la resistencia última que permitió determinar el módulo elástico del material compuesto.

En base a los resultados del ensayo a tensión, demuestra que el comportamiento del material es elástico-lineal hasta su rotura. A partir de la curva de esfuerzo-deformación de cada probeta con y sin extensómetro se determinan sus propiedades mecánicas las cuales se muestra en la Tabla 4.2.

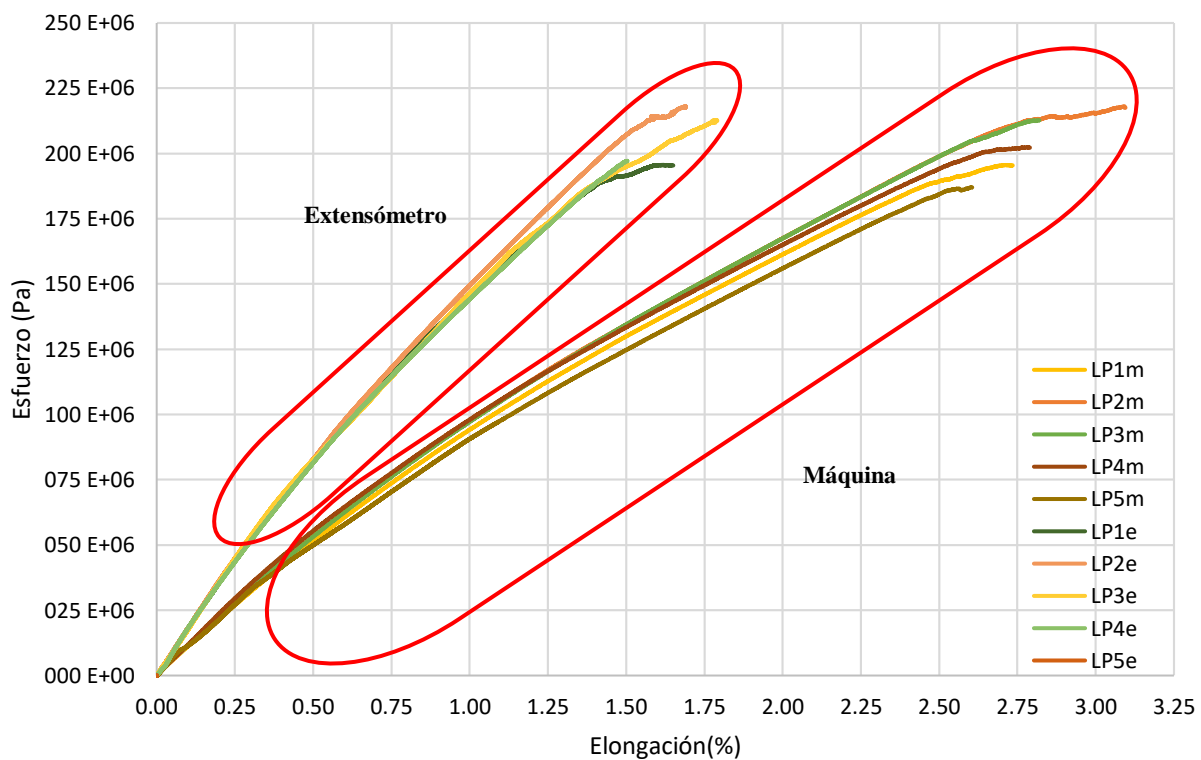


Figura 4.6.- Gráfica esfuerzo-elongación de laminado LP, donde "m" indica el registro de la elongación a través de la máquina de ensayos y "e" indica el registro de la elongación a través del extensómetro.

Tabla 4.2

Propiedades mecánicas longitudinales (Dirección Y) del laminado LP considerando el registro de la deformación de la probeta a través de la máquina de ensayos y del extensómetro.

