

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE COMPOSITOS DE RESINA
POLIÉSTER REFORZADOS CON FIBRAS DE VIDRIO Y CARGAS DE CARBONATO DE
CALCIO”**

PRESENTA:

MAURICIO GONZALEZ VILLARREAL

TESIS

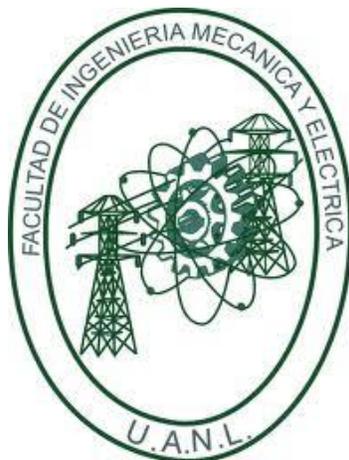
**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

CD. UNIVERSITARIA

OCTUBRE 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAMINADOS DE RESINA
POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRAS DE VIDRIO Y CARGAS DE CARBONATO DE
CALCIO”**

PRESENTA:

MAURICIO GONZALEZ VILLARREAL

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

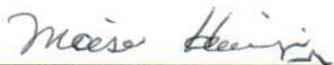
CD. UNIVERSITARIA

OCTUBRE 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

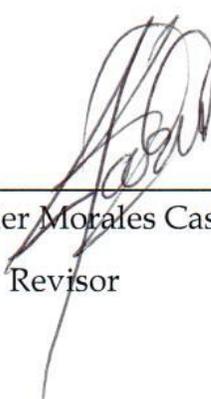
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis "Optimización de las propiedades mecánicas de compositos de resina poliéster reforzados con fibras de vidrio y cargas de carbonato de calcio" realizada por el alumno Mauricio González Villarreal con número de matrícula 1334575 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El comité de tesis



Dr. Moisés Hinojosa Rivera

Asesor



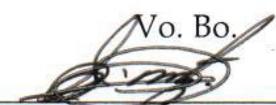
Dr. Javier Morales Castillo

Revisor



Dra. Diana Hernández Uresti

Revisor



No. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Octubre del 2014

Dedicatoria

A mi familia.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que nos brindan a todos los estudiantes en este período del proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, en especial a todos los maestros del programa de posgrado de Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales, por sus enseñanzas y consejos.

A mi asesor y maestro Dr. Moisés Hinojosa Rivera, quien me acercó al mundo de los materiales compuestos, por su incondicional apoyo y sus enseñanzas.

Al maestro Dr. Juan A. Aguilar Garib quien me encauzó en la investigación en el campo de los materiales.

Al maestro en ciencias José Cázares Yeverino.

A la empresa Reacciones Químicas S.A de C.V por la invitación al proyecto y donación de material, así como el uso de sus equipos, de sus instalaciones así como la convivencia con su amable personal que además me enseñaron mucho, en especial a Juan Francisco Barrón y a José Antonio Sánchez Márquez.

A la empresa HEMAQ por la donación de una pieza maquinada de gran importancia para realizar ensayos a flexión, en especial a Lic. Benito Gritzewsky, al Ing. Rafael Ontiveros y al Ing. Carlos Maya.

A mis compañeros de curso y amigos que pertenecen al equipo de materiales compuestos especialmente a Emilio Cervantes y Carlos Rodríguez.

Índice

Resumen	1
Antecedentes, Hipótesis y Objetivos	3
Capítulo 1. Generalidades de Materiales Compuestos	
1.1 Introducción	6
1.2 Clasificación de materiales compuestos	9
1.2.1 Compuestos reforzados por partícula	9
1.2.2 Compuestos reforzados por fibra	10
1.2.3 Compuestos reforzados por <i>whiskers</i>	12
1.3 Breve comparativa entre materiales	13
1.3.1 Polímeros	14
1.3.2 Cerámicos	15
1.3.3 Metales	16
1.4 Ventajas y desventajas de los materiales compuestos	17
Capítulo 2. Refuerzos	
2.1 La resistencia de las fibras	19
2.1.1 Fibras de vidrio	20
2.1.2 Fibras de carbono	21
2.1.3 Fibras de aramida	27
2.2 Cargas minerales	29
2.2.1 Carbonato de calcio	30
Capítulo 3. Matrices Poliméricas	
3.1 Importancia de la matriz	31
3.2 Resina poliéster (UPE)	33
3.3 Resina epóxica	36
3.4 Entrecruzamiento	38
Capítulo 4. Importancia de la Interfaz	
4.1 Introducción	40

4.2	Teorías de adhesión	41
4.2.1	Absorción y humectación	41
4.2.2	Interdifusión	42
4.2.3	Atracción electrostática	43
4.2.4	Unión química	43
4.3	Interfaz Vidrio-Poliéster	45

Capítulo 5. Propiedades mecánicas en los materiales compuestos

5.1	Materiales isotrópicos, anisotrópicos y ortotrópicos	47
5.2	Regla de las mezclas	49
5.3	Fracción volumétrica crítica	52
5.4	Efecto de la longitud de la fibra	53
5.5	Efecto de las cargas en el módulo de Young por cargas en plásticos	55

Capítulo 6. Experimentación

6.1	Materiales	58
6.2	Preparación de probetas	58
6.3	Densidad y porosidad	60
6.4	Caracterización por microscopía electrónica de barrido (MEB)	63

Capítulo 7. Resultados

7.1	Resultados de tensión	66
7.2	Resultados de impacto	72
7.3	Resultados de flexión	74
7.4	Resumen de propiedades obtenidas	79

Capítulo 8. Conclusiones

8.1	Conclusiones	82
	Referencias	84
	Índice de figuras y tablas	87
	Apéndices	91

Prólogo

Este trabajo de tesis de Mauricio González se inscribe en una línea de evolución histórica que tiene que ver con el desarrollo económico de Monterrey, el estado de Nuevo León y su zona de influencia. La fortaleza de Monterrey como polo industrial de México tiene sus orígenes a fines del siglo XIX, cuando se instalaron las primeras industrias en la rama textil y cervecera. Posteriormente nacieron la industria siderúrgica y metalmecánica, la industria del vidrio, cemento y cerámica. En épocas más recientes el desarrollo industrial se extendió con empresas dedicadas a los plásticos, la industria de fundición y metal mecánica se fortaleció en el campo del aluminio, tanto en productos fundidos como forjados.

Evidentemente, se desarrolló en paralelo una cultura técnica y de ingeniería alrededor de los procesos y los materiales, sin embargo el desarrollo tecnológico y científico formal se dió, con señaladas excepciones, de manera desfasada y se puede decir que tardía, pues no es hasta 1970 que se crea una oferta educativa en metalurgia en la UANL, antecedente de los exitosos programas de licenciatura, maestría y doctorado en materiales con los que actualmente cuenta la UANL, centrados principalmente en FIME, pero con oferta también en otras facultades. Estos programas han apuntalado una fortaleza en la investigación, desarrollo e innovación en los campos de la ciencia y la ingeniería de los materiales, particularmente en los metales ferrosos y no ferrosos, los cerámicos y los polímeros, con un desarrollo modesto de los materiales compuestos.

Con el advenimiento de la industria aeronáutica a México y en particular a Nuevo León, hace unos años se hizo evidente la necesidad de impulsar el desarrollo técnico, tecnológico y científico de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras, que son clave en esta industria y en la del transporte en general. De ahí la pertinencia de trabajos como el que aquí nos presenta Mauricio: una aportación en la dirección que permite pasar del “Saber cómo” al “Saber por qué” en el campo de los compósitos.

M. Hinojosa, Monterrey, Nuevo León, Octubre 2014

Resumen

Los materiales compuestos están reemplazando los materiales convencionales, debido a sus interesantes propiedades físicas como su alta resistencia a la tensión, alto módulo de rigidez, gran resistencia al impacto, bajo coeficiente de dilatación térmica, además no sufren corrosión, son más ligeros que los metales y soportan mejor las cargas cíclicas (fatiga).

La presente tesis surgió por la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas del poliéster mediante la adición de fibras de vidrio y cargas de carbonato de calcio, este material compuesto se usa en las carrocerías de los camiones, la industria del transporte se inclina por estos materiales para reemplazar los aceros debido a su resistencia a la corrosión, a la propagación de grietas por vibraciones, buenas propiedades mecánicas y costos competitivos.

La metodología del presente trabajo de investigación fue fabricar manualmente (*hand lay up*) láminas de plástico reforzado con fibras y cargas de diferente formulación, para luego maquinaslas de acuerdo a las dimensiones especificadas por la ASTM para sus respectivos ensayos, con el fin de determinar sus propiedades mecánicas a tensión, impacto y flexión. Se obtuvo la densidad teórica y experimental de cada lámina para determinar la porosidad, la cual es un parámetro de calidad en este tipo de materiales. Dado que la interfaz juega un papel muy importante en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos se obtuvieron micrografías mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) de cada componente y unidos para evaluar si existía una buena interfaz entre el refuerzo principal y la matriz.

Comparando los resultados encontramos que es posible obtener compuestos Poliéster-fibras de vidrio- CaCO_3 con mejores propiedades mecánicas a las que no tienen cargas de carbonato de calcio que además resulta en un material compuesto más económico.

Una aportación de este trabajo es el desarrollo de los materiales compuestos en nuestro estado, estos materiales a veces son ignorados incluso por los ingenieros en materiales pero tienen un gran potencial económico y tecnológico para muchas aplicaciones, actualmente la

industria aeronáutica es la que más los utiliza ya que proporcionan muchas sus ventajas para innovar el transporte aéreo, los materiales compuestos permiten mayor autonomía de vuelo, reduce costos no solo porque ahorran combustible también requieren menos mantenimiento, incluso logran mayor confort al usuario ya que permite mayor humedad en la atmosfera del avión todo esto sin sacrificar la seguridad de la estructura del aeronave, incluso algunos materiales compuestos superan las propiedades mecánicas de algunos metales.

Antecedentes

Se mencionan trabajos pioneros y relevantes encontrados en la literatura que abordan la optimización de las propiedades mecánicas en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados por fibras y cargas de carbonato de calcio.

Se conoce desde hace tiempo el efecto reforzante que tienen las fibras de vidrio y las cargas de carbonato de calcio por separado en el poliéster insaturado, por ejemplo uno de los primeros estudios sobre el efecto de las cargas de carbonato de calcio en el poliéster insaturado es el de *P.G Babaevskii* publicado en 1987, donde concluyeron que a mayores porcentajes de carbonato de calcio en el poliéster resulta en un aumento en el módulo de rigidez y una disminución en la resistencia a la tensión, aunque los resultados dependen ampliamente de la distribución de las partículas. [1]

En el caso de las fibras de vidrio en el poliéster *Bahadur* utilizado en 1989 poliéster insaturado reforzado con fibras de vidrio cortas, la proporción de fibras de vidrio fue variada de 0 a 50%. Realizando ensayos de flexión concluyó que aumentando la proporción de fibra de vidrio en el poliéster mejora el módulo de flexión mientras la resistencia a la flexión inicialmente disminuye para luego incrementar una vez que se supera el 10% de fibras. [2]

Trabajos recientes como el de *Shao-Yun Fu* indica la importancia de la transferencia de esfuerzos de la matriz a las cargas para un aumento en las propiedades mecánicas de los compuestos de matriz polimérica reforzados por partículas, al mismo tiempo mencionan un tamaño crítico de las partículas, en la cual a partir de este tamaño las propiedades mecánicas se verían altamente mejoradas, debido a la mayor superficie de contacto entre el refuerzo y matriz, concluyen que la adhesión carga- matriz es crucial para aumentar la resistencia a la tensión del compuesto pero no para aumentar la rigidez del compuesto. [3]

La importancia de obtener propiedades en los polímeros más amplias ha obligado a experimentar con varios refuerzos en la misma matriz, M.T. Isa reporta que usar dos o tres tipos de fibras distintas en el poliéster, mejor conocido como compuestos híbridos, puede resultar en un incremento de las propiedades mecánicas, lo primero que obtuvieron fueron

compuestos de menor densidad ya que reemplazaban fibras de vidrio con fibras de kevlar y nylon las cuales son más ligeras, lograron obtener compuestos híbridos de poliéster-fibra de vidrio-fibra de kevlar con una resistencia a la tensión y flexión más elevada que los de poliéster-fibra de vidrio además de mayor estabilidad térmica. [4]

Para disminuir aún más el costo de los compuestos reforzados por fibra de vidrio y reducir desperdicios que no se degradan en el medio ambiente, M. Ramesh combino fibras naturales del yute y agave con las tradicionales de fibra de vidrio en poliéster, produjeron un compuesto híbrido de yute-vidrio-poliéster con una resistencia a la tensión de 229.54 MPa. [5]

Hipótesis

Al agregar cargas de carbonato de calcio en el poliéster aumenta el módulo de rigidez y permite reducir costos del material, mientras que agregar fibras de vidrio al poliéster mejorara las propiedades a tensión, flexión e impacto gracias al efecto de transferencia de esfuerzos, entonces es posible fabricar un compuesto Poliester-Vidrio-CaCO₃ que al optimizar el efecto de sus refuerzos este obtenga propiedades mejores mecánicas y sea más económico que el poliéster reforzado solamente por fibras de vidrio.

Objetivos

Mejorar las propiedades mecánicas del poliéster insaturado reforzado con fibras de vidrio mediante la adición de cargas de carbonato de calcio.

Objetivos Particulares

En concreto los objetivos específicos que se pretenden alcanzar en la presente tesis son los siguientes:

1. Producir distintas formulaciones del composito poliéster-vidrio-carbonato de calcio mediante la técnica de *hand lay up* y obtener probetas de tensión, flexión e impacto.
2. Obtener las propiedades mecánicas del compuesto así como del poliéster reforzado por fibras de vidrio y del poliéster reforzado con cargas de carbonato de calcio, con la finalidad de conocer el efecto de cada reforzante en el poliéster.
3. Establecer cuál es la formulación que presenta las mejores propiedades mecánicas a tensión, flexión e impacto así como la formulación con cargas de carbonato de calcio que sea más económica en materia prima que el poliéster reforzado solo por fibra de vidrio manteniendo sus propiedades mecánicas.
4. Determinar la densidad de cada lámina fabricada ya que es una medida de calidad.
5. Caracterizar mediante MEB las fibras de vidrio, las cargas de carbonato de calcio y la interfaz vidrio-poliéster.

Capítulo 1. Generalidades de los materiales compuestos

1.1 Introducción

El término *compuesto* en ciencia e ingeniería de los materiales se refiere a los materiales sólidos formados por al menos dos componentes en fases diferentes, donde por lo menos uno actúa como reforzante mientras otro actúa como la matriz. Esta definición incluye a los plásticos reforzados, concreto polimérico, plásticos con cargas, madera y muchos materiales más. Muchos compuestos están formados por una fase suave llamada matriz que envuelve a la segunda fase rígida y fuerte conocida como fase dispersa o más comúnmente como refuerzo.

De hecho la definición no satisface a todos los ingenieros en materiales ya que es muy amplia pero podemos indicar cuatro puntos claves que se aceptan generalmente para la definición de los materiales compuestos:

1. Consisten en dos o más materiales distintos que pueden ser separados mecánicamente y deben ser identificados fácilmente como fase dispersa y fase dispersante mediante la ayuda de un microscopio.
2. Se logran mezclando la matriz y la fase dispersa, los dos componentes son por lo general de distinta naturaleza y propiedades (ej. fibras cerámicas en una matriz polimérica).
3. Las propiedades del compuesto son diferentes y superiores a las de los componentes individuales.[14]
4. La fase dispersa debe estar en el orden de micrómetros, de modo que los materiales cerámicos y algunas aleaciones metálicas convencionales a pesar de estar formados por varios elementos no son considerados materiales compuestos.

Muchos consideran que la parte más importante de los materiales compuestos es el refuerzo o fase dispersa, ya que su función es mejorar las propiedades del compuesto, por lo tanto los refuerzos deben ser materiales duros, fuertes y rígidos, generalmente con morfología de fibra o de partícula. La otra fase llamada matriz o fase continua, es la que envuelve a todos los refuerzos y tiene varias funciones importantes incluyendo mantener los refuerzos en su lugar para preservar la orientación y resistencia deseada, transmitir los esfuerzos a los refuerzos, protegerlos de la abrasión entre ellos mismos, protegerlo de la humedad, de solventes, de la luz UV, etc.

Existe un límite práctico de la cantidad de fibra que puede usarse en un compuesto que es de cerca del 70% en volumen de fibras continuas y de 40% en fibras cortas; a mayores contenidos de fibra habrá muy poca matriz para proteger y envolver todas las fibras de forma eficaz y por lo tanto el compuesto formado así no será tan fuerte.

Los materiales compuestos están ampliando los horizontes de los ingenieros creando materiales más resistentes y livianos con propiedades que pueden controlarse para satisfacer las necesidades de diseño que se requieran. Sin embargo el concepto no es una fabricación humana, existen muchos ejemplos en la naturaleza, la madera es un compuesto natural que consiste en fibras de celulosa que tiene buena resistencia, envueltas en una matriz de otro polímero llamado lignina, resultando un material con propiedades útiles e interesantes.

Los compuestos que más llaman la atención y que se buscan para revolucionar las aplicaciones estructurales son artificiales. Una de las familias de materiales compuestos más usados son los plásticos reforzados por fibras de vidrio, en los que las fibras son envueltas en una matriz polimérica, las fibras son resistentes y rígidas pero frágiles mientras que el polímero es dúctil (o parcialmente dúctil). Como resultado el plástico reforzado por fibra de vidrio es resistente, flexible, relativamente frágil y con una baja densidad.

La primera patente en los Estados Unidos de América de los plásticos reforzados fue presentada en 1916 por Robert Kemp, (U.S.P. 1,393,541), siendo trabajador de Westinghouse Electric and Manufacturing Company, la intención de la patente fue para

usarse en aplicaciones estructurales en aeronaves, pero poco fue realizado con su tecnología hasta la llegada de la segunda guerra mundial cuando los plásticos reforzados por fibra de vidrio fueron puestos a prueba para usarse en la fabricación de radomos. [6]

Los materiales compuestos vienen aplicándose en la industria desde los años sesentas del siglo pasado cada vez de manera más extensiva. De todos los sectores, el aeroespacial es el mayor impulsor de la aplicación de estos materiales, dada la importancia que tiene el ahorro en peso en las aeronaves. Los beneficios de disminuir el peso en una estructura se relacionan directamente en el ahorro en consumo de combustible y con una capacidad de carga mejorada.

Se han observado diversas ventajas en los materiales compuestos además de su alta rigidez, resistencia y baja densidad, por ejemplo muestran una baja expansión térmica, lo que es crucial para estructuras en los satélites, otra ventaja es que pueden ser “invisibles” al radar tal como el material empleado en el bombardero B-2 mostrado en la figura 1 en el que más del 60% del volumen total de la aeronave es de este tipo de material.

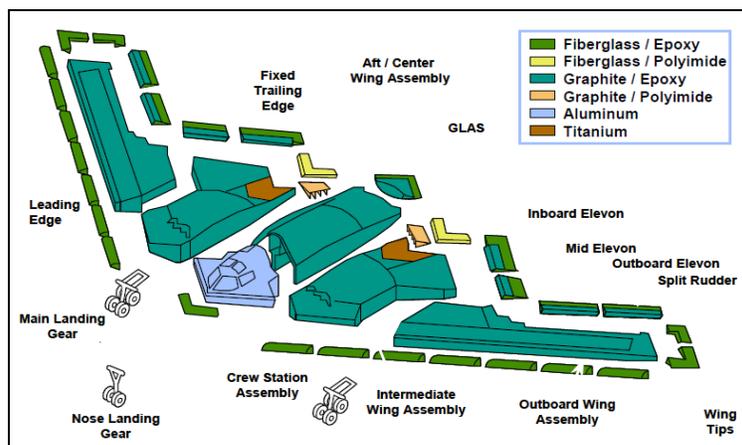


Figura 1. Aplicaciones de materiales compuestos en el bombardero B-2 [7].

1.2 Clasificación de los materiales compuestos

La rama que más impacto ha tenido dentro de los materiales compuestos es la de los reforzados por fibras. Entonces podríamos visualizar a los materiales compuestos como materiales sólidos compuestos por una matriz que rodea y mantiene en su lugar a las fibras, aunque existen otros tipos de reforzamientos y de matrices por lo tanto debemos clasificarlos adecuadamente.

Existe una amplia variedad de materiales compuestos debido a la generalidad de su definición. Los compuestos pueden clasificarse de distintas formas; por ejemplo por su origen, ya sea natural o artificial, también podrían clasificarse por la naturaleza de la matriz, que puede ser metálica, cerámica o polimérica. Los compósitos de matriz metálica (MMCs) tienen buena resistencia y rigidez pero son en general pesados, los compósitos de matriz cerámica (CMCs) son los de mayor rigidez pero son frágiles; finalmente, los compuestos de matriz polimérica (PMCs) son los más livianos y de mayor demanda comercial.

Una clasificación más práctica de los materiales compuestos se refiere al mecanismo de refuerzo, en esta clasificación se tienen los reforzados por partícula, por fibra y finalmente por *whiskers*.

1.2.1 Compuestos reforzados por partícula

Estos materiales reforzados por partícula son interesantes debido a su facilidad de procesado, sus propiedades mecánicas serán isotrópicas si las partículas están debidamente dispersas, este tipo de reforzamiento es el más común en los compuestos de matriz metálica. Estos compuestos se divide en; reforzados por partículas grandes y reforzados por partículas dispersas. La diferencia está en el mecanismo de reforzamiento, el termino grande en el primer tipo hace referencia que la partícula es tan grande que la cohesión entre la matriz y el refuerzo no se explica a nivel atómico, los plásticos con cargas grandes son compuestos de este tipo. Otro ejemplo es el concreto polimérico, figura 2, el cual consiste en un polímero termofijo como matriz y partículas rígidas de sílice como refuerzo.

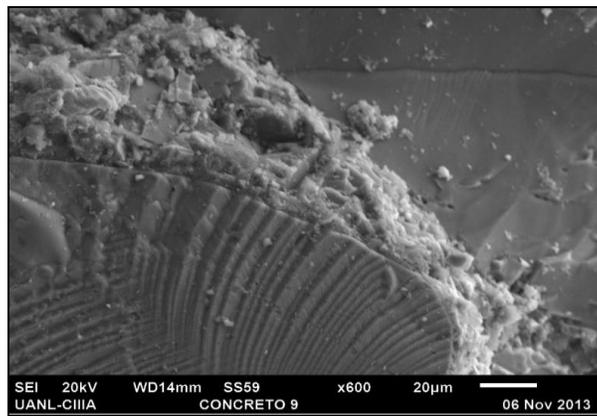


Figura 2. Concreto polimérico, imagen obtenida en el CIIA.

En el segundo tipo se encuentran los compuestos reforzados por nanopartículas dispersas, las partículas deben tener tamaños de 10 a 100 nanómetros, además deben ser inertes con la matriz incluso en altas temperaturas, las interacciones entre la matriz y las partículas son atómicas; en el caso de matrices metálicas las partículas de refuerzo impiden el movimiento de las dislocaciones aumentando la rigidez. Un ejemplo de estos compuestos son las aleaciones níquel con óxido de torio.

1.2.2 Compuestos reforzados por fibras

Los compuestos con la fase dispersa en forma de fibra son los más importantes tecnológicamente hablando, debido a que son los que pueden ofrecer mayor resistencia específica y rigidez específica [8].

A diferencia de materiales metálicos como el acero y los compuestos reforzados por partículas, que exhiben las mismas propiedades en todas las direcciones, los compuestos reforzados por fibra son “diseñables” es decir pueden fabricarse para que sean más resistentes en alguna dirección preferencial, por lo general se clasifican como ortotrópicos. Esto es posible porque las propiedades del compuesto reforzado por fibras dependen enormemente de la dirección en la que hayan sido colocadas, la resistencia y la rigidez de estos materiales son máximas en la dirección donde estén orientadas las fibras, pero se tendrá una resistencia mínima en una orientación perpendicular a las fibras. A pesar de este último inconveniente, los compuestos reforzados por fibras presentan muchas ventajas comparados con otros materiales convencionales.

El diseño de los compuestos reforzados es más difícil que el de los materiales isotrópicos convencionales ya que además de seleccionar las fibras, la matriz y el proceso de manufactura debe seleccionarse la dirección donde se desea que el compuesto presente la resistencia y rigidez máximas. Esta flexibilidad en el diseño se aprovecha para reforzar las estructuras que deben soportar cargas en direcciones críticas.

Para seleccionar las capas de fibras el diseñador tiene varias opciones, si se planea usar fibras largas, existen configuraciones donde todas las fibras apuntan hacia una sola dirección (unidireccionales), estas láminas tendrán la resistencia y la rigidez más alta en la dirección paralela a las fibras comparadas con otras configuraciones, sin embargo las propiedades en la dirección transversal serán muy pobres; mostrada en la figura 3.

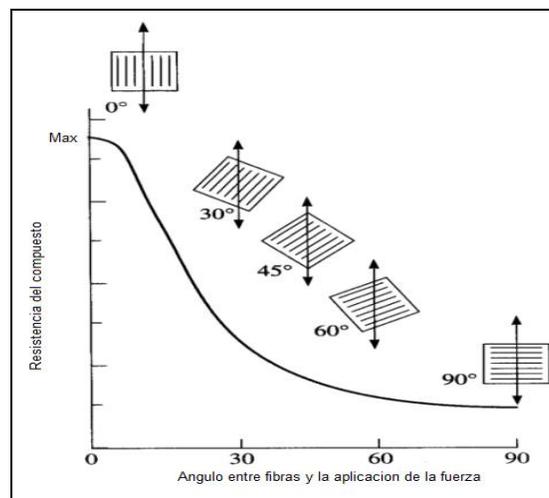


Figura 3. Efecto de la orientación de las fibras sobre la resistencia a la tensión del compuesto.[22]

Una lámina isotrópica (aparentemente) se puede obtener usando fibras discontinuas en una orientación aleatoria, los compuestos fabricados en esta configuración tienen una menor resistencia y rigidez que los que están reforzadas por fibras largas, sin embargo estas tendrán ciertas ventajas, siendo la principal un costo bajo. Las configuraciones más comunes de las fibras en los compuestos se muestran en la figura 4.

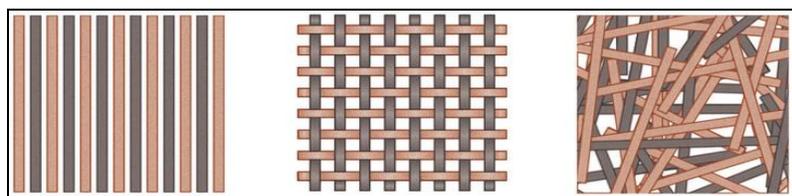


Figura 4. Configuraciones comunes de las fibras.

1.2.3 Compuestos reforzados por whiskers

Los “whiskers” o bigotes son cristales individuales con forma de fibras pero mucho más cortas, por lo general son cerámicos, estos refuerzos están casi libres de defectos, lo que les proporciona una resistencia cercana a la teórica. Estas mini fibras discontinuas suelen tener longitudes de 5 a 50 μm y tienen diámetros de 0.2 a 1 μm ; entre más largas mejor será su efecto reforzante pero más difícil será obtenerlas. Pueden ser de casi cualquier cerámico, pero los que mejores resultados han obtenido son de grafito, alúmina, carburo de silicio y carburo de boro [9].

A principios de los 1980's, investigadores de *Oak Ridge National Laboratory* desarrollaron estos compuestos agregando bigotes de SiC a una matriz de alúmina, los bigotes fueron obtenidos mediante pirólisis usando precursores orgánicos, con la incorporación de los bigotes mejoraron las propiedades mecánicas, en especial la resistencia al impacto y al choque térmico comparadas con sus correspondientes materiales no reforzados.

Existe mucho interés en estos refuerzos en la preparación con matrices poliméricas. Se ha encontrado que la incorporación de los bigotes podría permitir mayor resistencia que cuando se usan fibras discontinuas de vidrio, sin embargo el método de obtención de los bigotes y de la incorporación con la matriz suele ser muy costoso por lo cual estos refuerzos no son comunes, además algunos bigotes pueden provocar problemas a la salud.

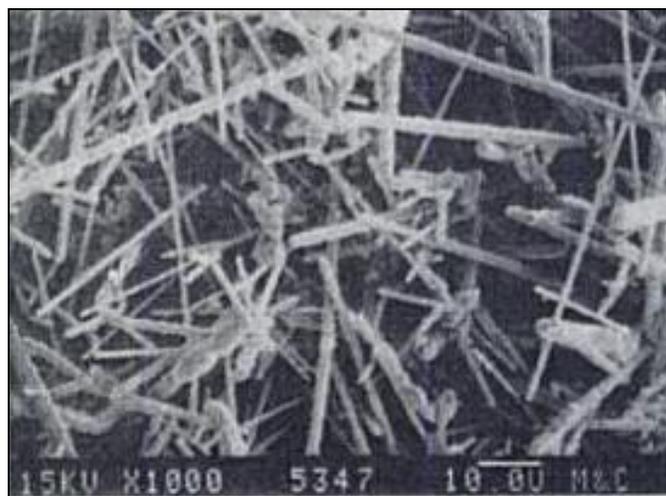


Figura 5. Bigotes de SiC [10].

1.3 Breve comparativa entre materiales

Existe un rápido aumento en el uso de materiales compuestos reforzados por fibra en muchas aplicaciones ingenieriles y existen indicadores de que la tendencia seguirá aumentando. El rápido aumento del uso de estos materiales se debe a que están reemplazando materiales convencionales, principalmente metales y plásticos. Esto sugiere que en algunas situaciones los materiales compuestos tienen propiedades superiores a los materiales convencionales. La tabla 1 compara las propiedades de algunos materiales ingenieriles contra algunos compuestos.

Tabla 1. Propiedades de algunos materiales ingenieriles [11].

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo de rigidez (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Modulo específico (GPa/ g/cm ³)	Resistencia específica (MPa/ g/ cm ³)
Aleación Al-Zn-Mg alta resistencia	2.8	72	503	25.71	180
Acero templado	7.85	207	2050-600	26.36	261-76
Aluminio	2.7	70	180	25.92	66.66
Nimonic 90	8.18	204	1200	24.9	147
Nylon 6,6	1.14	2	70	1.8	61
Poliéster termofijo, tipo orto	1.35	3.45	55	2.55	40.74
Nylon-Fibra vidrio, Vf=0.25	1.47	14	207	9.5	141
Poliéster-F vidrio, aleatorias, Vf=0.2	1.55	8.5	110	5.5	71
Poliéster-F vidrio, unidireccional, Vf=0.5	1.93	38	750	19.7	390
Fibra de carbono-epóxica, unidireccional, Vf=0.60	1.62	220	1400	135	865

En la tabla 1 no se incluye la elongación a la rotura de los materiales compuestos reforzados por fibra pero por lo general es menor a los metales con resistencias y rigidez equiparables. A simple vista no tienen una clara ventaja sobre la rigidez y la resistencia frente a los metales, hasta que se observa su módulo elástico por unidad de peso (módulo específico) y su resistencia por unidad de peso.

En términos generales podemos comparar e identificar diferencias entre los materiales así como sus restricciones entre las cuatro clases de materiales, tenemos de forma simple:

1.3.1 Polímeros

El termino polímero viene del griego “*poly*” que significa muchos y “*mero*” que significa unidades. Un polímero consiste literalmente de muchas unidades repetidas.

La forma más simple de clasificar a los polímeros toma en cuenta si forman entrecruzamientos o no. Así tenemos a los termofijos (también llamados termoestables) y los termoplásticos. Los termoplásticos pueden moldearse y reciclarse porque al calentarlos su estructura química básica no cambia, estos suelen tener comportamiento viscoelástico y no tienen una relación lineal en su curva esfuerzo-deformación, los termofijo son la antítesis de los anteriores, si se calientan demasiado se degradan, esto imposibilita la capacidad de reciclado, pero las cadenas entrecruzadas forman una red tridimensional que aporta rigidez, resistencia y dureza al polímero. En un ensayo a la tensión los polímeros termoestables presentan un comportamiento frágil.

Las propiedades físicas de los polímeros son altamente dependiente de la temperatura, esto es cierto para todos los materiales, pero en los polímeros el efecto es más notorio. Todos los plásticos exhiben una caída en la rigidez en la temperatura de transición vítrea. Esta transición está asociada con un aumento en la movilidad de las cadenas poliméricas.

Entre sus ventajas, tenemos una baja densidad, gran resistencia química ya que no son afectados por el agua ni por ácidos o bases inorgánicas, solamente los agentes muy oxidantes pueden degradarlos. Son fáciles y baratos de producir, además pueden tomar formas complejas. Entre las desventajas los polímeros no son térmicamente estables, tienen bajas propiedades mecánicas relativas, son inflamables y pueden emitir gases tóxicos cuando se queman. Un punto fundamental de los polímeros (y de cualquier compuesto polimérico) es que sus propiedades dependen de las circunstancias bajo las cuales fue polimerizado.

1.3.2 Cerámicos

El termino deriva del griego “*keramicos*” que significa sustancia quemada. Pueden clasificarse en tradicionales y avanzados, ambos tienen una gran cantidad de porosidad que afecta sus propiedades físicas. La mayoría de los cerámicos son excelentes aislantes térmicos y eléctricos, además tienen las temperaturas de fusión más elevadas. Los cerámicos tienen una buena resistencia a la compresión y rigidez, estas propiedades pueden ser contraproducentes ya que hace que estos materiales sean difíciles de mecanizar por medios tradicionales, por esta razón se producen por síntesis.

El principal problema de los cerámicos es su fragilidad y que su resistencia puede variar incluso a la misma temperatura debido a los defectos, su ductilidad bajo cargas de tensión no es nula. Para aplicaciones a alta temperaturas siguen siendo la mejor elección debido a su estabilidad térmica. Otra desventaja es su gran peso por unidad de volumen. Una aplicación tecnológicamente importante de los cerámicos son los impulsores en motores de turbinas.

1.3.3 Metales

Los metales son materiales que se caracterizan por ser buenos conductores de calor y electricidad, además son resistentes y dúctiles pero también son sensibles a la corrosión y a las cargas de fatiga. Los metales deben su gran versatilidad como materiales de ingeniería a que pueden ser deformados plásticamente y tienen capacidad de ser 'mejorados' por una gran cantidad de técnicas que van desde inhibir el movimiento de sus dislocaciones hasta tratamientos térmicos. Es importante recordar que como consecuencia de la naturaleza no direccional del enlace metálico, las dislocaciones son fácilmente desplazadas en los metales puros y por lo tanto son suaves, pero agregando otros elementos metálicos las dislocaciones son restringidas en su deslizamiento, incrementado la resistencia.

Una aleación es un metal que contiene adiciones de uno o más metales u otros elementos no metálicos. Las aleaciones metálicas convencionales como el acero o el Al 2024 no se consideran como material compuesto. La fragilidad y altas densidades de algunas aleaciones de alta resistencia impiden aplicar estos materiales a su máximo potencial en aplicaciones

estructurales. En los metales los métodos de manufactura pueden ser lentos y costosos, a veces requieren trabajos finales como maquinados.

El material metálico más usado en la industria aeroespacial es el aluminio y sus aleaciones desde que reemplazó a la madera a principios del siglo pasado, el atractivo de este metal es su costo, su bajo peso, así como su alta resistencia lograda con tratamientos térmicos. Sin embargo, el dominio de las aleaciones de aluminio en el futuro de la aviación se ve opacado por el incremento actual del uso de materiales compuestos.

Para las aplicaciones donde el peso es un factor muy importante, muchos metales pueden ser bastante pesados, por ejemplo el hierro tiene una densidad de 7.9 g/cm^3 , el cobre 8.9 g/cm^3 mientras que el titanio tiene una densidad de 4.5 g/cm^3 y el aluminio de 2.7 g/cm^3 , para la aviación civil los materiales pesados son un costo extra y para la aviación militar representan una reducción en la maniobrabilidad y carga efectiva, por eso existe un fuerte incentivo para usar materiales de bajas densidades en la industria aeroespacial, conscientes además del ahorro en energía. La figura 6 compara algunas propiedades físicas entre el acero, el aluminio y los materiales compuestos.

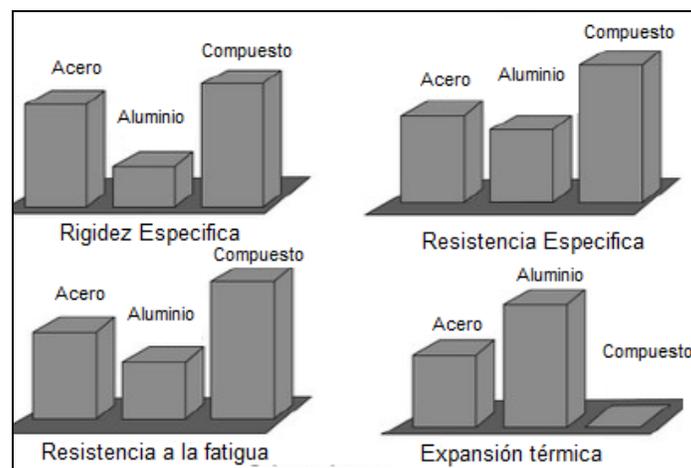


Figura 6. Comparación entre acero, aluminio y compuestos [12].

1.4 Ventajas y desventajas de los materiales compuestos

Los ingenieros siempre buscan materiales que sean confiables, resistentes, livianos y tolerantes al ambiente donde trabajarán, los materiales compuestos pueden diseñarse específicamente para estas exigentes especificaciones. Entre las ventajas más destacadas tenemos:

1. Los compuestos son direccionales, se puede adaptar la dirección de las fibras en la orientación deseadas para que proporcionen la resistencia y rigidez en la orientación deseada.
2. Alta resistencia específica así como alta rigidez específica.
3. Fácilmente moldeables a formas complejas.
4. Excelente resistencia a la fatiga.
5. Un coeficiente de dilatación térmica mucho menor que el de los metales. Por lo tanto exhiben una mejor estabilidad dimensional en un rango de temperatura más amplio.
6. Baja conductividad eléctrica (excepto en las que integran fibras de carbono).
7. Bajo costo en compuestos comerciales (fibra de vidrio).
8. No sufren corrosión, aunque muchas matrices son capaces de absorber humedad del ambiente provocando cambios dimensionales y esfuerzos internos.
9. Los métodos de manufactura son diferentes a los usados en los metales, estos requieren menos energía y fuerza, además no producen ruido.

Por otro lado las desventajas que presentan los materiales compuestos son:

1. Dificultades en la manufactura, algunos procesos siguen siendo manuales y por lo tanto muy lentas.
2. Existe una carencia en reglas de diseño confiables.
3. Pueden presentar una gran cantidad de huecos que degrada sus propiedades físicas.
4. Las uniones entre dos partes estructurales no son confiables, por eso se evita usar remaches y tornillos.
5. Algunas matrices son vulnerables a los solventes y a altas temperaturas.

6. Pueden presentar daños ocultos.
7. Alto costo en los compuestos avanzados, principalmente los que se obtienen por autoclave.
8. Problemas con el reciclaje, particularmente en los compósitos de matriz termofija.
9. Residuos tóxicos.
10. Los métodos de manufactura son diferentes que los usados en los metales, se requiere nueva maquinaria.
11. Las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados por fibras serán críticas en direcciones donde no estén orientadas las fibras.
12. Muestran fallas de muchos tipos y algunas de ellas pueden ser ocultas, ver figura 7.

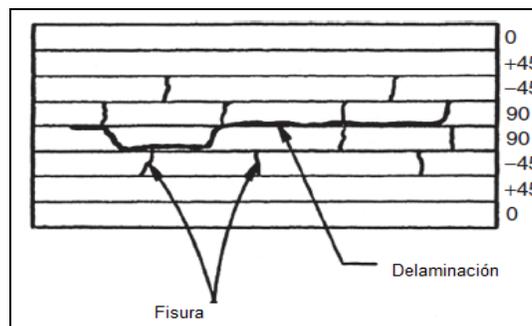


Figura 7. Daños internos en una lámina de material compuesto [6]

La tabla 2 muestra un resumen comparativo de los materiales convencionales y las distintas familias de materiales compuestos, cabe recordar que no existe un material que sea capaz de satisfacer todas las necesidades de los ingenieros y científicos en materiales.

Tabla 2. Resumen comparativo entre materiales.

Material	Resistencia a la tensión	Resistencia compresión	Rigidez	Ductilidad	Estabilidad térmica	Densidad	Costo
Metales	Alta	Alta	Media	Alta	Alta	Alta	\$\$
Cerámicos	Baja	Muy alta	Muy alta	Nula	Muy alta	Media/alta	\$\$\$
Polímeros	Muy baja	Muy baja	Baja	Alta	Baja	Muy baja	\$
PMCs	Alta	Alta	Alta	Baja	Medio	Baja	\$\$\$
MMCs	Alta	Alta	Alta	Baja	Alta	Media	\$\$\$\$
CMCs	Media	Muy alta	Muy alta	Baja	Muy alta	Alta	\$\$\$\$

Capítulo 2. Refuerzos

Se describirán los tres tipos de fibra más comúnmente utilizados en la industria de los materiales compuestos, las cuales son fibras de vidrio, fibras de carbono y fibras de aramida, aunque existen otros tipos de fibras que no serán descritas ya que su uso no está generalizado por ejemplo las fibras de boro, carburo de silicio, polietileno de ultra alto peso molecular y otras.

2.1.1 La resistencia de las fibras

Es bien conocido que hay una gran diferencia entre la resistencia que exhibe un material en la práctica y en los valores calculados teóricamente para ese mismo material. En el caso del vidrio que está bien estudiado, se sabe que la resistencia está determinada no por la fuerza de sus enlaces iónicos y covalentes, sino por los defectos que se encuentran en su interior y en la superficie que van desde microscópicas fisuras de Griffith hasta rayones producidos por su manipulación. Estas microfisuras actúan como centros de tensión, así al someter el vidrio a una fuerza exterior la rotura se produciría antes si existen tales micros fisuras, iniciándose precisamente a partir de éstas. [24]

Esto no solo ocurre en el vidrio, todos los materiales poseen defectos que afectan sus propiedades físicas. Si el tamaño de los defectos pudiera reducirse desde el proceso de fabricación el nivel de resistencia aumentaría, por ejemplo la fibra de vidrio es fabricada por el paso de vidrio reblandecido por unos diminutos poros que son enfriados rápidamente para formar filamentos “sólidos” finos con diámetros del orden de micrómetros, la superficie recién formada resultante está libre de defectos macroscópicos y la fibra es tan delgada que no puede contener grandes defectos como los que se encuentran en productos grandes tales vidrios usados en las ventanas.

Por regla general, entre más fino se pueda hacer un filamento menos lugar habría para los defectos y más resistente será; este efecto se representa en la figura 8. En el caso de las fibras, estas llegan a ser tan delgadas que su manipulación puede ser difícil, por eso las fibras están agrupadas en hebras de fibras torcidas o rectas.

2.2 Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio se encuentran entre los materiales industriales más versátiles conocidos, además son producidos fácilmente y la materia prima para fabricarlas está disponible de manera prácticamente ilimitada. Este material es el refuerzo inorgánico más importante para los compuestos reforzados por fibra. [26]

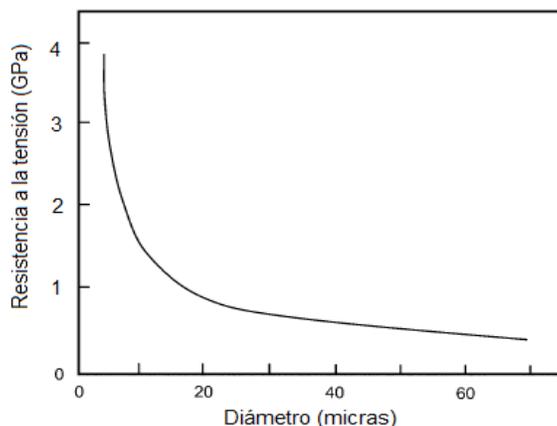


Figura 8. Efecto en la resistencia de las fibras de vidrio en función al diámetro [12].

La principal ventaja de estas fibras es su bajo costo, su alta resistencia a la tensión, alta resistencia química y excelente aislamiento térmico y eléctrico, además tienen una elongación a la rotura superior a las fibras de carbono, por lo que promueve una mayor resistencia al impacto en el compuesto.

Los vidrios inorgánicos pueden definirse como una mezcla de óxidos, en el caso de refuerzos en forma de fibra se han usado una variedad de composiciones químicas y evidentemente cada una ofrece diferentes propiedades, las más comunes están basadas en sílice con adiciones de óxidos de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio. Las combinaciones típicas para los dos tipos principales de fibra de vidrio se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Óxidos que componen las fibras de vidrio E y S [13].

Tipo	Sílice	Alúmina	CaO	MgO	B₂O₃	Na₂O
E	54.5	14.5	17	4.5	8.5-9	0.5-1
S	64	26	-	10	-	-

Las fibras de vidrio E: su nombre deriva a que son aislantes eléctricos, poseen buenas propiedades mecánicas, son las más económicas y por lo tanto las más comunes. Muy ampliamente utilizadas como refuerzo en placas de circuitos impresos. Estas fibras deben cumplir los requerimientos de la especificación D-578, esto garantiza que tenga la misma composición química y rendimiento. La especificación establece la composición para dos tipos de fibras de vidrio E, una para aplicaciones generales y otra para circuitos impresos electrónicos. El diámetro de las fibras E por lo general está entre 9 y 15 micrómetros.

Las fibras de vidrio C: su nombre deriva a que son resistentes a los químicos, son ideales para aplicaciones navales y tanques para almacenar químicos.

Las fibras de vidrio S: empleadas en estructuras de elevadas necesidades mecánicas, tienen el módulo de rigidez y la resistencia a la tracción más alto entre todas las fibras de vidrio, son las fibras de vidrio grado militar y se usan en componentes aeronáuticos. Sin embargo son las de mayor costo, una versión más accesible llamada S-2 mantiene la resistencia a la tensión sin las estrictas especificaciones militares.

Existe una combinación llamada fibras de vidrio "A" que es el tipo más común de vidrio, usado principalmente como ventanas y botellas, pero no se usa como refuerzo debido a su mala resistencia química. A diferencia del vidrio sódico-cálcico (tipo A) las composiciones de las fibras E, C y S tienen mayor cantidad de sílice que aporta resistencia mecánica y química, estas composiciones evitan cantidades de óxido de sodio y óxido de potasio que se usan como fundentes. En su manufactura, las fibras de vidrios se forman por fusión de la materia prima en un horno cerca de 1250 °C, la masa fundida pasa por unos orificios de platino, luego las fibras son enfriadas rápidamente con aire humidificado con el fin de que los átomos no tengan tiempo de ordenarse. Sin embargo, para efectuar esta operación es necesario usar unas composiciones determinadas que faciliten el proceso.

El óxido de sodio actúa como fundente, facilitando el proceso de fundición de la sílice modificando también la viscosidad, por otra parte su presencia afecta la resistencia química del vidrio, por ello se introduce un óxido alcalinotérreo. El control del diámetro de la fibra se logra ajustando el diámetro de los poros, la velocidad del devanado y la viscosidad del vidrio que depende de la temperatura y la composición. Un diagrama simple de la manufactura de fibras de vidrio se muestra en la figura 9.

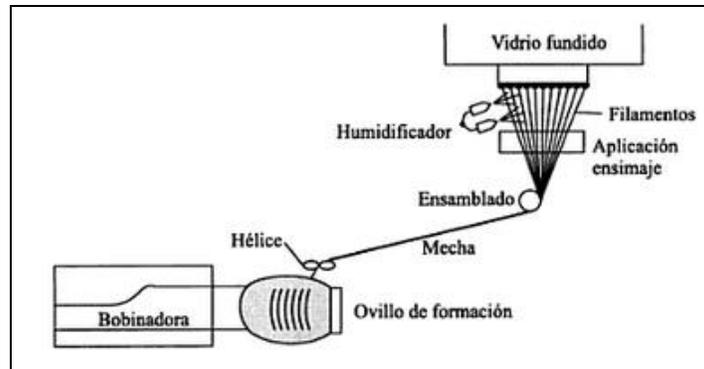


Figura 9. Detalle de la fabricación de las fibras de vidrio [11].

Las fibras reciben un tratamiento superficial antes de ser enrolladas, el recubrimiento es una mezcla de lubricantes que previene el daño por abrasión entre las fibras, agentes antiestáticos, ligantes (solo en fibras aleatorias) y por último agentes de acoplamiento.

Las propiedades mecánicas del vidrio son determinadas por la estructura tridimensional de los óxidos constituyentes, y por los enlaces covalentes entre el silicio y el oxígeno. Una idea de la estructura en tres dimensiones puede ser obtenida de la figura 10 que representa la estructura del vidrio en dos dimensiones. Cada poliedro es la combinación de átomos de oxígeno que rodean a uno de silicio y están unidos por enlaces covalentes. La estructura de la red y la resistencia de cada enlace individual pueden cambiar por la adición de otros óxidos metálicos. Las fibras de vidrio son isotrópicas a diferencia de las fibras de aramida y las de carbono que son altamente cristalinas y anisotrópicas.

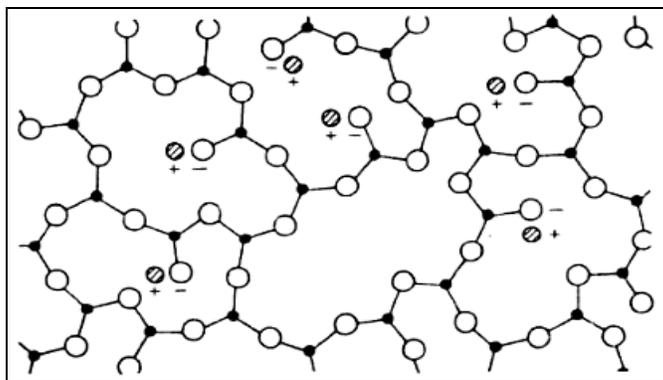


Figura 10. Representación en dos dimensiones de un vidrio de silicato de sodio [14].

Las propiedades físicas de las fibras de vidrio se muestran en la tabla 4. La temperatura de reblandecimiento de las fibras de vidrio E es del orden de 650 °C, aunque las propiedades de las fibras de vidrio E disminuyen rápidamente cuando se alcanzan temperaturas de 200 °C.

Es importante mencionar que las propiedades del vidrio son reversibles al bajar la temperatura. Bajo condiciones muy extremas el vidrio puede formar pequeños cristales esto perjudicaría las propiedades mecánicas.

En cuanto a su presentación las fibras de vidrio comerciales por lo general vienen en forma bidireccional o en otra presentación llamada *mats* de fibras aleatorias, los *mats* son fieltros de hilos cortados, entrelazados al azar y aglomerados entre sí por un ligante químico, tienen alta absorción de resina y es la presentación más económica de fibras.