Propiedades mecánicas longitudinales del laminado LP.					
Probetas	σ_u (MPa)	Máquina		Extensómetro	
		E_m (Gpa)	Elongación m (%)	E_m (Gpa)	Elongación e (%)
LP1	195.593	10.429	2.715	17.140	1.615
LP2	218.069	10.870	3.092	17.274	1.686
LP3	212.757	10.803	2.819	17.987	1.788
LP4	202.409	11.639	2.782	16.700	1.613
LP5	185.968	10.737	2.595	16.437	1.420
Promedio	202.959	10.896	2.801	17.107	1.624
D.E.	12.919	0.449	0.184	0.595	0.135

Nota. Los resultados del ensayo de tensión se obtuvieron en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), campus Cuernavaca.

En la Tabla 4.2 se muestran las propiedades mecánicas obtenidas después de ser tratados los resultados proporcionados por la máquina universal Shimadzu, la resistencia última promedio de $\sigma_u = 202.959$ MPa, el módulo de elasticidad longitudinal efectivo promedio de E_m 10.896 Gpa, y el porcentaje de promedio de elongación de 2.801%, estos valores se determinaron de acuerdo a los parámetros establecidos en la norma ASTM D3039 (ASTM International, 2002).

El acabado superficial del laminado LP tiene una rugosidad similar en la superficie superior e inferior, ambas superficies estuvieron sometidos a placas de vidrio. En base al artículo "Influencia del método de infusión de resina en las propiedades de un compuesto laminado

polimérico” este tipo de probetas con superficies planas similares determinan valores de rugosidad promedio de **0.359 a 0.4 μm** (Alcudia Zacarías et al., 2015).

En relación con el artículo “*Caracterización experimental de El de un material compuesto laminado con matriz polimérica para aplicaciones aeroespaciales y biomecánicas*”, determina que para un acabado superficial de una rugosidad de **12.61 μm** , muestra propiedades mecánicas de: resistencia última promedio $\sigma_u = \mathbf{185.318\ MPa}$, módulo de elasticidad longitudinal efectivo promedio $E_m = \mathbf{10.807\ Gpa}$, y porcentaje promedio de elongación **2.351%**, (Paz González et al., 2017).

Particularmente en laminados con un solo acabado superficial, posee una menor resistencia a la tracción promedio de **185.318MPa** y un módulo de elasticidad promedio de **10.807GPa**. En comparación al laminado que se fabricó con doble molde, originó un incremento en las propiedades mecánicas como en la resistencia última promedio de **202.959 MPa** y el modulo de elasticidad promedio de **10.896Gpa**.

4.4 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECANICAS DE MATERIALES.

A continuación, se presentan las propiedades mecánicas de los materiales más utilizados en aplicaciones biomecánicas. Estos materiales son de gran utilidad para la fabricación de componentes para la ortesis y prótesis. Se consideran las tres propiedades más importantes, para la comparativa del material compuesto laminado Tabla 4.3.

Tabla 4.3

Propiedades mecánicas longitudinales de materiales utilizados en ortesis y prótesis.

Material	σ_u (MPa)	E (Gpa)	Elongación (%)
Titanio	220	116	54.00
Aluminio 7075-T6	220	70	17.00
Polipropileno	41	1.13	100.00
Compuesto Laminado LP	202	10.89	2.80
ABS +30% Fibra de Vidrio	60	9.0	2.00

Fuente: (AZoM, 2013; eFundación inc., 2018; MatWeb, 2018)