Tabla 4. Propiedades típicas de las fibras de vidrio [11].

<i>Tipo</i>	<i>Vidrio A</i>	<i>Vidrio E</i>	<i>Vidrio S</i>
Densidad relativa	2.5	2.54	2.48
Modulo rigidez (GPa)	69	72.5	86
Resistencia tracción (GPa)	3.1	3.45	4.59
Elongación de Rotura %	-	4.8	5
Coefficiente de expansión térmica ($10^{-6} / K$)	8.6	5	4-5.1

2.2.2 Fibras de Carbono

Las fibras de carbono fueron utilizadas por Thomas Alva Edison en el siglo XIX como filamento para sus bombillas, usando fibras de bambú y de algodón como precursores, sin embargo en este tiempo no tenían la resistencia característica de las fibras actuales y el tungsteno termino reemplazándolas en los bombillos, no fue sino hasta los años 1960's que se reconoció la resistencia de estas fibras gracias a los trabajos de Shindo en Japón y de Watt en el Reino Unido. [16]

La resistencia de las fibras de carbono se debe a su estructura, en un cristal de grafito los átomos de carbono están organizados en un arreglo hexagonal como se muestra en la figura 12, cada capa se apila encima de otra en una secuencia *ABAB*. La distancia entre cada capa o plano es de 3.35 Å, la distancia entre átomos adyacentes es de 1.42 Å. Los átomos de carbono están unidos por fuertes enlaces covalentes pero el enlace entre planos corresponde a débiles fuerzas de Van Der Waals, el resultado de la estructura es una alta anisotropía.

Estructuralmente las fibras de carbono consisten principalmente en grafito y una pequeña porción de carbón amorfo, de hecho la estructura se le conoce como grafito turboestrático. La forma cristalina o grafitica, figura 11, es la que aporta las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas a las fibras, mientras que la forma amorfa se evita, ya que degrada las propiedades físicas.

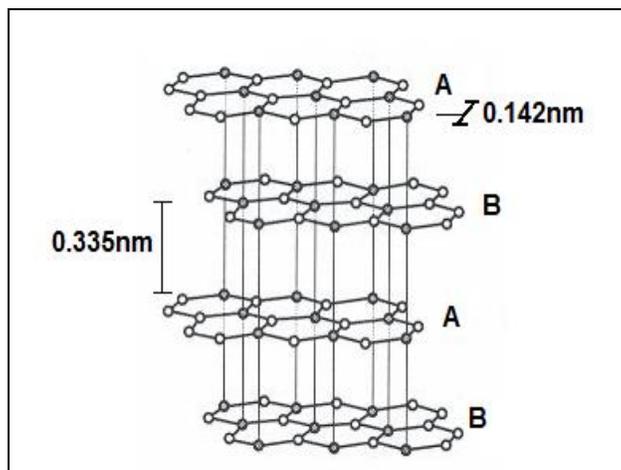


Figura 11. Arreglo de los átomos de carbono en un cristal de grafito [14].

Para obtener fibras de grafito con alto módulo de rigidez, la estructura laminar del grafito debe estar perfectamente alineado de forma paralela al eje de las fibras. En la práctica los cristales son muy pequeños y se alinean en múltiples direcciones.

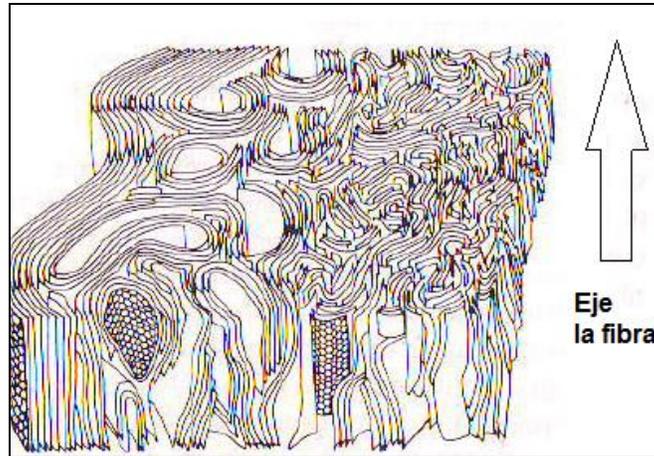


Figura 12. Representación de la estructura de la fibra de carbono basada en microscopía electrónica [14].

Las propiedades de las fibras de carbono y grafito dependen del grado de perfeccionamiento en el alineado de las capas de grafito obtenido en los tratamientos térmicos. Las imperfecciones en el alineamiento como se muestran en la figura 12 resultan en huecos donde se concentrarían los esfuerzos reduciendo considerablemente su resistencia. El arreglo de las capas hexagonales en las fibras también es importante en la sección transversal ya que afecta las propiedades en esa dirección.

Como precursor para fabricar fibras de carbón tenemos el poliacrilonitrilo (PAN), una mesofase del alquitrán (brea) y el rayón (celulosa). El PAN es el precursor más común utilizado para obtener fibras de carbono, es un termoplástico producido por la técnica de hilado húmedo. Los pasos para producir fibras de carbono se resumen en los siguientes puntos:

1. *Estabilización o pre oxidación:* La mayoría de las fibras de carbono son hechas a partir de PAN. Las fibras de PAN son termoplásticas de color blanco, deben calentarse a 300 °C en una atmosfera de oxígeno para entrecruzar las moléculas.

- 2a. *Carbonización:* Para obtener fibras con módulo de rigidez bajo e intermedio, la fibra se

pirolisa a una temperatura de 1000 a 1500 °C en una atmósfera de nitrógeno por 60 segundos.

2b. *Grafitización*: Si se desean fibras de alto módulo, las fibras pasan por un segundo tratamiento térmico en el que se calientan a una temperatura de 2000 a 3000°C en una atmósfera de Ni/Ar por 30 segundos. En esta etapa las fibras se reducen en diámetro y pierden cerca del 50% de masa.

3. *Tratamiento superficial*: Las fibras pasan por un tratamiento superficial con la finalidad de agregarle grupos funcionales a la superficie para mejorar la adhesión con la resina. Muchos fabricantes usan una oxidación electrolítica para lograr esto. Por último las fibras pasan por un lubricante para evitar daños en la superficie por el manejo o abrasión entre las mismas.

El costo de las fibras de carbono es directamente proporcional al tratamiento térmico al que fueron sometidas, que influye directamente en el módulo de rigidez de las fibras. Las propiedades típicas de las fibras de carbono se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades típicas de las fibras de carbono [14].

<i>Propiedad</i>	<i>Tipo I (bajo módulo)</i>	<i>Tipo II (medio módulo)</i>	<i>Tipo III (alto módulo)</i>
Densidad g/cm ³	1.7	1.74	1.85
Resistencia tensión MPa	3000-5600	4800	2400-3000
Módulo de rigidez GPa	235-295	296	345-520
Diámetro micrómetros	6-8	6-9	7-9

2.1.3 Fibras de Aramida

Las fibras de aramida son fibras orgánicas con una rigidez y resistencia intermedia entre las fibras de carbono y de vidrio, las fibras de aramida tienen la distinción de poseer la resistencia a la tensión específica más alta entre todas las fibras comercialmente disponibles [25]. Las primeras fibras de aramidas fueron producidas por Du Pont bajo el nombre comercial de Kevlar, las cuales tenían como objetivo ser refuerzo de llantas y de plásticos, actualmente son un importante componente en numerosos compuestos, usado en aplicaciones tecnológicamente avanzadas como chalecos balísticos, cuerdas deportivas, refuerzo en cables de fibra óptica, trajes espaciales, etc. Por otro lado tienen como desventajas una pobre resistencia a la compresión y dificultad de cortarlas o maquinarlas.

La estructura molecular de las fibras de aramida está altamente cristalizada, véase la figura 13, consiste en unidades repetitivas de amidas (-NH) y de anillos aromáticos, estos últimos aportan rigidez y resistencia a las fibras así como estabilidad térmica, propiedades que otras fibras orgánicas como el nylon no poseen, los enlaces entre moléculas adyacentes son de hidrogeno entre oxígenos e hidrógenos, dando malas propiedades transversales a la fibras, es por eso que bajo cargas de compresión estas fibras muestran una pobre resistencia.

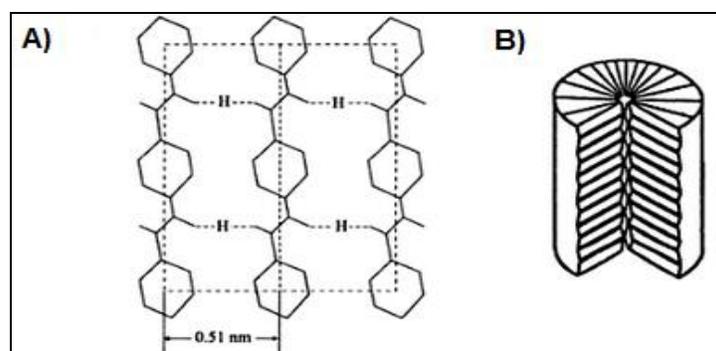


Figura 13. A) Enlaces covalentes a lo largo del eje de las fibras y enlaces de hidrogeno perpendicular al eje de las fibras. B) Esquema de los plegamientos de las láminas de aramida ordenadas en una fibra [16].

Las propiedades de las fibras de kevlar se muestran en la tabla 6. Las fibras de aramida muestran coeficientes negativos de expansión térmica al igual que las fibras de carbono, su fractura es dúctil a diferencia de las fibras de vidrio y de carbono que se fracturan de forma frágil, al calentarse no se funden, empiezan a carbonizarse a 420 °C.

Tabla 6. Propiedades típicas de las fibras de Kevlar [16].

<i>Propiedad</i>	<i>Kevlar 149</i>	<i>Kevlar 49</i>	<i>Kevlar 129</i>	<i>Kevlar 29</i>
Densidad relativa	1.44	1.44	1.44	1.44
Módulo de rigidez GPa	186	124	96	68
Resistencia a la tensión MPa	3440	3700	3380	2930
Elongación a la rotura %.	2.5	2.8	3.3	3.6

El factor más interesante que ha conducido al rápido desarrollo de los materiales compuestos es la reducción en peso que se puede conseguir a partir de fibras de baja densidad y de alta resistencia. La figura 14 muestra un resumen comparativo de las propiedades de las principales fibras, las fibras de aramida son las de menor densidad, y por lo tanto puede aprovecharse esa característica para obtener compuestos más ligeros.

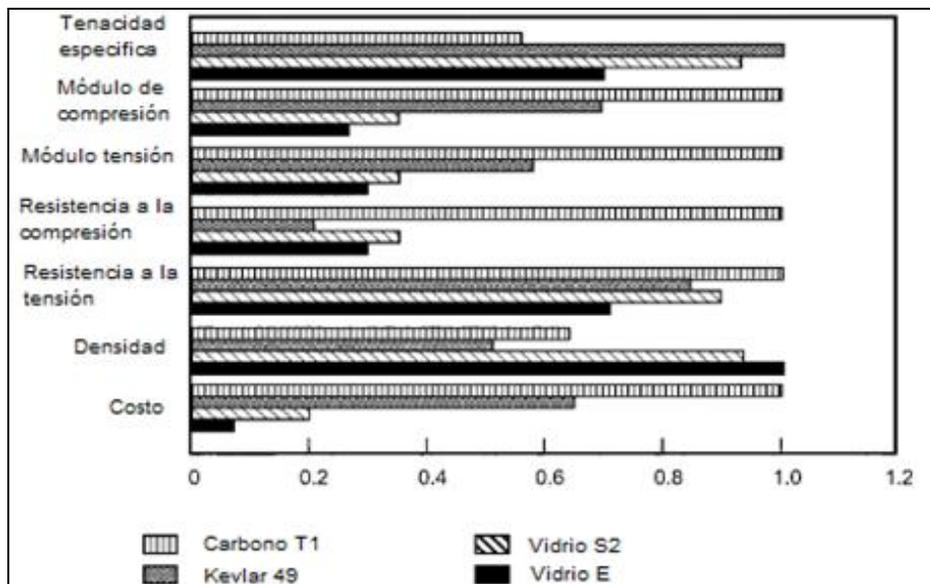


Figura 14. Comparación entre las principales fibras [13].

2.2 Cargas minerales

El termino carga se refiere a todos los materiales sólidos generalmente en forma de partícula que se usan para rellenar (reemplazar volumen) a los polímeros con el objetivo de reducir costos, los pigmentos no se incluyen en la definición, las fibras tampoco ya que en muchos casos las fibras son mucho más caras que las matrices. [19]

Las cargas son materiales rígidos que no son miscibles con la matriz, se usan en concentraciones relativamente altas, el propósito principal de usar las cargas es el de reducir costos. Sin embargo las cargas tienen efectos secundarios en las propiedades, muchas veces estos pueden ser beneficiosos mejorando la rigidez, la estabilidad del polímero, la calidad superficial y la dureza.

Existe una gran diversidad de cargas y pueden clasificarse por su naturaleza química orgánica o inorgánica, también podrían clasificarse por su razón de aspecto, es decir la relación entre el ancho y el largo de la partícula. Entre las cargas inorgánicas se tiene óxidos como el vidrio y la sílice, como hidróxidos se tiene el hidróxido de magnesio, en las sales tenemos el carbonato de calcio y como silicatos tenemos el talco y la mica. Entre las cargas orgánicas están las cargas de carbón, polímeros naturales como el algodón y polímeros sintéticos como las poliamidas.

Las cargas pueden modificar las propiedades físicas de los polímeros, generalmente mejoran la rigidez, la dureza, la estabilidad térmica, ayudan a reducir el encogimiento en el curado y algunas cargas pueden cumplir funciones especiales como una degradación acelerada en el medio ambiente.

El principal uso de las cargas se da en la industria de la construcción, seguida del transporte y en muchos productos de consumo como baños, electrónica y empaques plásticos. Los parámetros de las cargas en compuestos poliméricos que pueden mejorar las propiedades son las características de la carga (geometría, tamaño, relación de aspecto), la interfaz y el método de incorporación de las cargas al polímero y su distribución en la forma final del producto.

2.2.1 Carbonato de calcio

El carbonato de calcio es el mineral más común depositado en las rocas, entra en la categoría de oxisal, se encuentra en las capas superiores de la corteza terrestre hasta una profundidad de 15 km. El mármol, la piedra caliza y la tiza son las principales fuentes del carbonato de calcio. [17]

Debido a su gran abundancia, el carbonato de calcio es bastante económico, se usa para reducir el costo en muchos plásticos, como en el PVC, en el que puede llegar a abarcar cerca del 50% del volumen, también se usa mucho en la industria del papel.

El carbonato de calcio posee tres diferentes estructuras cristalinas, la más común es la calcita, con una estructura trigonal romboédrica, la aragonita y la vaterita son inestables y terminan convirtiéndose en calcita. La tabla 7 muestra las propiedades físicas de la calcita.

Tabla 7. Propiedades típicas del carbonato de calcio [17].

Densidad relativa	2.71
Dureza Mosh	3
Módulo de rigidez	35 GPa
Solubilidad en agua	0.0013 g/100ml
Solubilidad en ácido	Alta
Conductividad térmica	2.5 W/mK

Las ventajas de agregar el carbonato de calcio a los plásticos además del aumento de rigidez son el ahorro en costo, mayor estabilidad térmica, disminución del encogimiento al curado, mayor calidad superficial y dureza.

Sin embargo, agregar cargas de carbonato de calcio también tiene efectos negativos en los plásticos; por lo general al incrementar el porcentaje de carga en el poliéster resulta una disminución de la resistencia final del compuesto tanto a tensión como a flexión e impacto, también se reduce la elongación a la rotura. El carbonato de calcio no debe usarse en aplicaciones de resistencia a la corrosión ni en aplicaciones que deban ser retardantes al fuego. [20]

Capítulo 3. Matrices Poliméricas

3.1 Importancia de la matriz

La matriz es una parte vital del compuesto y realiza varias funciones. El rol de la matriz en los materiales compuestos es diferente al de la fibra. En los compuestos reforzados por partículas las matrices sirven para mantener el compuesto en una masa sólida, pero en el caso de compuestos reforzados por fibra, la matriz es responsable de una variedad de funciones que deben analizadas para entender lo que pasa dentro del compuesto una vez que se le aplican cargas mecánicas. Consideraremos todas estas funciones para las matrices en los compuestos reforzados por fibra:

- La matriz mantiene las fibras unidas y en su lugar.
- Los esfuerzos que se producen en la matriz son transferidos a través de la interfaz.
- Aporta resistencia a tensión, compresión, flexión e impacto aunque en segundo plano.
- Provee soporte lateral a las fibras bajo esfuerzos de compresión.
- La matriz protege a las fibras de la abrasión entre ellas mismas.
- La matriz rodea y aísla cada fibra una de otra para que actúen de manera individual. Cuando un material es usado en forma de fibra existe un beneficio cuando estas están separadas, así al fallar una fibra el compuesto con múltiples fibras separadas no fallara de forma catastrófica.
- Una matriz más dúctil que el refuerzo provee una resistencia a la generación y propagación de grietas.
- Ofrece resistencia al medio ambiente.

- Proveen la forma final al compuesto.

En teoría podría utilizarse cualquier material polimérico como matriz, sin embargo en la práctica solo se usa una cantidad muy limitada de materiales poliméricos. Esto se determina por la facilidad de fabricación, compatibilidad con las fibras, las propiedades deseadas y el costo. Solo dos resinas termoestables ampliamente usadas serán descritas, el poliéster y la epóxica. Sin embargo existen comercialmente otras resinas poliméricas comunes usadas como matrices en compuestos mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Matrices poliméricas comerciales.

<i>Resinas termofijas</i>	<i>Resinas termoplásticas</i>
Fenólicas	Policarbonato
Poliéster (UPE)	Polipropileno
Vinil éster	Poliéster (PET)
Epóxica	Polietileno

Las resinas termofijas son amorfas e isotrópicas y no se reblandecen al agregarle calor, se comportan como sólidos frágiles a temperaturas ambientales y tienen una resistencia física y química más elevada gracias a sus entrecruzamientos, que mantienen las cadenas firmes.

Las resinas termoplásticas pueden ser amorfas o parcialmente cristalinas, son dúctiles pero tienen una resistencia a la tensión, compresión y química menor que las termofijas, sin embargo estos polímeros pueden reciclarse.

El término resina se refiere a los materiales poliméricos que aún no están en su estado final, haciendo referencia a que aún están en estado líquido. Para la selección de una matriz lo primero que se consideran son las propiedades mecánicas, la resistencia al medio ambiente, a los solventes y por último la temperatura máxima de servicio.

No debemos olvidar que las propiedades mecánicas de los plásticos dependen de la temperatura ambiente y de la velocidad de aplicación de las cargas. Los términos polímero, plástico y resina por lo general son usados como sinónimos en el tema de materiales compuestos para referirse a las matrices poliméricas.

3.2 Resina poliéster (UPE)

Las resinas de poliéster insaturado (UPE) son la familia más importante de resinas termoestables utilizadas en materiales compuestos, se utilizan en más del 90% de los laminados comerciales [18]. Una resina UPE tiene dos componentes principales, el primero es el poliéster insaturado y el segundo es un solvente, por lo general, estireno que además participa en el curado.

Los poliésteres son macromoléculas preparadas por la polimerización de ácidos orgánicos difuncionales con alcoholes difuncionales. Dos procesos químicos son importantes para entender a las resinas de poliéster. El primero es la polimerización, la cual es el proceso en el que se forma la resina poliéster, este paso se realiza en plantas químicas, el segundo proceso es el entrecruzamiento o curado, este proceso debe realizarse en el moldeo y necesita un agente químico llamado iniciador.

Las resinas poliéster son polimerizadas usando varios monómeros mediante polimerización por condensación, al menos dos tipos de monómeros deben estar presente y estos deben ser difuncionales donde di significa dos y funcional en química significa reactivo, éstos deben reaccionar de tal manera que se unan. El nombre de los polímeros formados por condensación es “poli” más el nombre de la entidad creada en la reacción, en este caso son los grupos ésteres, de ahí su nombre poliéster.

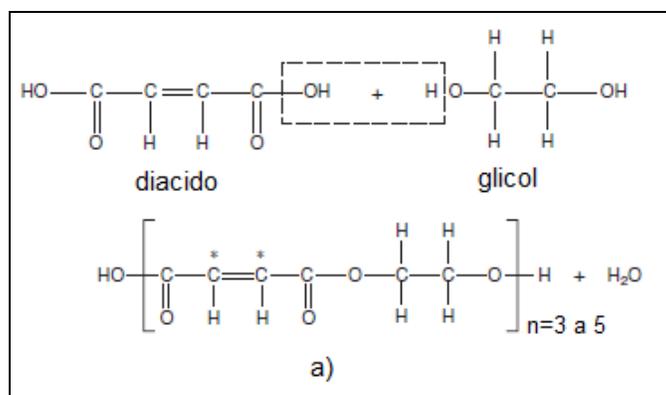


Figura 15. Los ingredientes de la preparación del UPE, en este caso el anhídrido maléico como diácido y etilenglicol como dialcohol, los asteriscos muestran los puntos insaturados de la molécula de poliéster.

La figura 15 muestra las reacciones para hacer una resina poliéster, al principio de la reacción dos monómeros (glicol y diácido) se combinan para hacer una molécula de poliéster, el grupo activo del glicol son los OH (alcoholes) y el grupo activo en el diácido son los ácidos carboxílicos o COOH, a menudo estos diácidos son mencionados simplemente como ácidos. Un subproducto de la fabricación de la resina poliéster insaturada es el agua, esta debe ser removida ya que afectaría las propiedades de la resina. Las propiedades de la resina poliéster se muestra en la tabla 9.

No saturado es un término que en química se aplica a las moléculas que contienen un doble enlace carbono-carbono, en las resinas poliéster el nombre no saturado hace énfasis a este doble enlace en un monómero, normalmente el diácido es quien aporta la insaturación. Para obtener un rango de propiedades más amplio los UPE mezclan ácidos insaturados con ácidos saturados en los reactores. El nombre de la resina por lo general es puesto por el diácido saturado, por ejemplo las resinas *orto* o resinas *iso*.

El bajo costo de la resina poliéster es una gran ventaja frente a otras resinas termoestables, comúnmente cuestan un 25% menos que las vinil éster y entre 33-50% menos que las epóxicas, además de esta ventaja, estas resinas pueden curar a temperatura ambiente, son fáciles de moldear, se tiene un amplio rango en la formulación para obtener diferentes propiedades. Como desventajas tenemos una relativa baja durabilidad al exterior, un encogimiento en el curado considerable y propiedades mecánicas inferiores a las resinas viniléster y epóxica. [18]

Tabla 9. Propiedades del poliéster medidas a 23° Celsius [12].

Densidad (g/cm ³)	1.1-1.35
Resistencia a la tensión (MPa)	34.5-100
Módulo de Tensión (GPa)	2.1-3.45
Elongación a la rotura %	1-5
HDT (° Celsius)	60-200°
Encogimiento en el curado	5-12%

3.3 Resina epóxica

Las resinas epóxicas o poliepóxidos son líquidos de bajo peso molecular que contienen grupos epóxidos, los cuales consisten en anillos de dos carbonos y un oxígeno.

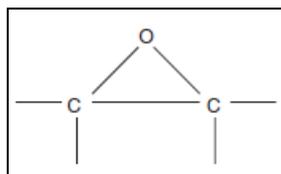


Figura 16. Grupo epóxi.

La producción industrial de resinas epóxicas ocurrió de forma simultánea en Europa y en los Estados Unidos empezando la década de 1940's, el crédito se le da al suizo Dr. Pierre Castan y al estadounidense Dr. Greenlee, quienes por separado investigaron la reacción del Bisfenol-A con epíclorohidrina. Las primeras resinas epóxicas se comercializaron como recubrimientos y pinturas, las mismas resinas ahora son un material muy usado como matriz en muchos compuestos avanzados en la industria aeronáutica. [16]

La reacción de curado de las resinas al estado sólido inicia agregando cantidades de endurecedor, uno de ellos es el DETA, que reacciona con los grupos epóxicos del bisfenol A, formando una red en tres dimensiones. La estructura de los ingredientes de la resina epoxi se representan en la figura 17.

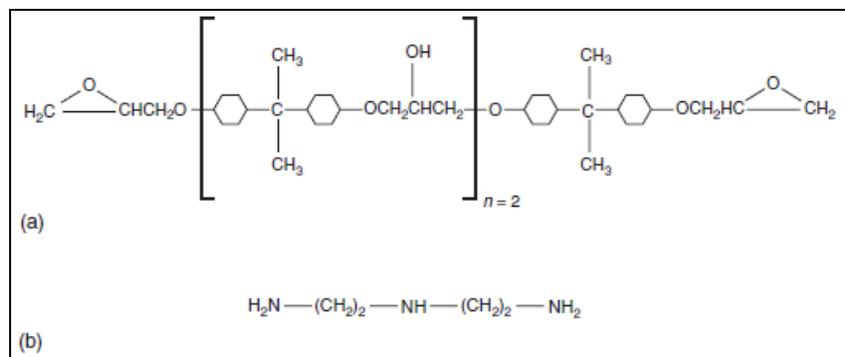


Figura 17. Los ingredientes principales de una matriz epóxica. (a) una molécula de bisfenol A, (b) Una molécula del endurecedor DETA.

Las propiedades de las resinas epóxicas curadas dependen del grado de entrecruzamiento, que depende a su vez del tipo del agente de entrecruzamiento, con algunos agentes es posible curar a temperatura ambiente pero con otros se requiere alcanzar una temperatura elevada. Las resinas epóxicas suelen ser de alta resistencia, bajo encogimiento al curar, excelente adhesión a muchas fibras, alta resistencia química, y de baja toxicidad una vez curadas, las propiedades de la resina epóxica se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Propiedades típicas del epóxica [13].

Densidad relativa	1.25
Resistencia a la tensión (MPa)	55-130
Módulo de tensión GPa	2.75 - 4.10
Coefficiente de Poisson	0.2-0.33
Encogimiento en el curado %	1-5

El tiempo de entrecruzamiento de la resina epóxica es largo, puede superar las 24 horas a temperatura ambiente, muchas veces para garantizar un entrecruzamiento completo se someten las láminas de matriz epóxica a un tratamiento térmico final llamado postcurado.

Las resinas epoxi son altamente adhesivas, esto se debe a la presencia de numerosos grupos polares OH en sus cadenas poliméricas [45], la figura 18 muestra una micrografía MEB de una fractura entre las fibras de vidrio que aún mantienen parte de la matriz epóxica tras una fractura mediante un ensayo de flexión, sugiriendo una interfaz fuerte.

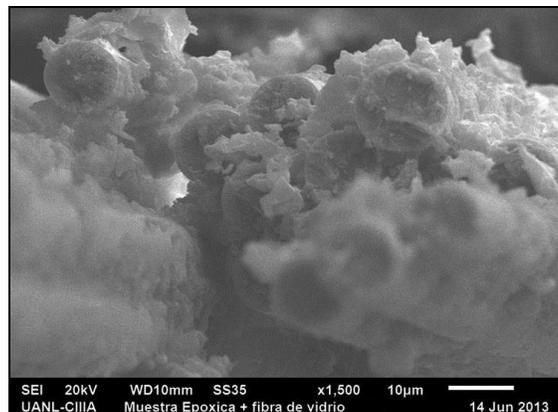


Figura 18. Micrografía de una fractura de un compuesto vidrio-epoxi [19].

3.4 Entrecruzamiento

El entrecruzamiento es el proceso por el cual la resina pasa de ser líquida a sólida, también se conoce como curado, debe tener lugar en el moldeo, este proceso no puede iniciarse solo (o si lo llega a realizar necesitaría mucha energía y tiempo). Es un proceso importante para entender a las resinas y a la matriz del compuesto.

El proceso de entrecruzamiento no es sencillo y se ve afectado por diferentes variables como la temperatura ambiente y la humedad, sin embargo los principios del entrecruzamiento puede entenderse a tal grado que puede lograrse un control razonable en el proceso.

En este proceso se forman muchos enlaces entre las moléculas poliméricas así se forma una red interconectada en tres dimensiones, el material solidifica adquiriendo propiedades físicas como dureza, rigidez y resistencia, una vez curada la resina el proceso es irreversible.

El poliéster no saturado es capaz de formar entrecruzamiento porque tiene segmentos donde la cadena polimérica contiene un enlace doble carbono-carbono. Estos dobles enlaces carbono-carbono ya se encontraban en los monómeros pero estos no se entrecruzan en la policondensación, ya que se requiere una reacción diferente con un agente iniciador para causar que este doble enlace pueda reaccionar (entrecruzar) con otras moléculas.

La reacción de entrecruzamiento comienza cuando se agrega y mezcla una sustancia llamada "iniciador", los iniciadores más comunes son peróxidos orgánicos, cuando el iniciador se activa se convierte en un radical libre, éstos son agentes altamente reactivos por tener un electrón faltante, lo que atrae a otro electrón del doble enlace carbono-carbono, así ese doble enlace desaparece dando lugar a un enlace carbono-carbono sencillo, el electrón que originalmente estaba en el doble enlace da a lugar a un nuevo radical libre desatando una reacción en cadena. Al final el iniciador se consume y forma parte del polímero, por eso esta sustancia química no debe llamarse catalizador. [15]

La velocidad del curado depende de la velocidad de descomposición del iniciador, la cual aumenta con la temperatura, también pueden agregarse pequeñas cantidades de

aceleradores, por lo general sales de cobalto (naftalato de cobalto) o de inhibidores si se quisiera alargar el proceso.

Los porcentajes requeridos del iniciador varían entre 1 y 3% mientras que para el acelerador son entre 0.1 y 0.3%, por lo general la resina ya viene pre-acelerada, con la intención de evitar accidentes al mezclar el iniciador con el acelerador, que juntos provocarían una violenta reacción exotérmica.

Durante el curado suceden dos fenómenos; el primero es la gelación, que es cuando los monómeros de la resina se extienden tanto que son suficientes para generar una red tridimensional que limita el movimiento, en este punto la resina dejara de comportarse como líquido y antes de este proceso es el tiempo límite de moldeo. El segundo proceso es la vitrificación donde la matriz estará entrecruzada completamente en una red rígida.

Las propiedades de la resinas termofijas dependen fuertemente del grado de entrecruzamiento, por ejemplo al aumentar el grado de entrecruzamiento aumentan el módulo de rigidez, la temperatura de transición vítrea y la estabilidad térmica.

El mecanismo de curado en resinas UPE es el de crecimiento de cadenas por radicales libres mientras que el de las epóxicas es por adición por pasos. A diferencia de las resinas termo fijas, los termoplásticos no pueden formar entrecruzamientos como se muestra en la figura 19, aunque pueden ramificarse, sus propiedades mecánicas se derivan directamente de las propiedades de las unidades de monómero y de sus pesos moleculares.

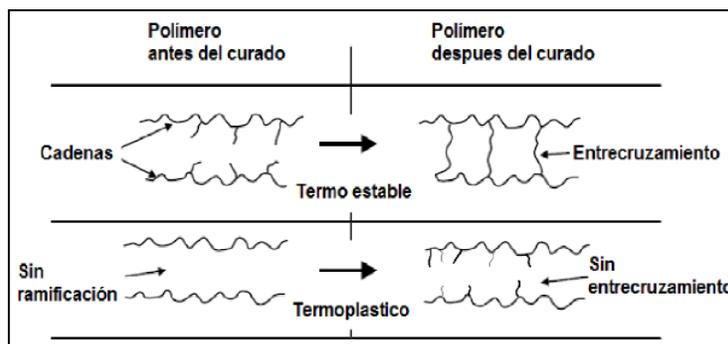


Figura 19. Diferencia entre una resina termoestable y termoplástica.

Capítulo 4. Importancia de la Interfaz

4.1 Introducción

Una definición practica propuesta por Metcalfe en 1974 para una interfaz es: “La región del compuesto donde la composición química cambia considerablemente y constituye el enlace entre la matriz y el refuerzo”. [20]

La interfaz juega un rol muy importante en las propiedades mecánicas y físicas de los materiales compuestos. La diferencia entre las propiedades elásticas de la matriz y las fibras tienen que ser comunicadas a través de la interfaz o en otras palabras los esfuerzos de la matriz debe ser transmitidos a las fibras mediante la interfaz.

Para visualizar la importancia de la interfaz imagine un compuesto formado por fibras oscuras en una matriz blanca como se observa en la figura 20, estos no están unidas por ningún enlace químico o físico, al aplicarse una fuerza de tensión a las fibras de en medio del compuesto; (1) la resistencia dependerá exclusivamente de esa fibra central, pero ahora considere que todas las capas de fibra y matriz están sujetas y unidas por un pegamento (2) se vuelve a aplicar la misma fuerza en las mismas fibras, ahora la resistencia y la rigidez del compuesto aumentarán ya que la matriz comunicará los esfuerzos a todas las fibras para trabajar como un solo material.

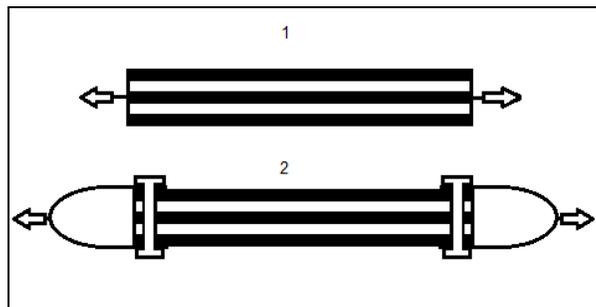


Figura 20. Efecto de una interfaz fuerte en una lámina [20].

Para entender la forma en la que la matriz trasmite los esfuerzos a las fibras debemos asumir primero que la matriz y las fibras son materiales elásticos, segundo la interfaz es muy delgada, tercero las fibras y la matriz están perfectamente unidas, por lo tanto no hay

discontinuidades a través de toda la interfaz, cuarto las propiedades de las fibras en su superficie son idénticas que en el centro, quinto las fibras están acomodadas de una forma regular y ordenada. Estas suposiciones son necesarias para entender las propiedades físicas de los materiales compuestos.

La interfaz es un factor importante en la resistencia a la fractura del compuesto así como en su comportamiento en medios acuosos. En este capítulo veremos de forma breve las teorías de adhesión y como la matriz trasmite a través de la interfaz los esfuerzos.

Es importante mencionar que la interfaz es dependiente de las propiedades químicas de las fibras, de la matriz polimérica y de los agentes de acoplamiento presentes en la superficie de las fibras así que cada interfaz es específica para cada sistema.

4.2 Teorías de adhesión

4.2.1 Absorción y humectación

Cuando dos superficies eléctricamente neutras entran en contacto íntimo hay una atracción física que se comprende mejor si sucede entre la superficie de un sólido con un líquido, ya que en el caso de dos sólidos que se coloquen muy juntos la rugosidad de la superficie en cualquier escala impide que las superficies entren en contacto íntimo.

La humectación puede ser entendida con dos sencillas ecuaciones expresadas en términos de trabajo termodinámico de adhesión. La primera es la ecuación de Dupre;

$$W_A = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 \quad (1)$$

W_A representa el enlace físico resultante que es igual a la suma de la energía libre del líquido γ_1 y del sólido γ_2 , menos la energía libre interfacial γ_{12} .

La segunda es la ecuación de Young;

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2)$$

Donde γ_{SV} , γ_{SL} y γ_{LV} son las energías libres superficiales del sólido-vapor, sólido-líquido y líquido-vapor respectivamente y θ es el ángulo de contacto. Líquidos que forman ángulos θ mayor a 90 grados se les conoce como no humectantes y los que generan ángulos menores de 90 grados se conocen como humectantes, figura 21. Si el líquido no forma una gota el ángulo es cero y la ecuación de Young deja de ser válida.

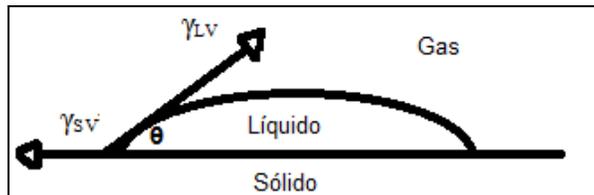


Figura 21. Ángulo de contacto y energías de superficie para una gota en una superficie sólida.[20]

La energía libre superficial de los sólidos (en nuestro caso las fibras) γ_{SV} debe ser superior a la energía libre superficial de la resina γ_{LV} para que la humectación sea posible. Según Gutowski (1988), la energía γ_{SV} de las fibras de vidrio con 0.3% de silanos A-174 es de 43 mJ/m² mientras que en el poliéster es de 39 mJ/m². Una combinación de las ecuaciones nos permitirá conocer un valor para W_A [20].

$$W_A = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} - \gamma_{SV} \quad (3)$$

W_A representa el enlace físico resultante, podría darse una fuerte adherencia entre las fibras y resina por ese método de adherencia sin embargo esto nunca se consigue por que la superficie de la fibra puede estar contaminada bajando la energía libre de superficie, también porque existe presencia de aire y otros gases en la superficie del sólido y por ultimo por el encogimiento de la resina al curar, lo que produce esfuerzos internos.

4.2.2 Interdifusión

Es posible formar una unión entre dos superficies mediante difusión de los átomos o moléculas, una característica importante de este mecanismo es que existe un equilibrio termodinámico entre los dos constituyentes. La fuerza del enlace por interdifusión dependerá del entrelazamiento de la red polimérica, el número de moléculas involucradas y la fuerza de unión entre estas. La figura 22 muestra una unión química y por interdifusión.

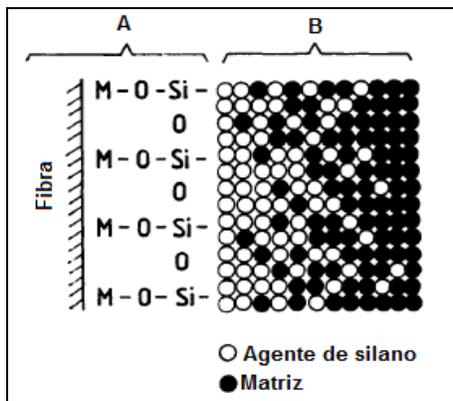


Figura 22. Interdifusión entre la fibra de vidrio recubierta con agentes de silanos y la matriz. A representa la interfaz química promovida por los agentes de silanos y B es la interfaz resultante por interdifusión.

La interfaz producida por este mecanismo será más suave que la matriz. Según mediciones de Tsai et al, el módulo de rigidez de una interfaz de 500 nm formada entre una fibra de carbono y una matriz epóxica es de cerca de un cuarto del de la matriz, esto puede cuantificarse mediante mediciones de nanoindentación. Sin embargo la interfaz se mostrara más rígida cerca de la fibra. [20]

4.2.3 Atracción electrostática

Una diferencia en cargas electrostáticas que se encuentren en la superficie de dos sólidos puede contribuir a una fuerza de atracción física. La fuerza de la interfaz dependerá de la densidad de cargas.

Este mecanismo de atracción es poco probable que contribuya a la resistencia final del compuesto, pero es importante mencionarlo ya que ayuda a explicar que los agentes de silanos son especialmente efectivos con refuerzos neutros como el vidrio y algunos cerámicos pero son menos efectivos con superficies como magnesio y carbonato de calcio.

4.2.4 Unión química

Este mecanismo es el más antiguo y el mejor conocido entre todas las teorías de uniones. Mientras los mecanismos de absorción dependen de fuerzas van der Waals o interacciones ácido-base, las uniones químicas están basadas en enlaces primarios. Una interfaz

producida por unión química es particularmente interesante en el estudio de compuestos de matriz polimérica por que explica la unión de agentes de acoplamiento como los agentes de silanos en las fibras de vidrio con matrices termofijas. Los tratamientos superficiales oxidantes de las fibras de carbono también forman una unión química con las matrices poliméricas.

En este mecanismo de adhesión se forma un enlace primario covalente o iónico entre el grupo químico de la superficie de la fibra con otro grupo químico compatible de la matriz, gracias a un “puente” entre estos dos, llamado agente de acoplamiento, figura 23. La fuerza de la unión depende del número y el tipo de los agentes y el fallo de la superficie implica la rotura de los enlaces químicos.

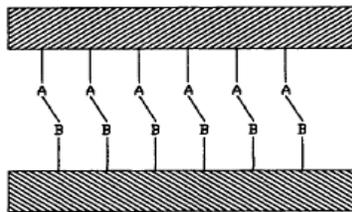


Figura 23. Representación de una unión química [20].

Los compuestos con interfaces débiles tendrán una resistencia y rigidez menor ya que las fibras y la matriz no están fuertemente unidas. Sin embargo ofrecen una resistencia al impacto mayor, esto está relacionado con los modos de falla de los compuestos en especial la facilidad de separación (*debonding*) y extracción (*pull out*) de las fibras con la matriz. No hay que olvidar que los mecanismos para la absorción de energía de impacto para todos los materiales son la deformación tanto elástica como plástica y finalmente la fractura.

Para evaluar las propiedades de la interfaz suele usarse la prueba de fragmentación de una sola fibra (*pull out*) porque provee de forma simple información de lo que ocurre en la interfaz, esta prueba se utiliza para seleccionar el agente de acoplamiento más adecuado además de obtener la resistencia a esfuerzos cortantes de la interfaz. En esta prueba una a sola fibra envuelta en una matriz se le aplica una fuerza de tensión, la matriz responde transfiriendo los esfuerzos a la fibra hasta que la interfaz se rompe.

4.3 Interfaz Vidrio-Poliéster

La superficie del vidrio consiste de grupos de óxidos aleatoriamente distribuidos. Algunos óxidos como el óxido de silicio, óxido de hierro y la alúmina son no higroscópicos, aunque pueden absorber un poco de agua como grupos hidroxilos. Otros óxidos pueden ser higroscópicos (pueden absorber agua con relativa facilidad) y se hidratan en caso de encontrar agua, entonces el vidrio puede absorber agua de una forma rápida, con un grosor de varias moléculas. La presencia de agua tiene un gran efecto en la mojabilidad de las fibras de vidrio ya que reduce la energía superficial de las fibras considerablemente. Parte de la función de los agentes de acoplamiento es evitar que las fibras se humecten, manteniendo así su energía de superficie para garantizar una buena humectación.

La función principal de un agente de acoplamiento es proveer una fuerte unión química entre los grupos de óxidos de la fibra y las moléculas poliméricas de la matriz. La fórmula general de los agentes de acoplamiento de silanos es $R-SiX_3$. Es una molécula multifunción donde X reacciona con los óxidos de la superficie de las fibras y el grupo R con la matriz. Este agente provee un enlace químico que además es repelente al agua, un compuesto sin agente de acoplamiento se deteriora rápidamente en medios húmedos. La estructura de los organosilanos se muestra en la figura 24.

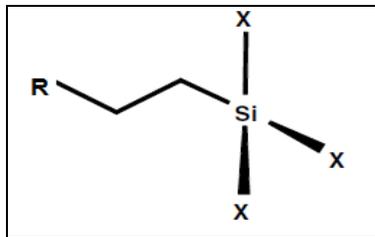


Figura 24. Estructura de un organosilano [20].

Uno de los fenómenos más importantes en los compuestos reforzados por fibra usados como estructuras es la transferencia de los esfuerzos entre la matriz y la fibra a través de la interfaz cuando el compuesto está sujeto a condiciones de cargas mecánicas. Desde un punto de vista mecánico este fenómeno es vital para entender cómo la interfaz influye en las propiedades mecánicas y en la fractura de los compuestos.

El modelo Shear-Lag descrito por Cox en 1953, es el más conocido entre todos los métodos de micromecánica de transferencia de esfuerzos. Se asume que las fibras y la matriz son materiales isotrópicos y elásticos que están perfectamente unidos, también se asume que la rigidez de la fibra es constante en toda su longitud, causando que en una situación donde se aplican fuerzas al compuesto la matriz trasfiere la mayoría de los esfuerzos axiales a las fibras y los que retiene serían esfuerzos axiales constantes, ver figura 25. Este modelo propone que los esfuerzos de la matriz se transmiten mediante esfuerzos axiales a las fibras pero en la zona de los extremos de las fibras se transmitirán por esfuerzos cortantes. También explica que en los extremos de las fibras los esfuerzos se van a concentrar obligando a deformar más a la matriz, en los compuestos reforzados por fibras cortas la fractura es crítica justo en los extremos de las fibras donde es más probable que aparezcan microfisuras en la matriz y separación fibra-matriz, como se muestra en la figura 26. [3]

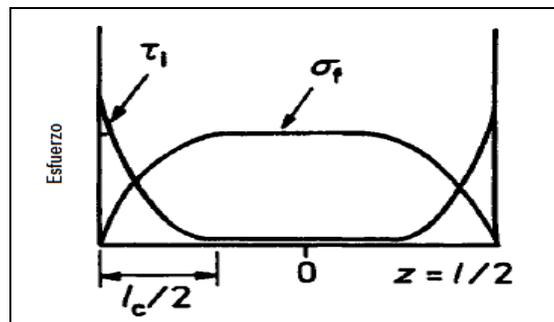


Figura 25. Variación de los esfuerzos en una fibra corta envuelta en una matriz sujeta a una carga de tensión paralela a la fibra [14].

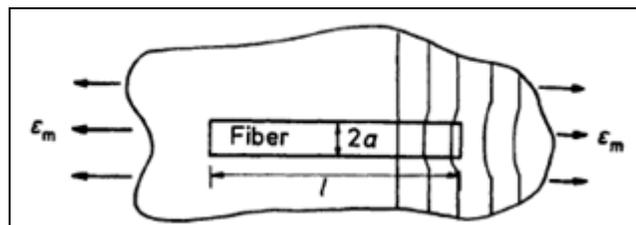


Figura 26. Deformación de una fibra corta y la matriz sujeta a la misma carga. La matriz sufre de mayor deformación en la zona que termina la fibra [14].

Aparte de la transferencia de esfuerzos a través de una interfaz perfectamente unida otro fenómeno toma lugar cuando la unión química de la interfaz falla, la transferencia de esfuerzos por fricción que es gobernada por la ley de fricción de Coulomb.

Capítulo 5. Propiedades mecánicas en los materiales compuestos.

5.1 Materiales Isotrópicos, anisotrópicos y ortotrópicos

Los materiales pueden ser clasificados de acuerdo si sus propiedades mecánicas, térmicas, ópticas o químicas varían conforme a si cambian o no dependiendo de la dirección. Los materiales isotrópicos tienen las mismas propiedades en todos los planos y sus esfuerzos normales producen deformaciones en la misma dirección. Muchos de los metales y los polímeros que usamos cotidianamente pueden clasificarse como materiales isotrópicos. Los materiales anisotrópicos tienen diferentes propiedades en diferentes direcciones, así que una carga normal produciría una deformación normal y una cortante. Otra clase de materiales están estructurados de tal forma que sus propiedades físicas varían solo en tres direcciones ortogonales, estos son llamados ortotrópicos. La madera y las láminas de plástico reforzado por fibras unidireccionales o bidireccionales son ejemplos de materiales ortotrópicos.

Las diferencias en el comportamiento mecánico de un material isotrópico, ortotrópico y anisotrópico se muestran en la figura 27. Un esfuerzo de tensión en una probeta de un material isotrópico causara una elongación en la dirección donde se aplicó la carga, así mismo un esfuerzo cortante provocara una deformación por cizalladura.

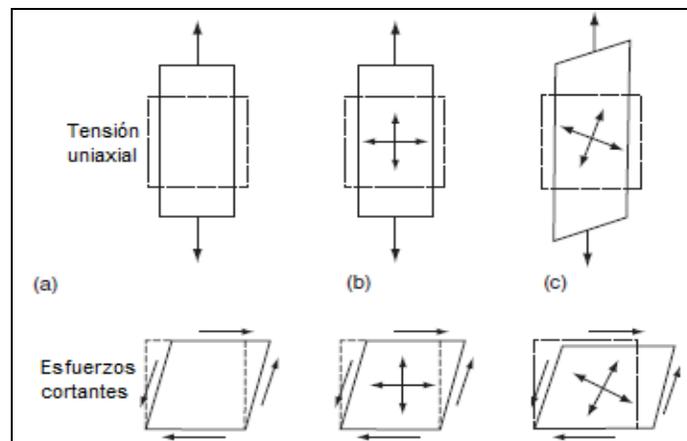


Figura 27. Comportamiento mecánico de varios materiales. (a) Isotrópicos, (b) ortotrópicos y (c) anisotrópico [22].

En el caso de un material ortotrópico, se observará el mismo comportamiento si se aplica la carga en una de las direcciones principales, aunque la deformación en esa dirección principal

es diferente de la que se produciría si la carga se coloca en la otra dirección principal para el mismo esfuerzo normal, entonces el material posee diferentes módulos de Young en las principales direcciones, además el material presentará diferentes relaciones de Poisson, de manera que las contracciones pueden ser mayores o menores para una dirección principal que la otra. En un material ortotrópico los esfuerzos cortantes provocarían deformación por cizalladura pero su magnitud será independiente de los varios valores de módulo de Young y relaciones de Poisson que el material posee.

En los materiales anisotrópicos, la aplicación de una carga normal provoca una extensión en la dirección del esfuerzo normal, una contracción en la dirección perpendicular a la carga y además provocará una deformación por cizalladura, este efecto se conoce en inglés como *extension-shear coupling* y no aparece en materiales isotrópicos aunque sí aparece en los materiales ortotrópicos cuando se les aplican cargas en las direcciones no principales.

Las propiedades mecánicas de un material compuesto dependen de muchos factores, principalmente el tipo de fibras, su orientación, su longitud, volumen de fibras, del tipo de matriz, de la interfaz, de las cargas minerales, de la técnica de manufactura, etc. También dependen si las cargas mecánicas son estáticas o de fatiga y de la temperatura del ambiente. Los compuestos reforzados por fibra son materiales microscópicamente heterogéneos y sus propiedades dependen principalmente de cómo estén orientadas las fibras. Esto hace que la mecánica de los compuestos sea más compleja que la de los materiales convencionales. La mecánica de los materiales compuestos reforzados por fibra se estudia en dos niveles:

Micromecánica: Establece las relaciones entre las propiedades de los materiales constituyentes como unidades básicas en escala micrométrica, con la finalidad de conocer las características de las propiedades del compuesto. Este estudio es fundamental para la comprensión correcta de los modos de falla de los compuestos.

Macromecánica: Es el estudio del comportamiento de un material compuesto que asume que el material es homogéneo y el efecto de los refuerzos se trata como una propiedad promedio aparente de escala macroscópica.

5.2 Regla de las mezclas

Existen varios modelos para predecir las propiedades mecánicas en materiales compuestos, el modelo más simple es la regla de las mezclas, la cual es aplicable cuando los refuerzos son unidireccionales y continuos. Este modelo se basa en la predicción de las propiedades mecánicas a partir de la fracción volumétrica de cada fase. En principio esta regla puede predecir muchas propiedades del compuesto, por ejemplo estimaciones para la resistencia, el módulo de rigidez, la densidad y otras propiedades físicas. Consideraremos estas suposiciones:

1. Las fibras están uniformemente distribuidas en la matriz.
2. Existe la misma interfaz a lo largo de todas las fibras.
3. No existen huecos en la matriz, ni en la interfaz.
4. Las fuerzas se aplican paralelamente a la dirección de las fibras.
5. Las láminas están inicialmente en un estado libre de esfuerzos.
6. Las fibras y la matriz exhiben comportamientos elásticos.