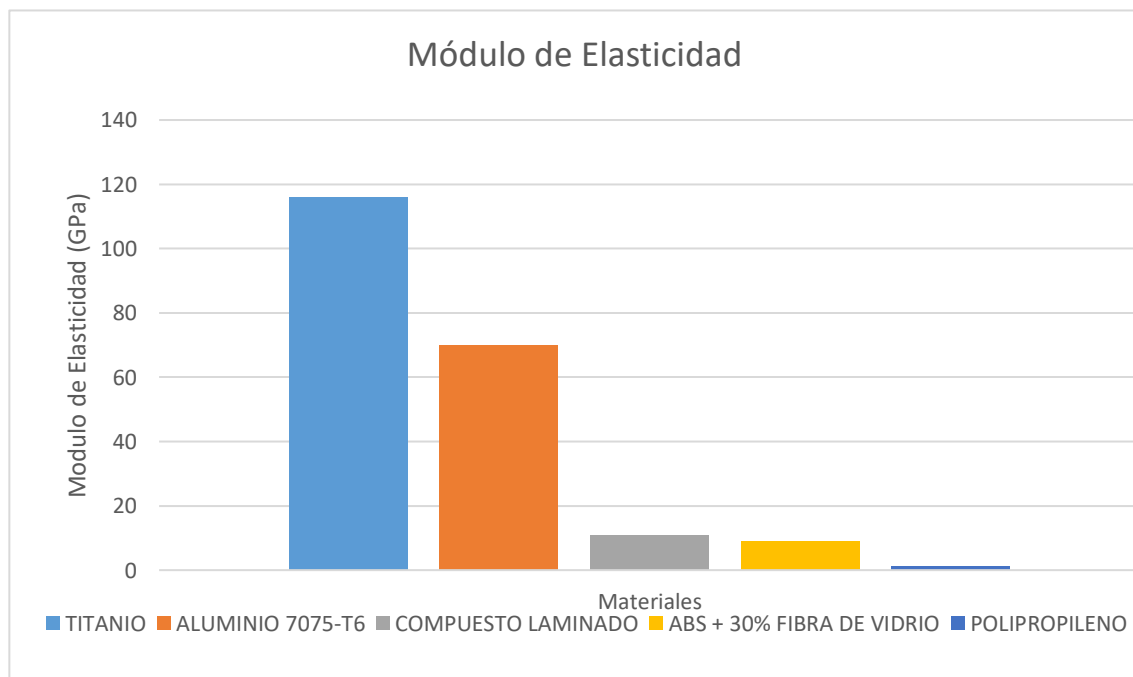


Figura 4.10.- Gráfica comparativa de materiales más utilizados en la ortesis y prótesis en base a su módulo de elasticidad.

CAPÍTULO V:

Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo, se evaluó la fabricación de material compuesto tipo laminado a través del método de infusión de resina y la caracterización mecánica basándose en la norma ASTM D 3039.

Se realizaron mediciones en las 5 probetas para determinar sus dimensiones, lo cuales dio como resultado las siguientes dimensiones, promedio largo de probeta (**250.00mm**), promedio ancho de probeta (**25.13mm**), promedio de espesor (**2.64mm**), las dimensiones de las probetas se realizaron en base a la norma ASTM D3039.

El comportamiento del laminado **LP**, genera una gráfica esfuerzo-deformación en la cual se puede apreciar el módulo de elasticidad de **$E = 17.10 \text{ Gpa}$** , resistencia última promedio de **$\sigma_u = 202.95 \text{ MPa}$** , y porcentaje de elongación promedio de **1.62%**.

Al analizar los resultados del laminado **LP** en comparación con los resultados mostrados en el artículo "*Caracterización experimental de EI de un material compuesto laminado con matriz polimérica para aplicaciones aeroespaciales y biomecánicas*", entre ambos ensayos a tensión se observa que existe una diferencia de rugosidad de **12.21 μm** . Esta diferencia de rugosidades incrementa la resistencia mecánica en un 4.6% a favor del laminado **LP**. Esto se debe a que el tipo de geometría de la probeta presenta picos y concavidades distintos en la superficie, generando a su vez concentradores de esfuerzo a nivel micro que provocan la disminución del esfuerzo último para el laminado con mayor rugosidad.

Se observa que el comportamiento de las probetas en la gráfica esfuerzo-deformación, el material compuesto de fibra de vidrio en matriz de poliéster es elástico-lineal hasta su rotura. Esto quiere decir que solo se presenta cuando las tensiones y deformaciones están relacionadas

linealmente a lo cual podemos clasificarlo como un material frágil de acuerdo a la gráfica esfuerzo-deformación.

En base a los resultados obtenidos por la máquina y extensómetro, se determina que la variación de la deformación se debe al tipo de sujeción que existe para cada instrumento.

La comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas del laminado **LP** en los ensayos de tensión con las propiedades mecánicas de materiales usados en la ortesis y prótesis, se determinó que la resistencia última es superior un **79.7%** al polipropileno, y un **70.3%** al ABS con 30% de resina.

5.2 Trabajos futuros

A continuación, se proponen futuras investigaciones, que permitan ampliar el desarrollo de esta tesis como la de futuros alumnos.

- Diseñar un prototipo de ortesis o prótesis, empleando un modelo de elementos finitos, con las propiedades obtenidas en la caracterización del material.
- Desarrollar un nuevo material compuesto con un reforzamiento (fibra) natural, siguiendo los pasos del método de fabricación.
- Profundizar el desarrollo experimental en esta Tesis con otras variables y tipos de compuestos.

Referencias bibliográficas

- Alcudia Zacarías, E., Abúndez Pliego, A., González Vizcarra, B., Hernández Delgado, A., Paz González, J. A., & Paz González, M. L. (2015). Influencia del método de infusión de resina en las propiedades de un compuesto laminado polimérico. *ResearchGate*, (Septiembre), 9. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/312577825_Influencia_del_metodo_de_infusion_de_resina_en_las_propiedades_de_un_compuesto_laminado_polimerico
- ASTM International. (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 15.03). West Conshohocken: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-08
- AZoM. (2013). Titanium (Ti) - The Different Properties and Applications. Retrieved from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9118>
- Bosch Automotive. (2014). *Vacuum Pump Operating Manual*. Owatonna. Retrieved from www.robinair.com
- Carrera, F. S. (2012, September). Fibra de carbono en la fabricación de vehículos. *CESVIMAP*, 10–14. Retrieved from https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1071543
- Caudillo S, G. (2006). La educación en ortesis y prótesis en México. *Ortoprotesis High Tech*, 05–2016. Retrieved from <http://www.ortoprotesisht.com/pdf/EduacionOrtesisProtesisEnMexico.pdf>
- Cindy, Y. (2016). Owens Corning operates 2 challenger 300s and a Learjet 45XR from TOL. Retrieved January 30, 2018, from http://www.propilotmag.com/archives/2017/Oct17/A2_OC_p1.html
- Cuartero, J., & Miravete, A. (2003). Ensayo AMOCO de "Blistering" sobre laminados protegidos con gelcoat. In A. Miravete & J. Cuartero (Eds.), *Materiales Compuestos I* (1st ed., pp. 43–50). Zaragoza: Reverté. Retrieved from <http://www.aemac.org/wp/wp-content/uploads/2015/05/MATCOMP03.pdf>
- Dorworth, L. C., Gardiner, G. L., & Mellema, G. M. (2009). *Essentials of Advanced Composite*

- Fabrication & Repair*. Newcastle: Aviation Supplies & Academics, Inc.
- DuPont. (2017). *KEVLAR® ARAMID FIBER TECHNICAL GUIDE*. Retrieved from http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/Kevlar_Technical_Guide.pdf
- Easy Composites. (2015). Resin Infusion Kit. Retrieved January 31, 2018, from <http://www.easycomposites.co.uk/#!/vacuum-equipment-and-supplies/vacuum-bagging-consumables/6mm-PVC-vacuum-hose.html>
- eFunda inc. (2018). Mechanical Properties of Polypropylene {homopolymer, unfilled}. Retrieved March 6, 2018, from http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=pp&MinorID=1
- Escudero López, D. (2001). Materiales Compuestos. Aplicaciones. *Informes de La Construcción*, 52(472), 52. Retrieved from <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/676/758>
- García, S. (2007). ANÁLISIS DE LAMINADOS DE MATERIALES COMPUESTOS CON PRECARGA EN SU PLANO Y SOMETIDOS A IMPACTO.(tesis doctoral), 183.
- Gómez, J. L. (2006, June). Las prótesis: Restauración del individuo. *Revista Ciencia Y Desarrollo*, 62–67. Retrieved from <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/196/Articulos/Lasprotesis/Lasprotesis00.htm#a>
- González Hernández, O., Peña Vazquez, M., & Várquez Cervantes, J. P. (2011). *Exoesqueleto robotico para rehabilitacion de miembro superior*. Instituto Politécnico Nacional. Retrieved from <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/9942/9.pdf?sequence=1>
- Hernández Moreno, H. (2002). *Desarrollo de un material compuesto para aplicación estructural*. Instituto Politécnico Nacional. Retrieved from [http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/16061/Desarrollo de un material compuesto para aplicaci3n estructural.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/16061/Desarrollo%20de%20un%20material%20compuesto%20para%20aplicaci3n%20estructural.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Hernández Stengele, F. (2008). *Diseño y construcción de prototipo neumático de prótesis de pierna humana*. Universidad de las Américas Puebla. Retrieved from http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_s_f/indice.html
- INEGI. (2016). La discapacidad en México , datos al 2014. *Instituto Nacional De Estadística Y*