En el caso de cargas a tensión, con las consideraciones anteriores tenemos:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c \quad (4)$$

Donde ε_f , ε_m , ε_c son la deformación longitudinal bajo cargas de tensión en las fibras, matriz y del compuesto, respectivamente. Como las fibras y la matriz se comportan elásticamente, los esfuerzos de las fibras y de la matriz se pueden calcular usando la ley de Hooke:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f = E_f \varepsilon_c \quad (5)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m = E_m \varepsilon_c \quad (6)$$

Comparando las dos últimas ecuaciones y recordando que el módulo de rigidez de las fibras siempre es mayor al de la matriz se puede concluir que el esfuerzo de las fibras, σ_f , es mayor que el esfuerzo de la matriz σ_m .

Las cargas de tensión aplicada a una lámina de material compuesto (C_c) se comparten entre las fibras (C_f) y la matriz (C_m).

$$C_c = C_f = C_m \quad (7)$$

Como la fuerza es el esfuerzo por el área, la ecuación anterior puede expresarse:

$$\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (8)$$

Dónde:

σ_c = esfuerzo promedio del compuesto

A_f = área transversal de todas las fibras

A_m = área transversal de la matriz

El volumen de la fibra en el compuesto puede expresarse como:

$$V_f = \frac{A_f}{A_c} \quad (9)$$

Mientras el volumen de la matriz (V_m) en el compuesto equivale a:

$$V_m = (1 - V_f) \quad (10)$$

Sustituyendo algunos valores, el esfuerzo promedio del compuesto (σ_c) es:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (11)$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación por ϵ , podemos concluir que el módulo de Young longitudinal es:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (12)$$

Esta ecuación es llamada *regla de las mezclas* y sirve para predecir las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados por fibras o partículas. La figura 28

ilustra la predicción de la resistencia del material compuesto a partir de la regla de las mezclas, nótese que la falla del compuesto coincide cuando fallan las fibras.

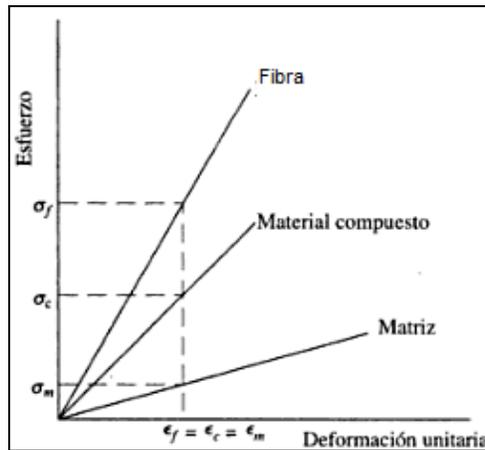


Figura 28. Relación entre esfuerzos y deformaciones en un material compuesto [47].

La fracción de carga que soportan las fibras en pruebas de tensión puede calcularse por la regla de las mezclas:

$$\frac{C_f}{C_c} = \frac{E_f V_f}{E_f V_f + E_m V_m} \quad (13)$$

Esta ecuación está mostrada en función de la fracción volumétrica de la fibra, en los compuestos de matriz polimérica el módulo de las fibras suele ser más de diez veces mayor que de la matriz. Para una fracción volumétrica de las fibras V_f de 0.2, las fibras cargarían con 71% de la carga de tensión total. Al Incrementar el volumen de las fibras aumentaría la fracción de carga de las fibras así como la resistencia del compuesto, sin embargo el límite práctico para la cantidad de fibras en un material compuesto es de cerca del 70%.

Por lo general la elongación a la rotura de las fibras es menor a la de la matriz si se asume la misma resistencia a todas las fibras, la resistencia de tensión de un compuesto de fibras unidireccionales estará en algún lugar intermedio entre la resistencia de las fibras y de la matriz cuando las fibras se fracturan, se puede estimar mediante:

$$\sigma T_c = \sigma_{uf} V_f + \sigma'_m V_m \quad (14)$$

Dónde:

σ_{T_c} = resistencia a la tensión del compuesto

σ_{uf} = resistencia última a la tensión de las fibras, asumiendo la misma para todas.

σ'_m = esfuerzo de la matriz cuando fallen las fibras.

Esta ecuación asume que la matriz no es capaz de resistir las cargas en el compuesto una vez que las fibras han fallado, de hecho la matriz falla inmediatamente después de las fibras, sin embargo en algunos casos donde se utilicen pequeñas fracciones volumétricas de fibra, la matriz es capaz de soportar las cargas antes de fallar.

5.3 Fracción volumétrica crítica

Para un reforzamiento efectivo de las fibras con la matriz (es decir una resistencia del compuesto mayor que de la matriz), la fracción de fibras debe ser mayor que un valor crítico, conocido como fracción volumétrica crítica (V_{fc}):

$$V_{fc} = \frac{\sigma_{mu} - \sigma'_m}{\sigma_{uf} - \sigma'_m} \quad (15)$$

Dónde:

σ_{mu} = es la resistencia última a la tensión de la matriz.

σ_{uf} = resistencia última a la tensión de las fibras, asumiendo la misma para todas.

σ'_m = esfuerzo de la matriz cuando se alcance la rotura de las fibras, $\epsilon'_m = \epsilon_{uf}$

Las resistencias de tensión de las fibras son muy altas comparadas con la de la matriz, en la práctica la fracción volumétrica crítica no suele ser calculada ya que suele ser del 3% en el caso de fibras de vidrio y de 2% con fibra de carbono, sin embargo es un factor que debe considerarse importante en el diseño de materiales compuestos.

Existen otros esfuerzos en las fibras, aparte de los provocados por cargas de tensión, por ejemplo esfuerzos cortantes resultantes de una diferencia en el módulo de Poisson entre la fibra y la matriz, ya que la matriz tiende a contraerse más en la dirección transversal, creando

una presión radial en la interfaz, lo que provoca esfuerzos de tensión en la matriz con dirección tangencial y esfuerzos de compresión en la dirección radial, mientras que la fibra recibe esfuerzos de compresión, sin embargo estos esfuerzos son despreciables comparados con los longitudinales de tensión.

Otra fuente de esfuerzos internos se debe a la diferencia del coeficiente de dilatación térmica entre las fibras y la matriz, por lo general la matriz al ser plástica tiene un coeficiente de dilatación térmica mayor. Nuevamente estos esfuerzos internos son pequeños y no representan un problema al menos que se incremente mucho la temperatura.

5.4 Efecto de la longitud de la fibra

Desafortunadamente, la regla de las mezclas es solo una estimación de las propiedades de los compuestos y funciona adecuadamente solo para compuestos de fibra continua, pero no es recomendable en compuestos de fibras cortas.

Cuando se aplica una carga de tensión a una lámina de fibras discontinuas, la matriz transfiere las cargas a las fibras por esfuerzos cortantes; debido a una diferencia en el módulo de Young entre los dos constituyentes, se provoca una diferencia en la deformación entre la matriz y la fibra justo cuando las fibras terminan. Asumiendo que no hay transferencia de esfuerzos al principio y al final de las fibras y que los esfuerzos cortantes son constantes e iguales a π , se puede determinar el esfuerzo longitudinal en la fibra por:

$$\sigma_f = 4 \frac{\pi}{d_f} X \quad (16)$$

Dónde:

X = longitud de la fibra medida a partir del extremo más cercano

d_f = diámetro de la fibra

π = resistencia a esfuerzos cortantes de la interfaz

La X de la ecuación sugiere que el esfuerzo no es uniforme, es cero al inicio y va aumentando linealmente llegando a un máximo en el centro de la fibra para luego volver a caer a cero en el final de esta. El esfuerzo máximo de la fibra aparecerá en $x= l_f/2$, sustituyendo:

$$\sigma_{fmax} = 2\pi\left(\frac{l_f}{df}\right) \quad (17)$$

Para cada diámetro de fibra (df) y para cada condición de interfaz (τ_i) se calcula una longitud crítica de fibra:

$$l_c = df \frac{\sigma_{ft}}{2\pi} \quad (18)$$

Dónde:

l_c = es la longitud mínima para obtener un esfuerzo igual a la última resistencia a la tensión de la fibra en la mitad de su longitud.

σ_{ft} = resistencia ultima a la tensión

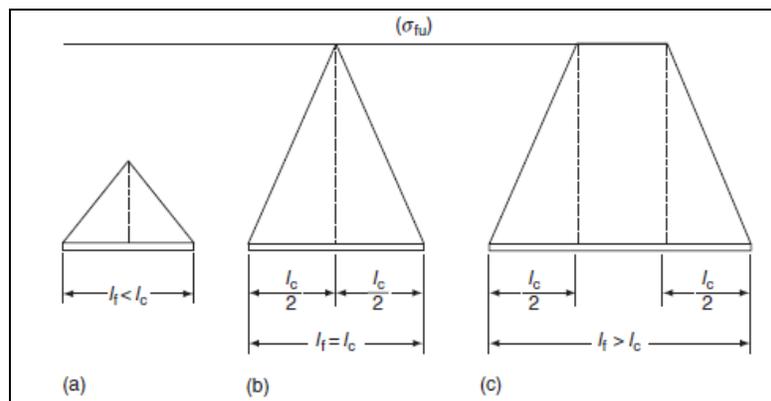


Figura 29. Representación de la relación entre la longitud de la fibra y el esfuerzo longitudinal [22].

La longitud crítica de las fibras es un factor importante a considerar, ya que para una longitud menor a la crítica el esfuerzo máximo de las fibras nunca alcanzará a la resistencia última a tensión, ver figura 29 (a), en este caso la interfaz fallará a causa de los esfuerzos cortantes antes de que se alcance la resistencia a la tensión de las fibras. Para fibras con una longitud igual a la longitud crítica (b) las fibras llegarán al límite de su resistencia, sin embargo sólo se

logra en el centro de ésta y las fibras siguen siendo ineficientes.

Para un reforzamiento efectivo, se requiere una longitud mayor a la crítica (c). La eficiencia de las fibras, es decir su efecto reforzante, no existe en los extremos de las fibras, la matriz cerca de los extremos sufre por esta discontinuidad. Las extremidades de las fibras juegan un papel importante en la fractura de materiales compuestos.

5.5 Efecto en el módulo de Young por cargas en plásticos

El módulo de rigidez de un compuesto particulado es determinado principalmente por las propiedades elásticas de la partícula y de la matriz, de la cantidad de cargas y de la razón de aspecto (geometría) de la partícula de refuerzo.

La regla de las mezclas puede usarse para estimar las propiedades de un compuesto particulado, pero se han obtenido algunas ecuaciones empíricas que muestran mejores resultados. La más sencilla de todas es la ecuación de Einstein, que originalmente predice la viscosidad de un compuesto particulado, basada en partículas rígidas y con una relación de aspecto de una unidad (es decir esferas) permite predecir el aumento del módulo de rigidez para un compuesto particulado ya el modulo está relacionado con la viscosidad.

$$\frac{E_c}{E_m} = 1 + 2.5V_p \quad (19)$$

Donde E_c y E_m es el módulo de rigidez del compuesto y matriz, V_p es la fracción volumétrica de las partículas en el compuesto. Esta ecuación es válida para partículas dispersas, bajas concentraciones de cargas, asumiendo una adhesión perfecta entre matriz y partícula. Esta ecuación no considera el efecto del tamaño de la partícula y predice una relación lineal entre E_c y V_p . Esta ecuación no funciona bien para altas cantidades de carga debido a las interacciones de los campos de deformación alrededor de la partícula. Guth agregó un factor que empíricamente soluciona a la ecuación de Einstein para altas cantidades de partículas.

$$E_c = E_m (1 + 2.5V_p + 14.1V_p^2) \quad (20)$$

El mecanismo de reforzamiento se puede explicar brevemente considerando que las partículas restringen la movilidad y la deformación de la matriz, ya que éstas funcionan como obstáculos, el grado de restricción de la partícula con la matriz depende de las propiedades de ambos constituyentes, pero si se llega a formar una fuerte interfaz entre ambos también mejoraría las propiedades del compuesto, por eso a menudo las cargas también reciben tratamientos superficiales. Se sabe que se obtiene un mejor incremento del módulo cuando se usan partículas pequeñas, por otro lado partículas muy grandes pueden terminar actuando como considerables concentradores de esfuerzos. Esto se atribuye al incremento del área superficial y la energía superficial cuando se usan partículas pequeñas.

Capítulo 6. Experimentación

El trabajo experimental que consiste en obtener las propiedades mecánicas de láminas de resina poliéster reforzado con fibras de vidrio con y sin cargas de carbonato de calcio, así como de *castings* de poliéster con diferentes cantidades de cargas de carbonato de calcio, para así conocer el efecto de cada reforzante en el poliéster. Se realizaron ensayos de tensión, flexión, impacto, medición de densidad y estimación de porosidad.

Se fabricaron seis láminas de material compuesto con diferente contenido de fibra y cargas mediante la técnica de moldeo manual, usando cuatro capas de fibra de vidrio E con orientación aleatoria y como moldes se usaron vidrios templados en las dos caras. También se fabricaron cuatro láminas de plástico mediante *casting* de resina poliéster, una completamente de resina y las otras tres con 10 %, 20 % y 30 % de cargas, respectivamente. Se usó peróxido de metil-etil cetona (MEKP) como iniciador al 1.25 % con respecto a la masa de la resina en todos los casos. Las muestras se dejaron curar a temperatura ambiente por un periodo de 24 horas. Las láminas fueron cortadas con una sierra de banda y posteriormente maquinadas en un *router* con las dimensiones recomendadas por las normas ASTM para sus respectivos ensayos. Las composiciones de las láminas se muestran en la Tabla 11:

Tabla 11. Composiciones de Fibra-Poliéster-CaCO₃, en porcentaje en masa.

<i>Lámina</i>	<i>% Fibra</i>	<i>%Resina</i>	<i>%Carga</i>
A	0	100	0
B	0	90	10
C	0	80	20
D	0	70	30
E	30	70	0
F	40	60	0
G	30	63	7
H	30	56	14
I	30	49	21
J	40	53	7

6.1 Materiales

Para la elaboración de las láminas de resina poliéster se empleó resina ortoftálica PTT-5536, marca RQ, la cuál es de baja viscosidad y está formulada para usarse con cargas minerales y fibras de vidrio, presenta tixotropía. Se emplearon fibras de vidrio tipo *E*, en presentación de *mat* de fibras cortas con orientación aleatoria, marca Owens-Corning. Para las cargas se usó carbonato de calcio con un grado de pureza mínimo de 98.5%, molido en seco, con tamaño medio de partícula de 15 μm y tamaño máximo de 50 μm , bajo la denominación comercial de Calciwytte 325, marca Qualymin. Como iniciador se empleó peróxido de metil-etil-cetona (MEKP).

6.2 Preparación de las probetas

En la prueba de gelado de resina poliéster se midió 100 gramos de Resina Poliéster PTT-5536 en un vaso encerado al cual se agregaron 1.25 gramos de *butanox*, la mezcla se colocó en un segundo vaso, para evitar que el primer vaso se humedeciera, en baño maría a 25 °C. El tiempo de gelado fue de 583 segundos para estas condiciones.

Para los ensayos de tensión, se obtuvieron seis probetas de cada lámina, para un total de sesenta, las cuales se maquinaron en un router conforme a las dimensiones especificadas por la norma ASTM D638 tomando como referencia el tipo 1: 165 mm de largo y 13 mm de anchura calibrada (W), presentando un agrandamiento de área en la zona de contacto con las mordazas, la forma de la probeta tipo uno de la norma se muestra en la Fig. 30.

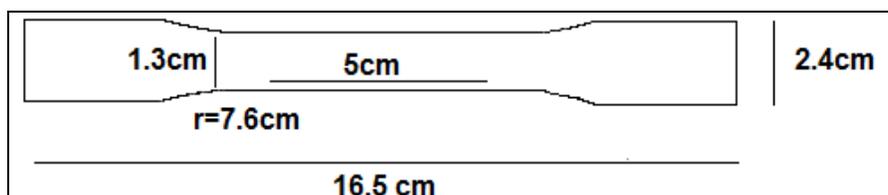


Figura 30. Probeta tipo 1 para plásticos reforzados.

En virtud de que el proceso de maquinado es manual, se tuvieron variaciones dimensionales, particularmente en el ancho de la zona calibrada (W) y en el espesor, que varía en cada lámina por la cantidad de resina. Para dimensionar las probetas se usó un vernier electrónico

Mitutoyo; se midió el espesor (E) y la anchura calibrada (W) en tres puntos de cada probeta. El apéndice 2 muestra el promedio de las dimensiones W y E de las probetas de tracción con unidades en milímetros. Las probetas de tensión fueron ensayadas en una maquina universal Shimadzu AGS-X con una velocidad de desplazamiento de 10 mm/min, a temperatura ambiente.

Para los ensayos de impacto, se realizaron cinco probetas tipo Izod para cada lámina, obteniendo un total de cincuenta, con las dimensiones que especifica la norma ASTM D 256, las cuales se muestran en la figura 31.

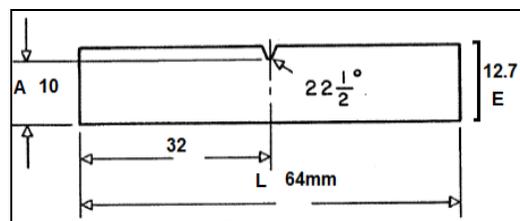


Figura 31. Dimensiones una probeta de impacto Izod con entalladura.

Las probetas fueron maquinadas en un router, la entalladura se realizó con una máquina Tinius Olsen Modelo 899, se dimensionó el espesor y el ancho en dos puntos con un vernier electrónico, la medida del ancho a la entalladura (A) fue realizada con el micrómetro Tinius Olsen modelo 799. Las dimensiones de las probetas de impacto se muestran en el apéndice 3 con unidades en milímetros. Las probetas fueron ensayadas en una máquina de impacto Tinius Olsen modelo 892 a temperatura ambiente. Las probetas obtenidas mediante láminas por castings (A, B, C y D) fueron ensayadas con un peso del péndulo-martillo de 4.513 N y las láminas reforzadas con fibra de vidrio fueron ensayadas con un peso de 9.146 N. Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente (25 °C) y a una velocidad de impacto de 1 m/s.

Para los ensayos de flexión de tres puntos usamos un aditamento marca ELE, el aditamento requirió una modificación para permitir una mayor deflexión en las probetas, el diseño del dado interior que se maquinó se muestra en la figura 32.

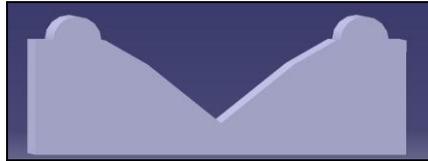


Figura 32. Diseño del dado que aporta dos puntos en ensayos de flexión.

Las probetas fueron maquinadas mediante un router con las medidas mostradas en la figura 33. Las dimensiones de las probetas de flexión se muestran en el apéndice 4.



Figura 33. Dimensiones para probetas de flexión.

Las láminas de *casting* A, B, C y D fueron ensayadas en la maquina universal Shimadzu AGS-X con el aditamento de flexión ELE modificado, con una abertura (span) de 103 mm, a una velocidad de 10 mm/min. El límite de desplazamiento que permite el aditamento de flexión ELE es de 12.5 mm por lo tanto se descartó ensayar las probetas reforzadas con fibra en ese aditamento ya que se esperaba una deflexión a la rotura mayor, se optó por ensayarlas en la maquina universal Tinius Olsen H100KS bajo las mismas condiciones, las cuales son una velocidad de 10 mm/min y una abertura de 103 mm.

6.3 Densidad y porosidad

Se obtuvo la densidad de la resina poliéster (lamina A) usando dos probetas de flexión que no se ensayaron, pesando las dos probetas en seco y midiendo el volumen por unidad de desplazamiento de agua. Obteniendo una densidad de 1.21 g/cm^3 . Para medir la densidad de cada lámina se usó una báscula OHAUS, se tomó una probeta extra de flexión de cada lámina y se partió en dos para que pudiera ser colocada dentro del recipiente, los bordes se lijaron para evitar presencia de aire en la zona del corte, se pesaron en seco y posteriormente se usó un dispositivo, como se observa en la figura 34, que funcionaba como una plataforma para sostener el recipiente lleno de agua destilada sin tocar la balanza. En la balanza se colocaba un soporte con un brazo que va sumergido y se procedía a colocar la muestra, así se pesaban en agua las dos mitades de cada probeta. Cada vez que se obtenía

una medición se sacaban las probetas y se volvía a poner en cero la báscula. Se tuvo cuidado de que ni las probetas ni el aditamento tocaran las paredes del recipiente, así como de que no hubiera burbujas. La temperatura del agua también fue medida.

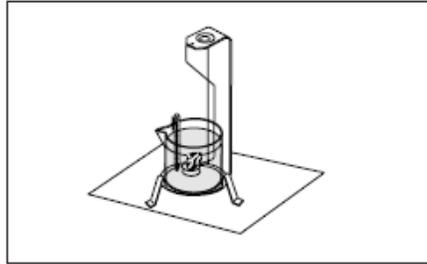


Figura 34. Esquema del dispositivo para medir peso en agua

Una vez obtenido los datos se usó la siguiente formula:

$$\text{Densidad} = \frac{P_s}{P_s - P_m} Q_t \quad (21)$$

Dónde:

P_s = Peso en seco del sólido

P_m = Peso en agua del sólido

Q_t = Densidad del agua a esa temperatura.

La temperatura del líquido auxiliar fue de 25 °C, el valor de la densidad de esa temperatura fue tomado de la tabla del Handbook of Chemistry and Physics 88 edition con un valor de 0.997048 g/cm³.

Para estimar el contenido de poros en los plásticos reforzados se usa la norma ASTM D2734, la cual supone que la diferencia entre la densidad teórica y la medida es precisamente la cantidad de poros. Para obtener la densidad teórica usamos la densidad de la resina poliéster que obtuvimos por desplazamiento de líquido y que fue de 1.21 g/cm³, la densidad de la fibra E según la norma D790 puede suponerse entre 2.54 y 2.56 g/cm³, para estos cálculos se usó el valor de 2.56g/cm³. Por otra parte, la densidad del carbonato de calcio es de 2.71 g/cm³ [17].

La fórmula para obtener la cantidad de poros en plásticos reforzados que sugiere la norma;

$$\text{Porosidad} = \frac{Td - Md}{Td}$$

Los resultados de densidad medida (Md), la densidad teórica (Td) y la cantidad de poros se presentan en la tabla 12. Según la ASTM los compuestos con menos de 1% de poros se consideran buenos. La cantidad de porosidad en un material compuesto es una medida de calidad en estos materiales.

Tabla 12. Densidad y cantidad de poros en las láminas producidas

<i>Lámina</i>	<i>Densidad</i>	<i>Densidad teórica</i>	<i>Cantidad de poros</i>
<i>#</i>	<i>Md</i> <i>gr/cm³</i>	<i>Td</i> <i>gr/cm³</i>	<i>%</i>
A	1.1938	1.2100	1.3415
B	1.2565	1.2807	1.8911
C	1.3218	1.3601	2.8148
D	1.4175	1.4501	2.2467
E	1.4243	1.4402	1.1068
F	1.5180	1.5377	1.2841
G	1.4809	1.5096	1.9026
H	1.5715	1.5861	0.9169
I	1.6378	1.6707	1.9645
J	1.6100	1.6171	0.4385

6.4 Caracterización por SEM

La microscopia es una herramienta común para analizar los materiales compuestos, los usos más comunes es para determinar la cantidad y el tamaño de huecos, también la cantidad de capas de fibra, la orientación de las fibras y observar la interfaz.

En este caso se realizó una microscopia electrónica de barrido (SEM) para estudiar las características de los tres componentes que utilizamos, la resina, las cargas de carbonato de calcio, las fibras de vidrio por separado y finalmente compuesto. También para visualizar la adherencia entre fibras y la resina y así se establecer si se forma una fuerte interfaz.

Las primeras imágenes fueron obtenidas con el SEM Nano Nova 200, en bajo vacío y una atmosfera húmeda, sin necesidad de cubrir las muestras con Au. El material observado mediante microscopia fue el mismo que se utilizó para los ensayos mecánicos. El tamaño medio de las partículas, obtenido por MEB, fue de 20 micras, con diámetros que iban desde 3 micrómetros hasta 40 micrómetros, ver figura 35.

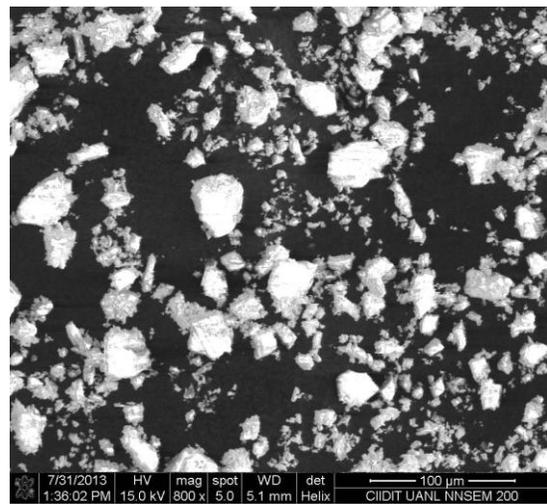
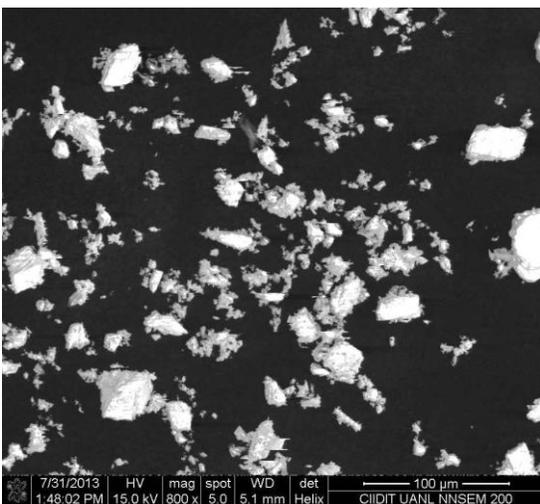


Figura. 35. MEB de carbonato de calcio.

En el caso de las fibras de vidrio es importante medir el diámetro ya que la resistencia de las fibras están en función a su diámetro, las fibras usadas en este trabajo tienen un grosor de 10 micrómetros, ver figura 36.

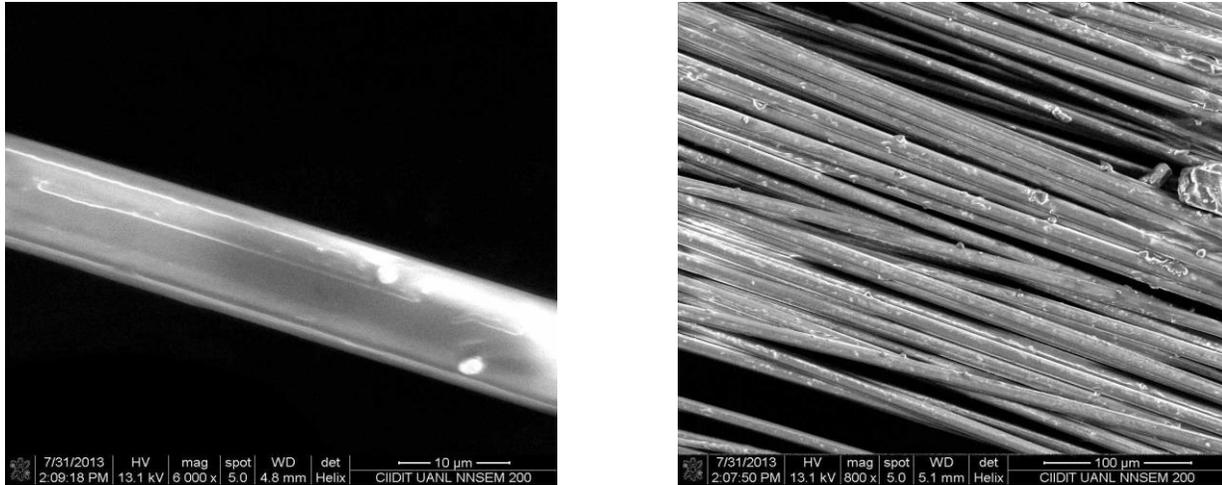


Figura 36 Izq. MEB de una fibra de vidrio tipo E. Derecha micrografía de un manojo de fibras.

La figura 37 muestra de una fractura de una probeta de tensión vidrio-poliéster, en la izquierda, los canales oscuros muestran la resina al ser removida la fibra, en la derecha, las fibras lisas dan un indicativo de la adherencia matriz-fibra, estas dos imágenes sugieren que la interfaz entre las fibras de vidrio y el poliéster no es tan fuerte. Las dos imágenes fueron obtenidas de la misma probeta.

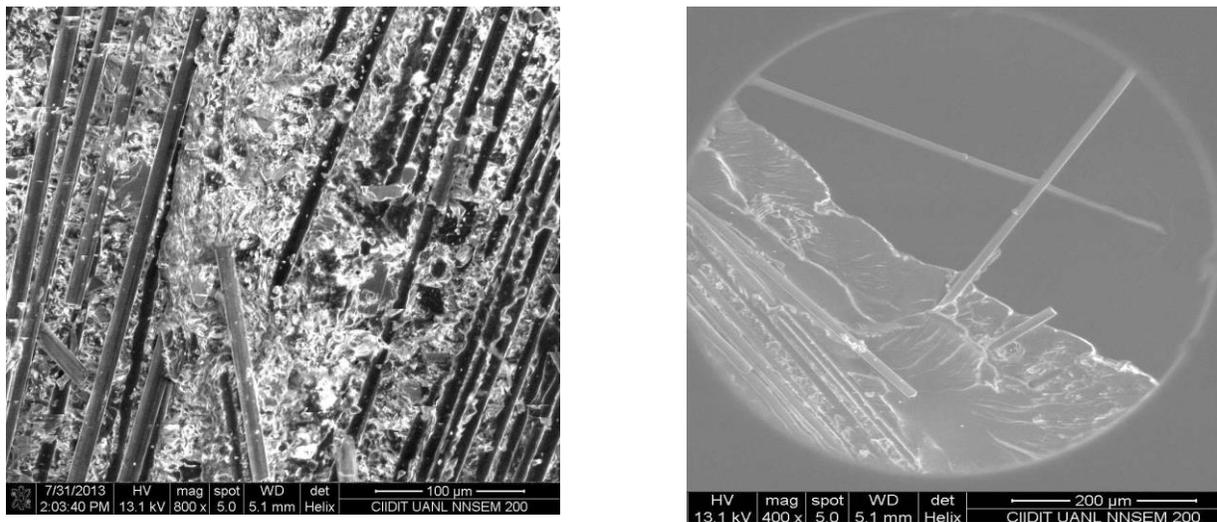


Figura. 37. MEB de una fractura de una probeta de tensión vidrio-poliéster.

Las siguientes imágenes fueron obtenidas con el microscopio electrónico JEOL JSM-6510LV, se recubrieron con tres capas de Au en el equipo Quorum Q150R ES, con el objetivo de ver con más detalle la interfaz fibra-matriz tras una fractura mediante ensayos de tensión e impacto. La razón de cubrir tanto las muestras es debido a que tras una fractura las fibras quedan muy esparcidas en la superficie, un recubrimiento no bastaba cubrirlas completamente.

La figura 38 muestra una fractura tras un ensayo de impacto, se observa que después del desprendimiento de la fibra, está aún conserva parte de la resina, sugiriendo que si existe una interfaz relativamente fuerte. En la derecha se muestra la fractura con menos aumento de la misma probeta. La figura 39 muestra la resina poliéster no reforzado tras una fractura por un ensayo de tensión, la imagen de la izquierda revelo la presencia de un hueco con un diámetro de 500 micrómetros.

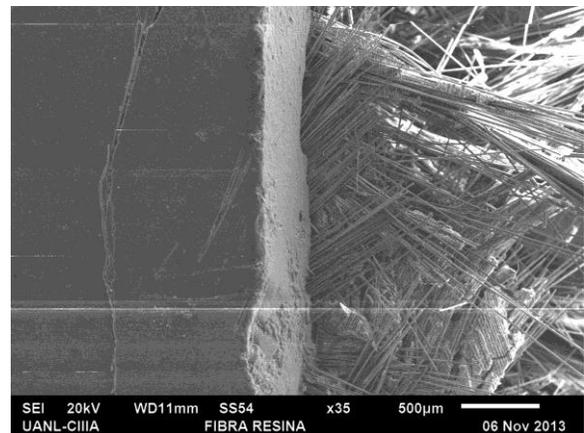
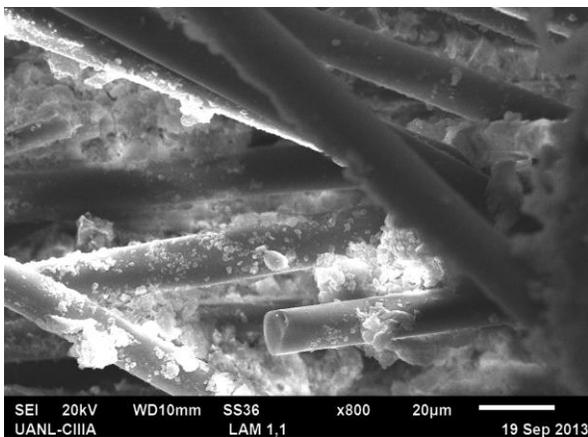


Figura 38. Izq. Micrografías de una fractura tras un ensayo de impacto.

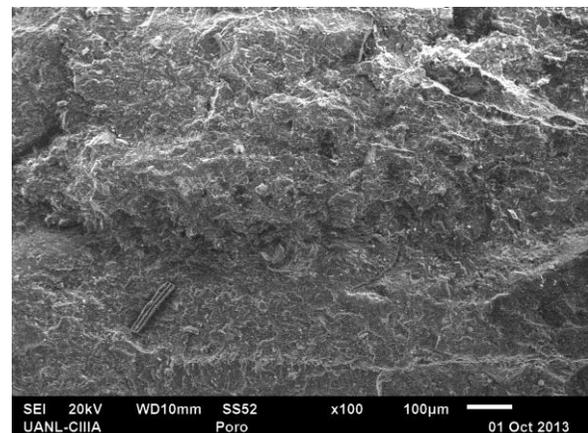
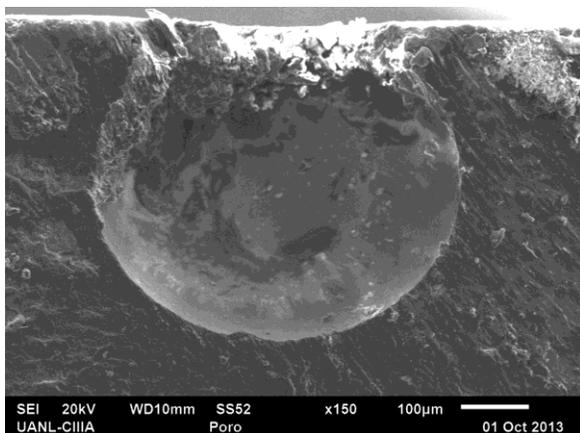


Figura 39 Micrografías de la resina poliéster tras una fractura por un ensayo a tensión.

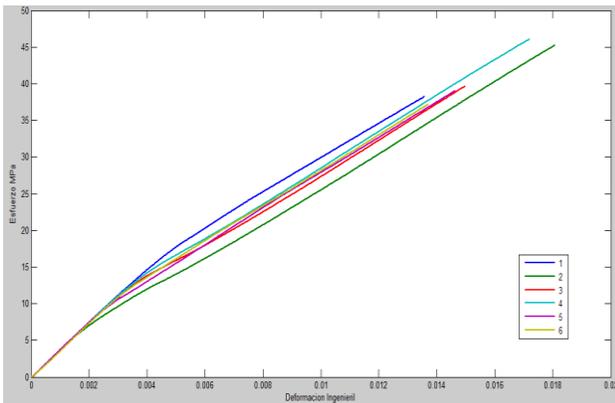
Capítulo 7. Resultados

7.1 Resultados de tensión

La resistencia a la tensión de la resina poliéster no reforzada se encontró que era de 40.9 MPa, los resultados de cada probeta se muestran en las siguientes gráficas esfuerzo-deformación, que fueron obtenidos con Math-Lab.

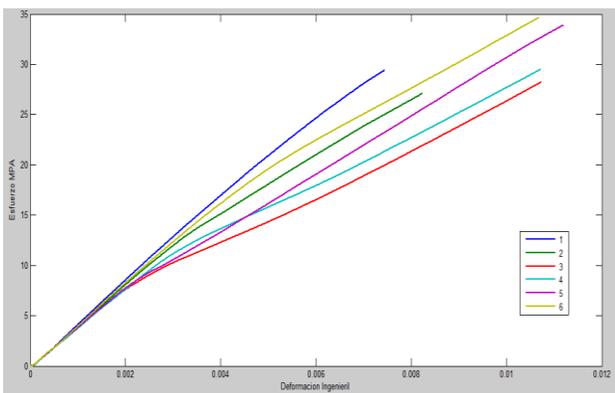
Para facilitar la apreciación de los resultados en ensayos de tensión y flexión se creó un código de colores para identificar cada probeta en los ensayos de tracción y flexión es azul para la primera probeta, verde para la segunda, rojo para la tercera, celeste para la cuarta, morado la quinta y finalmente amarillo para la sexta. El símbolo # representa el número de probeta de cada lamina.

Lámina A (100% Resina Poliéster)



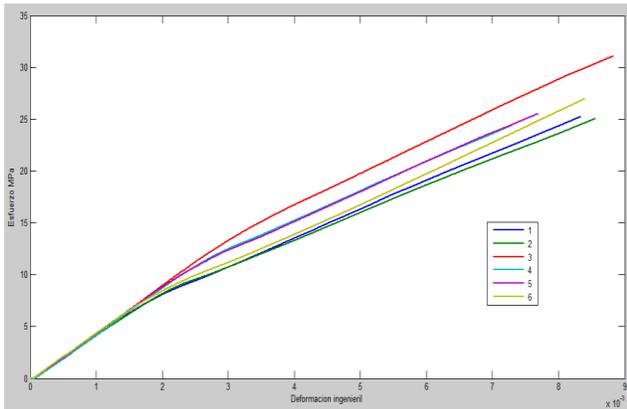
#A	M. Rigidez (GPa)	TS (MPa)	%Elongación a la rotura
1	3.7117	38.23	1.36
2	3.6731	45.26	1.81
3	3.4607	39.66	1.5
4	3.7918	46.06	1.72
5	3.8501	39.061	1.46
6	3.6800	37.167	1.37
Prom	3.6945	40.906	1.54

Lámina B



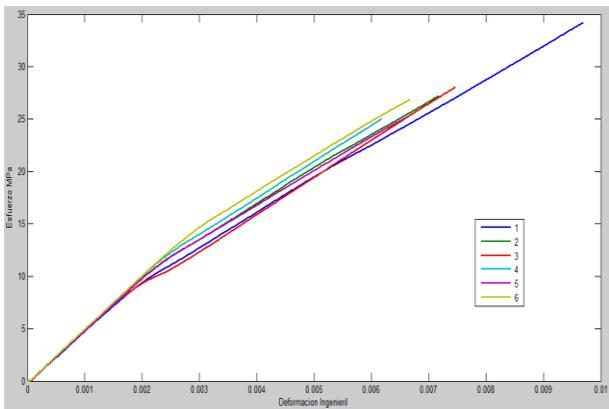
#B	M. Rigidez (GPa)	TS (MPa)	%Elongación a la rotura
1	4.1481	29.45	0.75
2	3.9490	27.114	0.82
3	4.1888	28.203	1.07
4	3.9983	29.504	1.07
5	4.0053	33.876	1.12
6	3.8678	34.66	1.07
Prom	4.0262	30.467	0.984

Lámina C



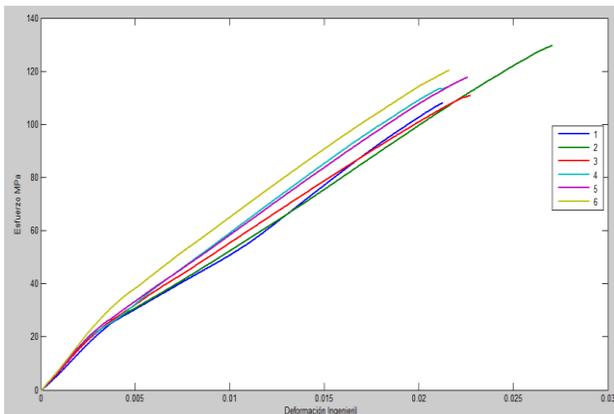
#C	M. Rigidez (GPa)	TS (MPa)	%Elongación a la rotura
1	4.0499	25.25	0.83
2	4.4273	25.043	0.86
3	4.6267	31.07	0.88
4	4.4602	24.447	0.73
5	4.4766	25.544	0.77
6	4.5966	26.94	0.84
Prom	4.4395	26.382	0.818

Lámina D



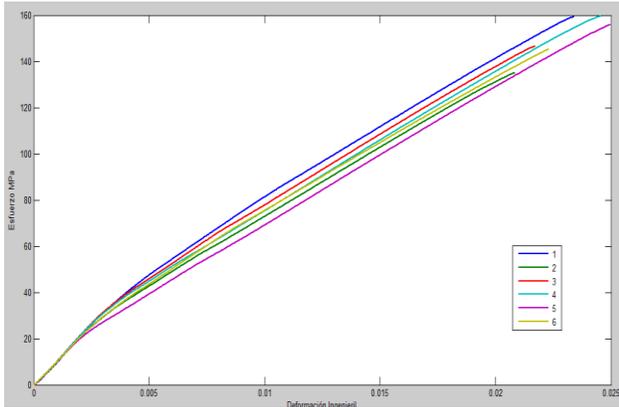
# D	M. Rigidez (GPa)	TS (MPa)	%Elongación a la rotura
1	4.9682	34.2	0.97
2	4.9883	27.2	0.72
3	5.0394	28.0	0.75
4	5.0314	25.024	0.62
5	5.2317	25.2	0.66
6	5.2552	26.84	0.67
Prom	5.0857	27.744	0.73

Resultados de plásticos reforzadas con fibra de vidrio (FRP), Lámina E



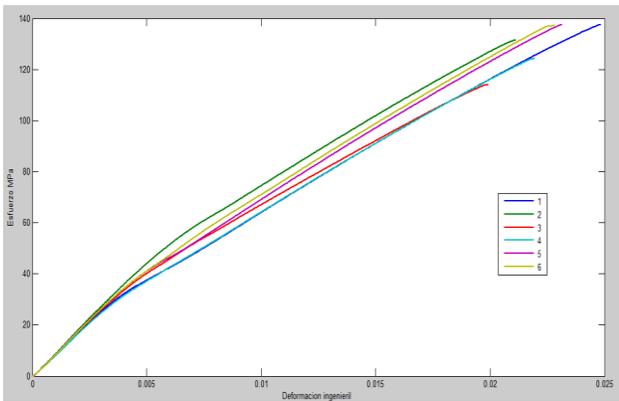
# E	M. Rigidez (GPa)	TS (MPa)	%Elongación a la rotura
1	6.6305	107.9	2.13
2	8.1938	129.6	2.71
3	7.6668	110.85	2.28
4	8.5790	113.88	2.16
5	8.1458	117.61	2.26
6	8.3374	120.23	2.16
Prom	7.9255	116.678	2.283

Lámina F



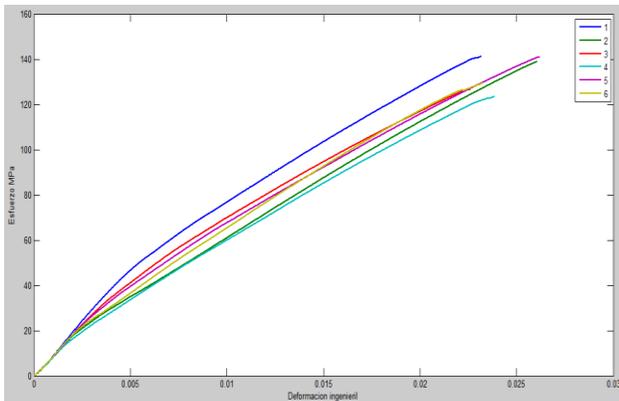
# F	<i>M.</i> <i>Rigidez</i> (GPa)	<i>TS</i> (MPa)	%Elongación a la rotura
1	10.1298	159.17	2.34
2	10.2663	134.96	2.08
3	10.4525	146.54	2.17
4	10.1133	159.7	2.46
5	9.6237	155.96	2.5
6	10.0814	145.2	2.23
Prom	10.1100	150.255	2.3

Lámina G



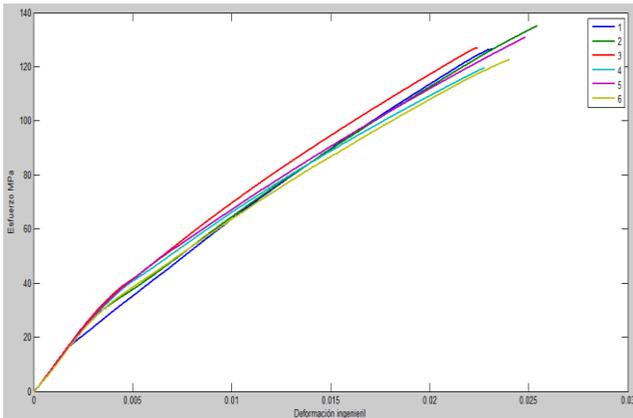
# G	<i>M.</i> <i>Rigidez</i> (GPa)	<i>TS</i> (MPa)	%Elongación a la rotura
1	7.9583	137.5	2.49
2	8.8883	131.433	2.11
3	8.5272	114.06	1.99
4	7.8183	124.32	2.2
5	8.3414	137.568	2.3
6	7.8573	137.13	2.28
Prom	8.2318	130.335	2.23

Lámina H



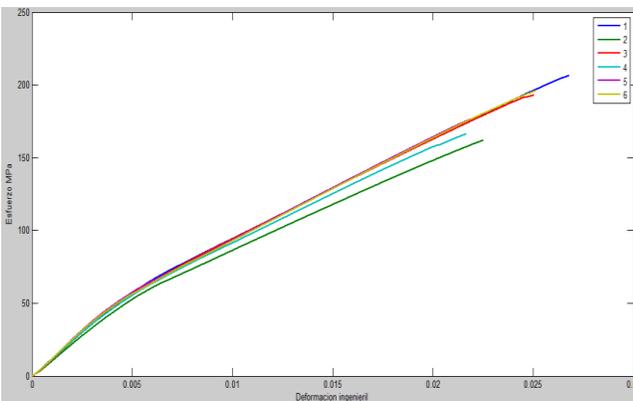
#H	<i>M.</i> <i>Rigidez</i> (GPa)	<i>TS</i> (MPa)	%Elongación a la rotura
1	8.6076	141.11	2.32
2	8.7832	138.91	2.61
3	8.6338	126.58	2.26
4	7.7869	123.53	2.39
5	8.6725	140.86	2.62
6	9.0787	129.27	2.33
Prom	8.5938	133.376	2.42

Lámina I



# I	M. Rigidez (GPa)	TS (MPa)	%Elongación a la rotura
1	9.6683	126.42	2.32
2	9.3117	135.04	2.55
3	9.7357	126.8	2.24
4	9.3272	119.5	2.28
5	8.6132	130.76	2.48
6	8.5646	122.524	2.41
Prom	9.2034	126.84	2.38

Lámina J



# J	M. Rigidez (GPa)	TS (MPa)	%Elongación a la rotura
1	11.0234	206.25	2.68
2	9.7649	161.96	2.25
3	11.5008	192.9	2.51
4	12.1153	166.104	2.17
5	12.6143	176.38	2.2
6	12.3914	195.78	2.51
Prom	11.5684	183.229	2.39

Las propiedades más altas se encontraron en la lámina J con una composición de 40% en masa de fibra, 53% en peso de resina y 7% en peso de cargas de carbonato.

La figura 40 muestra el efecto del carbonato de calcio sobre el módulo de rigidez (A), a la resistencia a la tensión (B) y a la elongación a la rotura (C) en el poliéster insaturado. El módulo de rigidez del poliéster es de 3.69 GPa, cada vez que se le agrega un 10% en masa de cargas el módulo del material aumenta aproximadamente 0.46 GPa, esto es debido a la gran rigidez del carbonato de calcio (35 GPa).

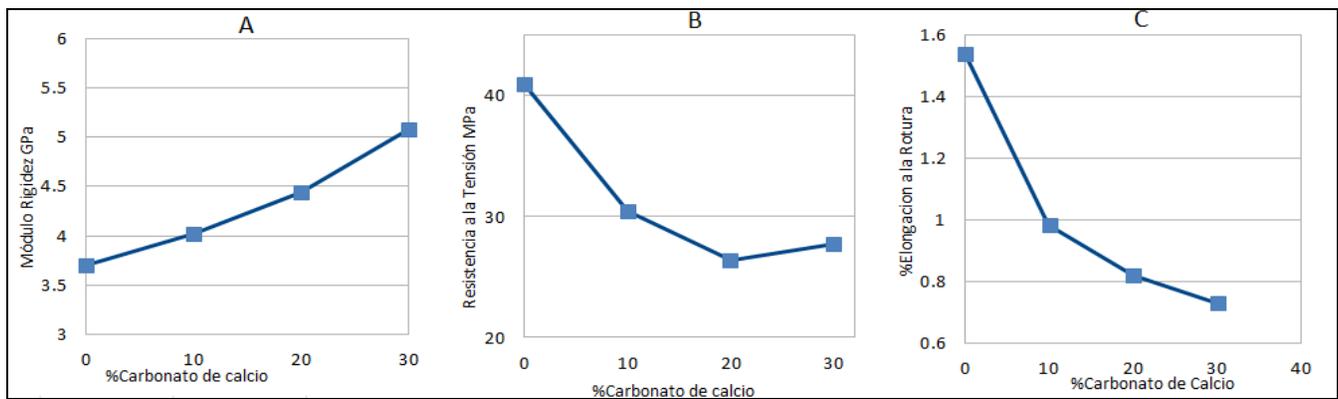


Figura 40. Efecto del CaCO₃ en el poliéster sobre las propiedades mecánicas a tensión.