- Geografía*, 358. <https://doi.org/362.4021>
- Mar-Bal, I. (2015). History of Composite Materials. Retrieved July 17, 2017, from <http://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>
- MatWeb. (2018). Tensile Property Testing of Plastics. Retrieved March 6, 2018, from <http://www.matweb.com/reference/tensilestrength.aspx>
- Mazumdar, S. K. (2002). *Composites Manufacturing. Science* (Vol. 32). CRC Press LLC. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6389-1>
- Owens Corning. (2003). *OC Woven Roving Fabrics* (No. Pub No. 59019-B). Toledo. Retrieved from http://www.owenscorning.com.cn/Form_Up/Images/59019-B.pdf
- Owens Corning. (2010). *Colchoneta de fibra de vidrio de hilo cortado M710A* (Vol. 127).
- Paz González, J. A., Alcudia Zacarías, E., Abundez Pliego, A., Villareal Gómez, L. J., Ruiz Ochoa, J. A., & Morales Contreras, O. A. (2017). CCM6- Caracterización Experimental de E1 de un Material Compuesto Laminado con Matriz Polimérica para Aplicaciones Aeroespaciales y Biomecánicas (pp. 294–297). Tijuana: Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología.
- Reichhold. (2010). *Resina Poliéster PolyLite® 33004-00*. Atlacomulco.
- Rivero Serrano, O., & Tanimoto, M. (2005). *El Ejercicio de la Medicina en la Segunda Mitad del Siglo XX (Tercera Parte)* (Spanish Ed). Ciudad de México: Siglo XXI Editores Mexico. Retrieved from https://books.google.com.mx/books?id=FTNxmk-SUFgC&pg=PA164&lpg=PA164&dq=romulo+o%27farrill+instituto+mexicano+de+rehabilitacion&source=bl&ots=_vHJMcP0AO&sig=DeRUuLqRnEEEgN4J813Qn_4IP5w&hl=en&sa=X&ved=0CCwQ6AEwAmoVChMIhc3jltiFyQIVFvtjCh1y-ArI#v=onepage&q=r
- Vázquez Vela, E. (2015). *Los amputados y su rehabilitación*. (E. Vázquez Vela, Ed.) (2016th ed.). Ciudad de México: Academia Nacional de Medicina. Retrieved from https://www.anmm.org.mx/publicaciones/ultimas_publicaciones/Rehabilitacion.pdf
- Viladoms Weber, J. J. (2003). *Análisis de las propiedades de los materiales compuestos sometidos a tensión o flexión*. Universidad de las Américas Puebla. Retrieved from http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/viladoms_w_jj/capitulo1.pdf
- Wagner, H. D., Lourie, O., Feldman, Y., & Tenne, R. (1998). Stress-induced fragmentation of multiwall carbon nanotubes in a polymer matrix. *Applied Physics Letters*, 72(2), 188–190. <https://doi.org/10.1063/1.120680>

Wanberg, J. (2010). *Composite Materials. Fabrication Handbook #2* (First). Stillwater:
Wolfgang Publications Inc. Retrieved from www.wolfpub.com