Sin embargo, agregar cargas de carbonato de calcio al poliéster tiene efectos negativos disminuyendo la resistencia a la tensión del poliéster, esto es debido a que las cargas pueden actuar como concentradores de esfuerzos por no estar bien dispersas, así por el gran tamaño de partícula (tamaño máximo de 50 micras). Se sabe que al aumentar la cantidad de cargas aumenta la viscosidad y consecuentemente disminuye la mojabilidad de la resina lo cual dificulta una fuerte adherencia. La lámina C que contienen 20% de cargas muestran la resistencia a la tensión más baja, además de los efectos pasados es debido a su alta cantidad de porosidad (2.8%). La elongación a la rotura también se ve afectada al aumentar la cantidad de cargas tal como lo muestra la gráfica C, esto es debido a que las cargas interfieren con la movilidad y la deformación de la matriz polimérica.

La figura 41 muestra el efecto de las fibras de vidrio en la resina poliéster en el módulo de rigidez (D) y en la resistencia a la tensión (E). El efecto reforzante de las fibras es más notorio gracias a sus propiedades mecánicas y al efecto de transferencia de esfuerzos.

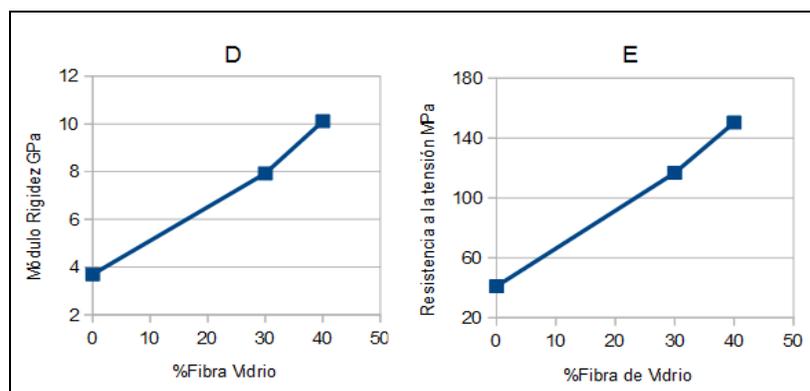


Figura 41. Efecto de las fibras de vidrio en el poliéster en propiedades a tensión.

Según la regla de las mezclas el aumento de las propiedades mecánicas del compuesto es lineal con la cantidad de fibra presente en el compuesto, al agregar 30% de fibra el módulo de rigidez del poliéster aumento el doble mientras la resistencia a la tensión sube 2.85 veces, la elongación a la rotura depende de las fibras, en este caso la elongación del compuesto aumento al agregar las fibras. La imagen 42 muestra diez graficas esfuerzo-deformación, cada una es representativa de cada lámina (composición).

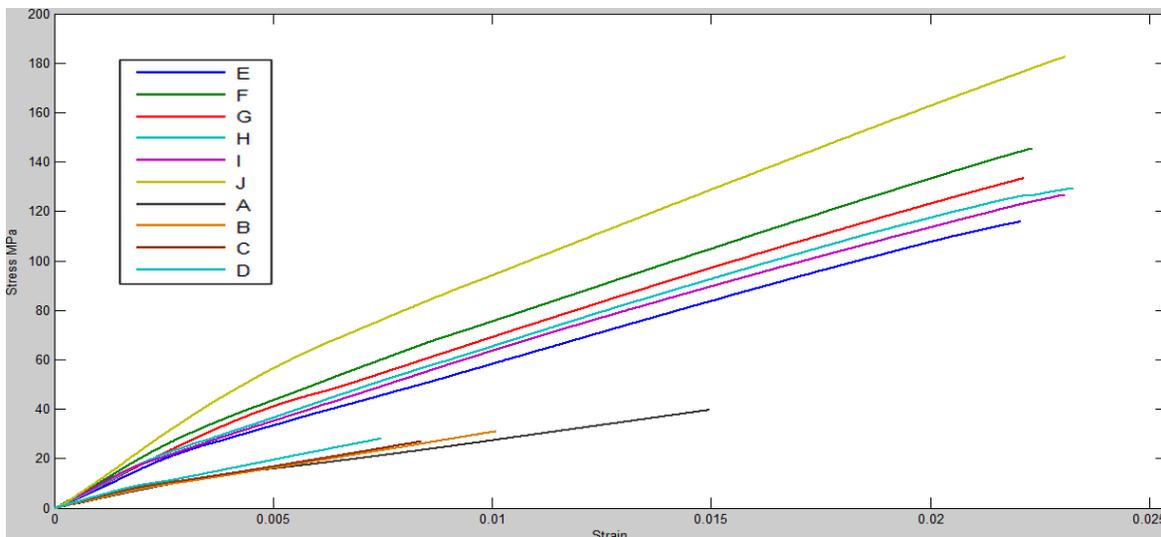


Figura 42. Graficas esfuerzo deformación de cada composición obtenidas.

La figura 43 muestra el módulo de rigidez a tensión del poliéster y del poliéster reforzado por cargas así como las estimaciones de la rigidez por las regla de las mezclas, ecuación de viscosidad de Einstein y la ecuación Einsten-Guth, puede visualizarse que la ecuación de Einstein es la más acertada para el poliéster reforzado por cargas de carbonato de Ca.

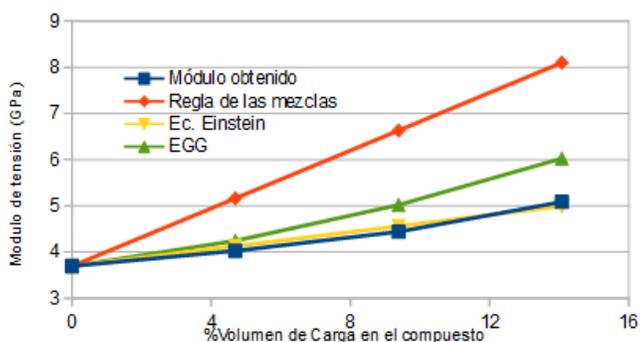


Figura 43. Predicciones y valor obtenido en el módulo de rigidez para el Poliéster-CaCO₃. El %en masa se cambió a %V.

7.2 Resultados de impacto

Los resultados para los ensayos Izod fueron obtenidas directamente del equipo Tinius Olsen, los cuales se muestran a continuación para cada probeta de cada lamina. Las dimensiones de las probetas están presentadas en el apéndice 3.

#A	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>		#F	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>
1	0.6820	14.3620		1	39.807	807.45
2	0.5690	11.9360		2	45.480	919.98
3	0.6882	14.4300		3	43.640	860.90
4	0.7121	14.9190		4	48.422	978.31
5	0.7669	16.1490		5	47.010	952.42
Prom.	0.6836	14.3592		Prom.	44.872	903.81
#B	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>		#G	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>
1	0.6549	13.7390		1	31.849	668.98
2	0.6480	13.4910		2	31.776	655.57
3	0.6432	13.5270		3	36.220	753.02
4	0.6694	14.0070		4	39.261	818.99
5	0.6667	13.9330		5	36.370	768.90
Prom.	0.6564	13.7394		Prom.	35.095	733.09
#C	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>		#H	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>
1	0.6383	13.4070		1	33.920	709.81
2	0.6075	12.6640		2	31.230	651.97
3	0.6365	13.2500		3	35.928	737.40
4	0.5893	12.2200		4	34.610	722.52
5	0.6128	12.8050		5	38.500	801.33
Prom.	0.6169	12.8692		Prom.	34.838	724.61
#D	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>		#I	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>
1	0.5893	12.2990		1	*	*
2	0.6070	12.6680		2	34.481	710.45
3	0.5995	12.6400		3	31.020	631.70
4	0.6099	12.4850		4	32.580	662.75
5	0.610	12.7310		5	35.864	731.30
Prom.	0.603	12.565		Prom.	33.486	684.05
#E	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>		#J	<i>ft*lb/in²</i>	<i>J/m</i>
1	*fallo	*fallo		1	38.380	793.92
2	37.066	738.990		2	46.422	961.45
3	43.421	891.170		3	43.460	909.50
4	41.980	863.830		4	47.550	973.48
5	45.412	941.740		5	44.480	915.33
Prom.	41.970	858.933		Prom.	44.058	910.74

La resistencia al impacto para las láminas son comparadas en la tabla 13, las unidades de $\text{ft}\cdot\text{lbf}/\text{in}^2$ fueron reemplazadas por kJ/m^2 . El resultado para cada lámina fue:

Tabla 13. Resumen de los resultados de resistencia al impacto de compuestos de matriz poliéster.

# Lamina	%Fibra	%Poliéster	%CaCO ₃	J/m	KJ/m ²
A	0	100	0	14.35	1.437
B	0	90	10	13.73	1.38
C	0	80	20	12.86	1.296
D	0	70	30	12.56	1.267
E	30	70	0	858.93	88.2
F	40	60	0	903.81	94.3
G	30	63	7	733.09	73.75
H	30	56	14	724.61	73.21
I	30	49	21	684.05	70.37
J	40	53	7	910.74	92.59

En el caso del poliéster reforzado con cargas de carbonato de calcio, la resistencia al impacto disminuye al aumentar la cantidad de cargas, al igual como disminuyó la tenacidad en los ensayos de tensión, ya que las cargas disminuyen la capacidad del poliéster a deformarse, disminuyendo así la capacidad para absorber energía tras un impacto. La figura 44 muestra en grafica de barras la resistencia al impacto de cada formulación, las gráficas de la izquierda representan el poliéster insaturado y reforzado por cargas, mientras que el de la derecha es reforzado por fibras y cargas.

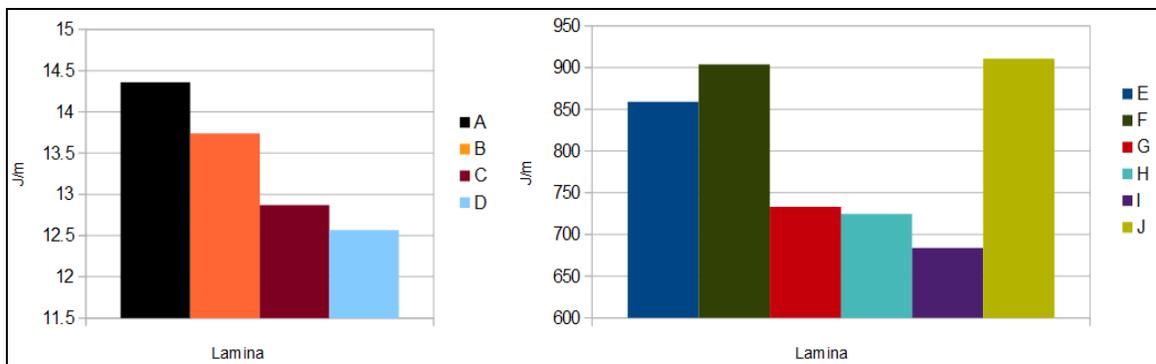


Figura 44. Resultados de la resistencia al impacto obtenidas.

Cuando se agregan fibras al poliéster aumenta la resistencia al impacto de forma

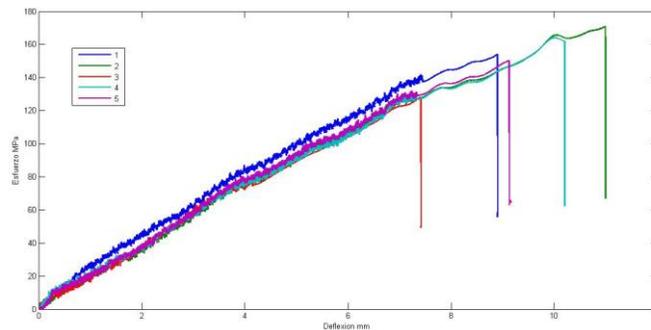
considerable, ver la tabla 17, desde 14.35 J/m para el poliéster insaturado hasta 858.93 J/m cuando se agrega un 30% de fibra, un aumento de casi 60 veces.

Los FRP (plásticos reforzados por fibra) tienen resistencia al impacto alta debido a su variedad de mecanismos de absorción de energía tras un impacto, las cuales son deformación de la matriz, deformación de la fibra, agrietamientos en la matriz, separación en la interfaz, delaminación, rotura de fibra y extracción de fibra. En el caso de los compuestos reforzados con fibra y cargas de CaCO₃ la resistencia baja debido a la pérdida de elasticidad de la matriz.

7.3 Resultados de flexión de compuestos de matriz poliéster

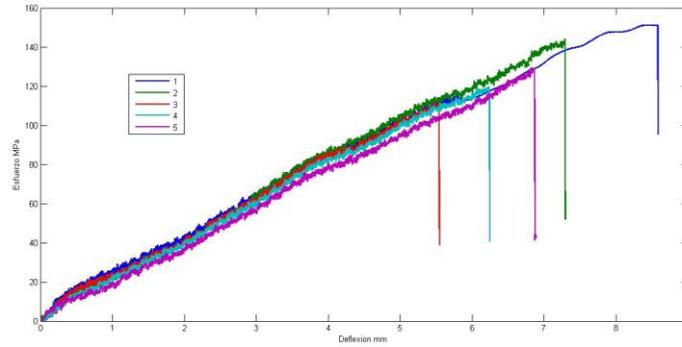
Los resultados para cada probeta se muestran en las siguientes graficas esfuerzo-deflexión, las cuales se obtuvieron mediante Math-Lab para las láminas producidas por *castings*.

Lámina A (100% Resina Poliéster)



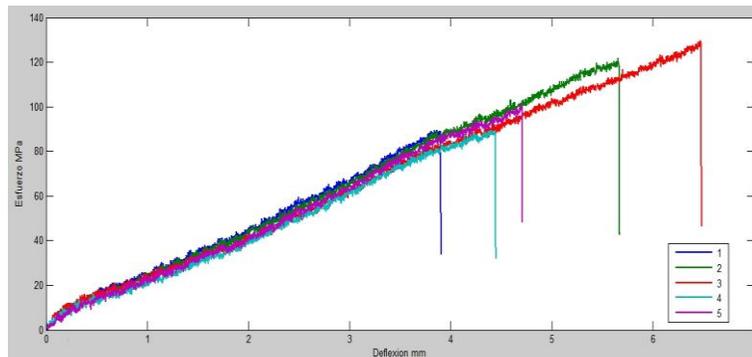
#A	M. Rigidez a Flexión (GPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Deflexión (mm)
1	7.6805	153.98	8.9
2	6.9450	168.17	10.99
3	6.6850	127.91	7.41
4	7.5894	160.06	9.99
5	7.6085	150.89	9.13
Prom	7.30	152.203	9.28

Lámina B



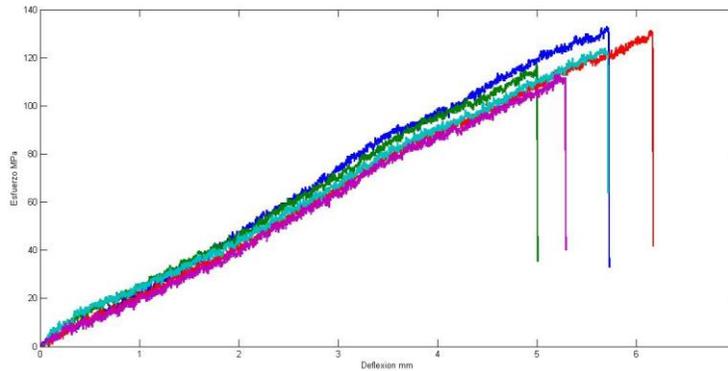
#B	M. Rigidez a Flexión (GPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Deflexión (mm)
1	7.5413	143.584	8.396
2	7.8674	139.439	7.286
3	8.1065	111.69	5.485
4	7.7005	119.690	6.2332
5	7.4294	129.686	6.829
Prom	7.7290	128.817	6.8462

Lámina C



#C	M. Rigidez a Flexión (GPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Deflexión (mm)
1	8.4784	89.5724	3.889
2	8.1922	121.7139	5.654
3	8.1715	129.8274	6.464
4	7.5481	89.5877	4.408
5	8.2195	101.1937	4.703
Prom	8.1219	106.379	5.024

Lámina D



#D	<i>M. Rigidez a Flexión (GPa)</i>	<i>Resistencia a la flexión (MPa)</i>	<i>Deflexión (mm)</i>
1	8.8913	135.4155	5.699
2	9.0622	122.9273	4.995
3	8.4170	133.3859	6.145
4	8.1729	124.1147	5.681
5	7.7135	114.2664	5.198
Prom	8.4513	126.0219	5.544

De las láminas de plástico reforzado por fibra (FRP) se obtuvo el resultado directamente del software de la maquina universal Tinius Olsen H100KS.

Lámina E

#E	<i>M. de flexión (GPa)</i>	<i>Resistencia a la flexión (MPa)</i>	<i>Deflexión (mm)</i>
1	9.2597	231.1743	19.11
2	8.9149	204.726	20.6
3	9.9216	236.7246	20.3
4	8.5219	164.9	15.9
5	9.0873	226.0446	20.5
Prom	9.1411	212.7139	19.282

Lámina F

#F	<i>M. de flexión (GPa)</i>	<i>Resistencia a la flexión (MPa)</i>	<i>Deflexión (mm)</i>
1	7.9841	160.49	25.4
2	9.3424	214.3442	25.1
3	9.5010	211.69	23.6
4	9.8250	204.89	20.4
5	9.7699	216.64	24.8
Prom	9.2845	201.61084	23.86

Lámina G

#G	<i>M. de flexión (GPa)</i>	<i>Resistencia a la flexión (MPa)</i>	<i>Deflexión (mm)</i>
1	9.1356	186.351	15.92
2	8.7770	207.332	15.84
3	9.2045	199.065	15.14
4	9.3424	221.128	15.12
5	8.9770	202.3	17.2
Prom	9.0873	203.2352	15.844

Lámina H

#H	<i>M. de flexión (GPa)</i>	<i>Resistencia a la flexión (MPa)</i>	<i>Deflexión (mm)</i>
1	9.4662	174.554	15.51
2	10.2663	199.16	17.47
3	9.5768	206.4	15.89
4	9.7837	225.35	16.66
5	9.8664	199.35	17.46
Prom	9.7919	200.9628	16.59

Lámina I

#I	<i>M. de flexión (GPa)</i>	<i>Resistencia a la flexión (MPa)</i>	<i>Deflexión (mm)</i>
1	11.1902	241.2	19.14
2	10.4180	220.02	17.54
3	10.4249	203.04	17.5
4	10.7282	195.53	15.74
5	10.6110	198.93	14.48
Prom	10.6745	211.744	16.88

Lámina J

#J	M. de flexión (GPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Deflexión (mm)
1	12.5140	248.03	22.7
2	11.5763	239.3	24.5
3	10.9834	237.8	24
4	11.5763	247.8	24
5	11.8590	326.32	23.7
Prom	11.7018	259.85	23.78

Las propiedades obtenidas a flexión fueron más altas de lo esperado debido a la alta velocidad de ensayo (10 mm/min) y al gran espacio entre los dos puntos de apoyo (span) de 103 mm el cual influye directamente en el cálculo de la resistencia de flexión y módulo de flexión, la comparación siguen siendo válida ya que todos los ensayos se realizaron bajo las mismas condiciones.

La figura 45 muestra el efecto del carbonato de calcio en el poliéster insaturado en las propiedades a flexión, al igual que en las propiedades a tensión el carbonato de calcio aumenta la rigidez pero disminuye la resistencia a flexión, aunque a 30% de carga muestra una pérdida menor a la esperada, la pérdida en resistencia a la flexión y deflexión a la rotura puede deberse a mala distribución de partículas y mala impregnación de las partículas con la resina, ya que estas no están tratadas con agentes de organosilanos, las muestras con 20% de cargas muestran las peores propiedades en resistencia y deflexión debido a la cantidad de poros.

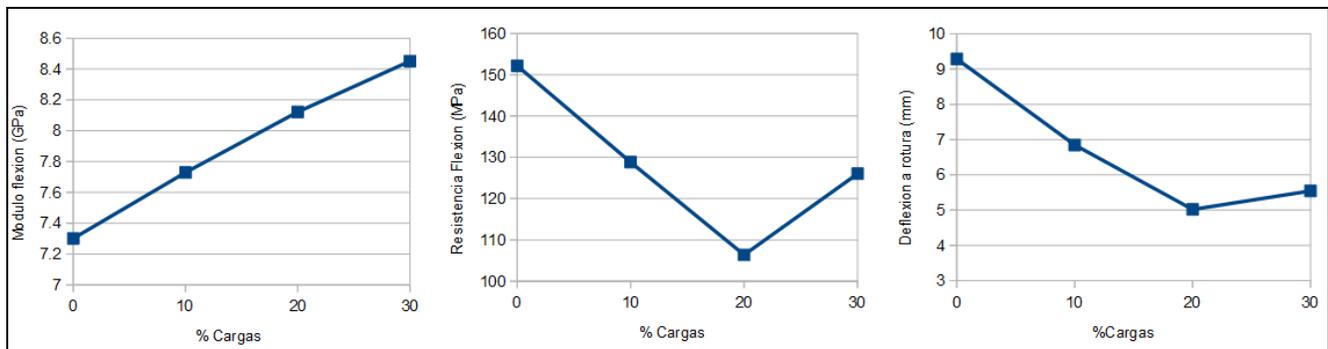


Figura 45. Efecto del CaCO₃ en el Poliéster en propiedades mecánicas a flexión, izquierda módulo de flexión, centro resistencia a la flexión e izquierda deflexión a la rotura.

La gráfica de la figura 46 muestra el efecto combinado de las fibras y de las cargas en el módulo de flexión del poliéster, la barra negra (A) representa el poliéster no reforzado, mientras la azul (E) y la verde (F) representan 30% y 40% de fibra respectivamente.

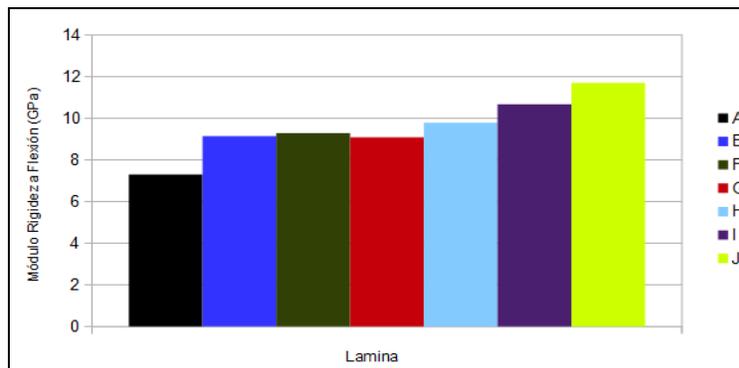


Figura 46. Efecto combinado de las fibras y cargas en el módulo de flexión del poliéster.

El aumento del módulo de flexión no parece tan alto al agregar fibras aleatorias de vidrio al poliéster, mientras los ensayos de los castings de Poliéster y Poliéster-CaCO₃ corrían hasta una fractura total de la probeta, las probetas reforzadas con fibra no fallaban completamente debido a que las fibras de las capas inferiores son las únicas que se esfuerzan a tensión, mientras que las superiores se esfuerzan a compresión, los resultados a flexión se obtuvieron en el punto que fallan las primeras fibras del compuesto.

Además del aumento en las propiedades mecánicas buscamos reducir el costo del material con las adiciones de cargas de carbonato de calcio. El costo del material en pesos mexicanos por cada kilogramo de material para cada composición se muestra en la tabla 15 en la última columna se muestra la relación resistencia a la tensión sobre el costo por cada kilogramo de material. La formulación más económica es la I, que además tiene propiedades mecánicas superiores a la E, la formulación con mejor prestación de propiedades mecánicas sobre costo es la formulación J.

7.4 Resumen propiedades mecánicas obtenidas

La tabla 17 muestra las propiedades mecánicas obtenidas, la composición de la lámina J es la más rígida y la que presenta mayor resistencia a tensión y flexión, su densidad se ve incrementada por el carbonato de calcio. Sin embargo, muestra la resistencia específica y rigidez específica más alta entre todas las composiciones, además su resistencia al impacto y su ductilidad se ve muy poco afectada por las cargas casi igualando a la composición F que no tiene carbonato de calcio.

Tabla 14. Resumen de propiedades obtenidas.

	Modulo	Resistencia	Elongación	Modulo	Resistencia	Deflexión	Resistencia	Densidad	Rigidez	Resistencia
	rigidez	Tensión	a rotura	Flexión	a flexión	a rotura	al impacto	teórica	específica	específica
#	GPa	MPa	%	GPa	MPa	mm	kJ/m ²	gr/cm ³	GPa/(gr/cm ³)	MPa/(gr/cm ³)
A	3.694	40.905	1.537	7.30	152.203	9.284	1.436	1.210	3.053	33.806
B	4.026	30.467	0.983	7.73	128.819	6.846	1.38	1.281	3.144	23.790
C	4.439	26.382	0.818	8.122	106.379	5.024	1.296	1.360	3.264	19.397
D	5.085	27.744	0.732	8.451	126.022	5.544	1.037	1.450	3.507	19.133
E	7.925	116.678	2.283	9.141	212.714	19.282	88.178	1.440	5.503	81.014
F	10.111	150.255	2.297	9.284	201.611	23.860	94.276	1.538	6.575	97.712
G	8.231	130.335	2.228	9.087	203.235	15.844	73.735	1.510	5.452	86.336
H	8.593	133.376	2.422	9.792	200.963	16.598	73.194	1.586	5.418	84.092
I	9.203	126.840	2.380	10.674	211.744	16.880	70.355	1.671	5.509	75.922
J	11.568	183.229	2.387	11.702	259.850	23.780	92.567	1.617	7.153	113.306

En cuanto a costos la composición de la lámina I es la más económica de todas presentando mejores propiedades que la composición E (con la misma cantidad de fibras pero sin cargas) excepto en resistencia al impacto y deflexión aunque la diferencia no es considerable. El ahorro porcentual en pesos/kg en material de la lámina I contra la lámina E es de 18.3%. La composición de la lámina J (32.72 Pesos/Kg) es más económica que la composición de la lámina E (34.10 Pesos/Kg) gracias al bajo costo del carbonato de calcio. La tabla 15 muestra el costo en pesos mexicanos de cada kilogramo de formulación del compuesto, así como la resistencia a la tensión en millones de Pascales sobre el costo en pesos de cada kilogramo de material.

Tabla 15. Costo del compuesto para cada kilogramo de material.

Lamina	% Fibra	%Resina	%Cargas	Costo en pesos (\$/Kg)	Resistencia a la tensión por costo (MPa/\$)
A	0	100	0	32.000	1.278
B	0	90	10	29.040	1.049
C	0	80	20	26.080	1.012
D	0	70	30	23.120	1.200
E	30	70	0	34.100	3.422
F	40	60	0	34.800	4.318
G	30	63	7	32.028	4.069
H	30	56	14	29.956	4.452
I	30	49	21	27.884	4.549
J	40	53	7	32.728	5.599

Capítulo 8. Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos en este trabajo se emiten las siguientes conclusiones:

- Es posible fabricar un compuesto Poliéster-Fibra de vidrio-Cargas de carbonato de calcio por el método de *hand lay up* con una resistencia específica de 113 MPa/(cm³*g⁻¹).
- Agregar carbonato de calcio en el poliéster insaturado aumenta el módulo de rigidez aunque no de forma como lo predice la regla de las mezclas, la ecuación de viscosidad modificada de Einstein se aproxima mejor.
- La elongación a la rotura, la resistencia al impacto, la resistencia a la tracción y a la flexión disminuyen al agregar cargas de carbonato de calcio con un tamaño medio de 15 micras al poliéster insaturado.
- Agregar fibras de vidrio E en el poliéster insaturado aumenta las propiedades mecánicas tanto a tensión y flexión pero la propiedad donde más se ve beneficiada el plástico reforzado por fibras es la resistencia al impacto. En este caso agregar fibras al poliéster aumento la elongación a la rotura del compuesto debido a que esta característica está gobernada por la fibra.
- En un compuesto Fibra de vidrio-Poliéster-CaCO₃, las propiedades mecánicas mejoran ya que las cargas mejoran la rigidez de la matriz sin afectar la elongación a la rotura del compuesto ya que esto depende principalmente de las fibras, aunque la cantidad de carbonato de calcio baja ligeramente la resistencia al impacto y la deflexión a la rotura pero no de forma drástica.
- El efecto negativo en las propiedades mecánicas que inducen las cargas de carbonato de calcio en el poliéster disminuye al agregar fibras de vidrio en el compuesto poliéster-carbonato de calcio.

- De las imágenes MEB se concluye que la interfaz entre la fibra de vidrio y el poliéster PTT-5536 es fuerte ya que al separarse las fibras de la matriz estas aún mantienen parte de la matriz.

Se considera que esta investigación colaborara al desarrollo e interés de los materiales compuestos en nuestro estado como materiales alternativos a los metales en aplicaciones estructurales, no solo como cofres de camiones, ya que sus aplicaciones pueden ser muy extensas, este trabajo ha demostrado que los compuestos poliéster-fibra de vidrio-carbonato de calcio son fáciles de producir, resistentes, livianos y económicos, aunque aún existen un numero de limitantes técnicas principalmente en la manufactura, caracterización y uniones que impiden usarlos extensivamente en la actualidad muchos creen incluyéndome que el mercado de los materiales compuestos crecerá.

Referencias

1. **P.G Babaevskii**, Effect of disperse mineral fillers on the strain-strength properties and crack resistance of cured polyesters, 1987.
2. **Bahadur** Mechanical and tribological behavior of polyester reinforced with short glass fibers, 1989.
3. **Shao-Yun Fu**, Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites, 2008.
4. **M.T Isa**, Effect of fiber type and combinations on the mechanical, physical and thermal stability properties of polyester hybrid composites, 2013.
5. **M. Ramesh**, Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites, 2012.
6. **Robert K**, Technology assessment of advanced composite materials, 1978.
7. **Ravi B. Deo**. Low-Cost Composite Materials and Structures for Aircraft, 2001.
8. **D. Askeland**, Ciencia e ingeniería de materiales, Cengage Learning, 2011.
9. **Bertram**, Properties and applications of ceramic composites containing silicon carbide whiskers, 2011.
10. **H. Soung**, Principles of the manufacturing of composite materials, 2009.
11. **Antonio Miravete**, Materiales compuestos, Asociación Española de M. C. 2007.
12. **F.C. Campbell**, Manufacturing Technology for aerospace structural, Elsevier, 2006.
13. **F.C. Campbell**, Structural Composite Materials, ASM International, 2010.
14. **Hull y T.W.Clyne**, An introduction of composite materials, Cambridge, 1996.
15. **Uday Vaidy**, Composites for Automotive, Truck and Mass Transit Materials, Destech, 2011.
16. **B.Strong**, Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, 2008.
17. **M. Xanthos**, Functional Fillers for Plastics, 2010.
18. **B.Strong**, Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, 2008.
19. **Carlos R. Vázquez**, Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz Polimérica reforzado con fibras, UANL, 2013.
20. **Jang-Kyo Kim**, Engineered Interfaces in fiber Reinforced Composites, Elsevier, 1998.

21. **R. Mott**, Diseño de elementos de máquinas, 2006.
22. **Robert M. Jones**, Mechanics of composite materials, Taylor & Francis, 1999.
23. **V. V. Valery, E. Morozov**, Advanced Mechanics of composite Materials, Elsevier, 2013.
24. **A. Griffith**, The phenomena of rupture and flow in solids, 1921.
25. **Jang-Kyo Kim**, Engineered Interfaces in fiber Reinforced Composites, Elsevier, 1998.
26. **F.T. Wallenberger**, Fiberglass and glass technology, Springer 2010.
27. **Antonio Miravete**, Materiales compuestos, Asociación Española de M. C. 2007.
28. **F.C. Campbell**, Structural Composite Materials, ASM International, 2010.
29. **Tuttle M. E.** Structural analysis of polymeric composite materials, 2004.
30. **F.C. Campbell**, Manufacturing Technology for aerospace structural, Elsevier, 2006.
31. **M. Meyers**, Mechanical behavior of materials, Cambridge, 2009.
32. **R. N. Rethon**, Particulate-filled Polymer Composites, 2003.
33. **Shao-Yun Fua**, Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate polymer composites, 2008.
34. **B. Harris**, Engineering composites, Institute of materials London, 1999.
35. **Yunkai Lu**, Mechanical Properties of Random Discontinuous Fiber Composites Manufactured from Wetlay Process, 2002.
36. **Robert K**, Technology assessment of advanced composite materials, 1978.
37. **B.Strong**, Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, 2008.
38. **Committee ASM International**, Handbook Vol. 21: Composites, 2001.
39. **Ravi B. Deo**. Low-Cost Composite Materials and Structures for Aircraft, 2001.
40. **Uday Vaidy**, Composites for Automotive, Truck and Mass Transit Materials, Destech, 2011.
41. **M. Xanthos**, Functional Fillers for Plastics, 2010.
42. **Hull y T.W.Clyne**, An introduction of composite materials, Cambridge, 1996.
43. **DOD**, Composite Materials Handbook MIL-HDBK-17-3F, 2002.
44. **D. Askeland**, Ciencia e ingeniería de materiales, Cengage Learning, 2011.
45. **J.F. Shackelford**, Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, Pearson, 2010.
46. **M. Araujo**, Fiberglass Wastes/Polyester Resin Composites: Mechanical Properties, 2006.

47. **P.K. Mallick**, Fiber Reinforced composites, CRC Press, 2008.
48. **Robert M. Jones**, Mechanics of composite materials, Taylor & Francis, 1999.
49. **K. Sanjay** Composites manufacturing, CRC Press, 2002.
50. **J.M Hodgkinson**, Mechanical testing of advanced fibre composites, 2000.
51. **G.M Antigüedad**, Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con nano fibras de carbono para aplicaciones tecnológicas, 2008.
52. **Bertram**, Properties and applications of ceramic composites containing silicon carbide whiskers, 2011.
53. **J.C.Wahl**, Design of composite structures for aeronautics, 2009.
54. **Carlos R. Vázquez**, Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz Polimérica reforzado con fibras, Tesis Maestría, UANL, 2013.
55. **D.E. Lozano**, Aspectos físicos y factores que determinan la calidad superficial en el maquinado de composites de matriz polimérica reforzados con fibras, Tesis Maestría, UANL 2014.
56. **R.E. Reed**, Principios de metalurgia física, Editorial Continental, 1979.
57. **J.Kiehl**, Influence of fillers content on the viscosity of unsaturated polyester resin/calcium carbonate blends, Journal of composite materials, 2012.
58. **W.A Hanna**, Characterization of Ceramic Filled Polymer Matrix Composite Used for
59. Biomedical Applications, 2011.
60. **R.W. Meyer** Handbook of Polyester Molding compounds and molding technology, Capman and Hall, 1987.
61. **M. Badawy** Impact behavior of glass fibers reinforced composite laminates at different temperatures, 2012.
62. **Perez**, Aplicación de nuevos materiales a soluciones de vivienda en Colombia, 2005.
63. **S.W. Tsai**, Composite Materials Design and applications, CRC Press, 2003.
64. **G. Dieter**, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill 1976.
65. **E. Mangino**, The future of structural composites materials in the automotive industry.
66. **H. Soung**, Principles of the manufacturing of composite materials, 2009.
67. **L. Stuart**, Handbook of composite reinforcements, 1992.
68. **L. Bilurbina**, Materiales no metálicos resistentes a la corrosión, 1990.
69. **R. Mott**, Diseño de elementos de máquinas, 2006.

70. **Julien Kiehl, J. Huser**, Influence of fillers content on the viscosity of unsaturated Polyester resin/calcium carbonate blends, *Journal of composites materials*, 2012.
71. **P.G Babaevskii**, Effect of disperse mineral fillers on the strain-strength properties and crack resistance of cured polyesters, 1987.
72. **Bahadur** Mechanical and tribological behavior of polyester reinforced with short glass fibers, 1989.
73. **Shao-Yun Fu**, Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites, 2008.
74. **M.T Isa**, Effect of fiber type and combinations on the mechanical, physical and thermal stability properties of polyester hybrid composites, 2013.
75. **M. Ramesh**, Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites, 2012.

Índice de figuras y tablas

Figura 1. Aplicaciones de material compuesto en el B-2.	8
Figura 2. Concreto polimérico.	10
Figura 3. Efecto de la orientación de las fibras sobre la resistencia.	11
Figura 4. Configuraciones comunes de las fibras.	12
Figura 5. Whiskers de carburo de Si.	13
Figura 6. Comparación entre acero, Al y compuestos.	16
Figura 7. Representación de daños internos en una lámina.	18
Figura 8. Efecto en la resistencia de las fibras en función al diámetro.	20
Figura 9. Detalle de la fabricación de las fibras de vidrio.	22
Figura 10. Representación en dos dimensiones de un vidrio.	23
Figura 11. Arreglo de los átomos en el grafito.	25
Figura 12. Representación de la estructura de fibra de Ca.	25
Figura 13. Estructura de las fibras de aramida.	25
Figura 14. Comparación entre las principales fibras.	27
Figura 15. Ingredientes principales del UPE.	33
Figura 16. Grupo epóxi.	36
Figura 17. Los ingredientes principales de una matriz epóxica	35
Figura 18. Micrografía de una fractura de un compuesto vidrio –epoxi	36
Figura 19. Diferencia entre una resina termoestable y termoplástica	38
Figura 20. Efecto de una interfaz fuerte en una lámina.	39
Figura 21. Ángulo de contacto y energías de superficie para una gota en una superficie sólida.	41
Figura 22. Interdifusión entre la fibra de vidrio recubierta con agentes de silanos y la matriz.	42
Figura 23. Representación de una unión química.	43

Figura 24. Estructura de un organosilano	44
Figura 25. Variación de los esfuerzos en una fibra corta.	45
Figura 26. Deformación de una fibra y la matriz sujeta a una carga	45
Figura 27. Comportamiento mecánico de varios materiales.	46
Figura 28. Relación entre esfuerzo y deformación unitarios en compuestos.	50
Figura 29. Relación entre la longitud de la fibra y el esfuerzo	53
Figura 30. Dimensiones de probeta para tensión plástico reforzado	57
Figura 31. Dimensiones de probeta para impacto.	58
Figura 32. Diseño de dado inferior para ensayos de flexión.	59
Figura 33. Dimensiones para probetas de flexión.	59
Figura 34. Esquema del dispositivo que permite medir peso en agua.	61
Figura 35. MEB de carbonato de calcio.	62
Figura 36. MEB de una sola fibra de vidrio E.	63
Figura 37. MEB de una fractura de una probeta de tensión vidrio-poliéster.	63
Figura 38. Micrografía de una fractura tras un ensayo de impacto.	64
Figura 39. Micrografía de resina poliéster tras una fractura por un ensayo a tensión	64
Figura 40. Efecto del CaCO_3 en el poliéster sobre las propiedades mecánicas a tensión.	69
Figura 41. Efecto de las fibras de vidrio en el poliester en propiedades a tensión.	69
Figura 42. Graficas esfuerzo deformación de cada composición.	70
Figura 43. Predicciones y valor obtenido en el módulo de rigidez para el Poliester- CaCO_3	70
Figura 44. Resistencia al impacto de las laminas de poliester	76
Figura 45. Efecto del CaCO_3 en el Poliéster en propiedades mecánicas a flexión.	74
Figura 46. Efecto combinado de las fibras y cargas en el módulo de flexión.	78

Tabla 1. Propiedades de algunos materiales Ingenieriles.	13
Tabla 2. Resumen comparativo entre materiales.	18
Tabla 3. Óxidos que componen las fibras de vidrio.	19
Tabla 4. Propiedades típicas de las fibras de vidrio.	22
Tabla 5. Propiedades típicas de las fibras de carbono.	25
Tabla 6. Propiedades típicas de las fibras de kevlar.	27
Tabla 7. Propiedades típicas del carbonato de calcio.	29
Tabla 8. Matrices poliméricas comerciales	31
Tabla 9. Propiedades típicas del poliéster.	33
Tabla 10. Propiedades típicas del epoxi.	36
Tabla 11. Formulaciones de Fibra de vidrio-Poliéster-Cargas.	56
Tabla 12. Densidad y cantidad de poros en las láminas producidas.	61
Tabla 13. Resultados de impacto.	72
Tabla 14. Resumen de propiedades mecánicas obtenidas.	79
Tabla 15. Costo del material de compuesto.	80

Anexo

Participaciones en congresos derivadas de la tesis

1. Poster titulado: "Mechanical properties of fiberglass reinforced polyester laminates with calcium carbonate fillers", Gonzalez Villarreal Mauricio, Hinojosa Rivera Moises, Sanchez Marquez Jose Antonio, XXII Congreso Internacional de Materiales (Sociedad Mexicana de Materiales).

Apéndice 1

Este apéndice describe la técnica de hand lay up utilizada para fabricar las láminas del material compuesto usada en este trabajo de investigación.

1. Limpiar dos vidrios cuadrados de 40x40cm que fueron usados como molde.
2. Aplicar una capa de cera a los vidrios y posteriormente removerla 5 minutos después de haberse aplicado.
3. Cortar cuatro capas de fibra de vidrio usando un marco como referencia para que las capas queden cuadradas usando un exacto (cutter) para obtener un corte limpio.
4. Pesar las fibras y con eso poder establecer la relación fibra-matriz.
5. Colocar en un vaso encerado la cantidad de resina acorde a la relación deseada.
6. Reunir el material necesario, rodillo, espátula. Una vez que se está listo para laminar agregar 1.25% de la masa de la resina de iniciador Butanox (peróxido de metil etil cetona) y mezclar con una espátula.
7. Si lleva carbonato de calcio agregar después de mezclar el iniciador. Debe mezclarse completamente hasta que desaparezcan todos los grumos.
8. Esparcir un poco de resina en el molde, colocar la primera capa de fibra de vidrio y con el rodillo impregnarla completamente.
9. Repetir el proceso hasta impregnar las cuatro capas de fibra de vidrio.
10. Colocar un vidrio encima para obtener superficie lisas en ambas superficies.
11. Dejar curar por un día a temperatura ambiente.

Para la fabricación de las láminas mediante casting estos fueron los pasos a seguir:

1. Tomar dos vidrios limpios, encerarlos y remover el exceso de cera 5 min después.
2. Colocar un tubo de plástico en medio de los vidrios y colocar varios sujetadores, el tubo de plástico dará el grosor.
3. Pesar la resina en un vaso y agregar el iniciador.
4. Si lleva cargas se agregan después de mezclar el iniciador con la resina.
5. Verter la resina ya mezclada con el iniciador sobre el molde.
6. Dejar curar por un día a temperatura ambiente.

Apéndice 2

Dimensiones obtenidas en los en las probetas de tensión, todas con una longitud 165 mm.

Lamina	Probeta 1	2	3	4	5	6	Promedio
A	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
Anchura W	12.883	12.953	12.653	13.247	13.013	12.847	12.933
Espesor	4.383	4.420	4.473	4.517	4.557	4.597	4.491
B							
Anchura W	12.900	12.853	12.890	12.810	12.887	12.910	12.875
Espesor	4.397	4.427	4.440	4.523	4.603	4.600	4.498
C							
Anchura W	12.663	12.617	12.573	12.770	12.770	12.670	12.677
Espesor	4.777	4.653	4.520	4.530	4.633	4.637	4.625
D							
Anchura W	12.693	12.403	12.543	12.733	12.687	12.717	12.629
Espesor	4.547	4.583	4.570	4.617	4.640	4.627	4.597
E							
Anchura W	12.793	12.800	12.940	12.830	12.847	12.800	12.835
Espesor	3.827	3.607	3.877	3.600	3.720	3.637	3.711
F							
Anchura W	13.120	12.637	12.530	12.650	12.580	12.650	12.694
Espesor	2.933	2.937	2.920	2.943	2.933	2.943	2.935
G							
Anchura W	12.953	12.860	12.770	12.887	12.843	12.850	12.861
Espesor	3.693	3.847	3.903	3.797	3.720	3.873	3.806
H							
Anchura W	12.787	12.717	12.783	12.807	12.753	12.717	12.761
Espesor	3.863	3.720	3.790	3.710	3.760	3.593	3.739
I							
Anchura W	12.873	12.990	12.843	12.833	12.867	12.970	12.896
Espesor	3.393	3.563	3.640	3.693	3.723	3.703	3.619
J							
Anchura W	12.590	12.670	12.653	12.670	12.590	12.563	12.623
Espesor	2.457	2.583	2.547	2.490	2.403	2.417	2.483

Apéndice 3

Dimensiones de las probetas de Impacto.

A	Lamina	mm	mm	mm	F	Lamina	mm	mm	mm
#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A	#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A
1	63.22	12.45	4.57	10.0203	1	64.02	12.4	2.825	9.652
2	63.45	12.46	4.49	9.9822	2	64.33	12.42	2.825	9.6139
3	64.43	12.435	4.44	9.9771	3	64.2	12.42	2.82	9.4742
4	64.55	12.445	4.42	9.9695	4	64.13	12.385	2.655	9.6139
5	64.06	12.47	4.43	10.0203	5	64.21	12.385	2.635	9.6393
Prom.	63.942	12.452	4.47	9.99388	Prom.	64.178	12.402	2.752	9.59866
B	Lamina	B			G	Lamina	G		
#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A	#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A
1	63.28	12.555	4.455	9.9314	1	64.19	12.99	3.715	9.9949
2	64.16	12.55	4.68	9.9314	2	64.31	13	3.995	9.8171
3	63.62	12.55	4.72	10.033	3	64.12	12.355	3.815	9.8933
4	63.37	12.51	4.695	9.7409	4	63.89	12.99	3.935	9.9187
5	63.48	12.46	4.66	9.9949	5	64.12	12.36	3.805	10.058
Prom.	63.582	12.525	4.642	9.92632	Prom.	64.126	12.739	3.853	9.93648
C	Lamina	C			H	Lamina	H		
#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A	#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A
1	63.94	12.615	4.68	9.9949	1	64.12	12.58	3.835	9.9568
2	63.52	12.465	4.57	9.9187	2	64.22	12.615	3.81	9.9187
3	63.22	12.47	4.555	9.906	3	63.89	12.625	3.635	9.7663
4	63.78	12.49	4.465	9.8679	4	62.99	12.555	3.68	9.9314
5	62.97	12.425	4.475	9.9441	5	64.9	12.68	3.66	9.906
Prom.	63.486	12.493	4.549	9.92632	Prom.	64.024	12.611	3.724	9.89584
D	Lamina	D			I	Lamina	I		
#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A	#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A
1	64.26	12.425	4.945	9.9822	1	64.44	12.4	3.75	9.8044
2	63.84	12.385	4.98	9.906	2	64.05	12.615	3.77	9.6901
3	63.89	12.62	4.97	10.007	3	63.75	12.645	3.745	9.6774
4	64.3	12.39	4.815	9.9568	4	64.35	12.615	3.75	9.7028
5	64.09	12.43	4.82	9.9441	5	65.48	12.63	3.745	9.9314
Prom.	64.076	12.45	4.906	9.95934	Prom.	64.414	12.581	3.752	9.76122
E	Lamina	E			J	Lamina	J		
#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A	#	Largo L	Ancho E	Espesor	Ancho A
1	64.88	12.35	3.025	9.8044	1	64.16	12.395	2.775	9.8425
2	64.02	11.675	3.295	9.4869	2	64.48	12.425	2.765	9.8552
3	64.96	11.71	3.04	9.7663	3	64.47	12.715	2.75	9.9568
4	62.36	12.505	3.18	9.7917	4	64.24	12.425	2.74	9.7409
5	64.16	12.325	3.055	9.8679	5	64.64	11.39	2.475	9.7917
Prom.	64.076	12.113	3.119	9.74344	Prom.	64.398	12.27	2.701	9.83742

Apéndice 4

Dimensiones de probetas de flexión.

A	mm	mm
#	Ancho	Espesor
1	12.85	4.356
2	12.83	4.376
3	12.803	4.39
4	12.71	4.39
5	12.69	4.386
Promedio	12.77	4.38
B		
1	12.96	4.516
2	12.8	4.503
3	12.99	4.593
4	12.736	4.603
5	12.746	4.64
Promedio	12.849	4.571
C		
1	12.99	4.54
2	12.69	4.44
3	12.84	4.39
4	12.79	4.396
5	12.70	4.413
Promedio	12.80	4.436
D		
1	12.74	4.58
2	12.77	4.54
3	12.74	4.406
4	12.80	4.343
5	12.91	4.316
Promedio	12.79	4.437
E		
1	12.73	3.596
2	13.06	3.66
3	12.85	3.28
4	12.83	3.47
5	12.88	3.253
Promedio	12.873	3.451

F	mm	mm
#	Ancho	Espesor
1	12.78	2.713
2	12.736	2.753
3	12.686	2.743
4	12.86	2.740
5	12.72	2.713
Promedio	12.758	2.7327
G		
1	12.906	3.786
2	12.926	3.866
3	12.85	3.960
4	12.856	4.073
5	12.766	3.856
Promedio	12.8613	3.9087
H		
1	12.836	3.8
2	12.696	3.64
3	12.797	3.667
4	12.82	3.810
5	12.833	3.8167
Promedio	12.796	3.746
I		
1	12.646	3.533
2	12.736	3.480
3	12.733	3.660
4	12.953	3.686
5	12.74	3.70
Promedio	12.762	3.612
J		
1	12.716	2.510
2	12.783	2.566
3	12.776	2.643
4	12.93	2.720
5	12.733	2.760
Promedio	12.788	2.64

Apéndice 5

Imágenes de probetas ensayadas



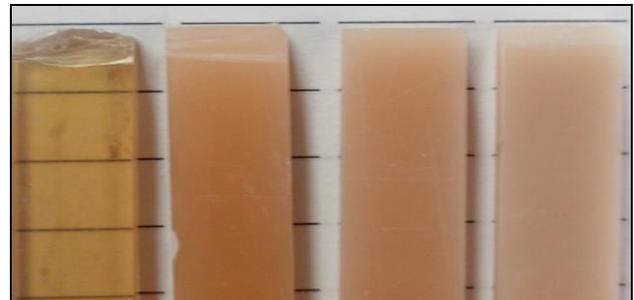
Probetas de tracción Poliéster-Vidrio después de ser ensayadas.



Probetas de impacto después de ser ensayadas, de izquierda a derecha, poliéster, poliéster-CaCO₃, vidrio-poliéster, vidrio-epóxica y carbono-epóxica



Probetas de poliester-vidrio de flexion. Ninguna probeta de este tipo mostro una fractura completa, todos con modo de falla de delaminacion, la maquina universal detiene el ensayo al detectar una gran caída a la resistencia a la flexion.



Probetas de flexion de poliester y poliéster-CaCO₃, izquierda poliéster no reforzado muestra una fractura semi-dúctil, enseguida poliéster con 10% de CaCO₃ muestra una pérdida en ductilidad y transparencia, enseguida poliéster- CaCO₃ de 20 y 30% ambas con fractura muy frágil.

“Por las noches contemplarás las estrellas. La mía es muy pequeña para que pueda decirte donde se encuentra. Es mejor así, mi estrella será para ti una de tantas. Por eso te gustará contemplarlas a todas...”

Antoine de Saint-Exupé

Contacto: mauriciogonvi@gmail.com