

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1. ANTECEDENTES

Actualmente en el país se trabaja la fibra de virio de una forma muy artesanal, es decir que todo el trabajo se basa en la experiencia, por ejemplo un artesano prepara la resina únicamente observando el color que va tomando esta, pero lo interesante sería conocer las cantidades exactas que se necesita de cada componente para obtener una resina apropiada. Al momento de colocar la fibra lo hacen muy desordenadamente, no saben si colocar las fibras en paralelo o perpendicular o en forma mixta.

Por lo expuesto anteriormente, es necesario contar con una metodología de diseño aplicable a la fibra de vidrio nacional, que permita obtener un mejor desempeño en las aplicaciones a las cuales se someta la pieza estructural.

1.2. DEFINICION DEL PROBLEMA

Generalmente, a la fibra de vidrio se la utiliza como recubrimiento, ya que por lo menos en nuestro país no existen valores reales de propiedades mecánicas, no se la utilizado para edificaciones estructurales.

Por lo cual no se la puede dar mayor utilidad a la estipulada anteriormente. Además su preparación es completamente artesanal por lo que en muchas ocasiones la resina es demasiado acelerada o también se colocan volúmenes de fibra y resina no adecuados.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En nuestro medio es de conocimiento general las aplicaciones que tienen materiales conocidos como el acero, aluminio, hierro fundido, etc.; y la metodología de diseño aplicable en estos materiales para la construcción de piezas estructurales.

En el caso de la fibra de vidrio nacional no existe ningún método conocido para diseñar y construir piezas estructurales, además de ignorar las propiedades mecánicas que tiene este material compuesto, que ayudaría en las aplicaciones que se le podría dar a la fibra de vidrio nacional.

Por este motivo creemos de gran importancia encontrar la metodología del diseño más idónea para la elaboración de elementos estructurales con materiales compuestos (fibra de vidrio nacional), realizando ensayos mecánicos con comprobación de resultados, y la validación de resultados de un elemento estructural mediante un software.

1.4. ALCANCE

- Se utilizarán materiales que estén disponibles en el distrito metropolitano de Quito.
- La metodología será obtenida de cualquier texto de materiales compuestos.
- El proceso de fabricación se lo realizará en base artesanal
- Los ensayos mecánicos se los hará sobre cargas a sollicitación simple.

1.5. OBJETIVOS

- Realizar un estudio teórico de materiales compuestos en base de fibra de vidrio y resina.
- Estudio del proceso de fabricación de materiales compuestos de fibra de vidrio nacional y resina.
- Proponer una metodología del diseño para la elaboración de piezas estructurales en fibra de vidrio nacional y resina.
- Diseñar y construir elementos estructurales sometidos a cargas simples.

- Diseñar y construir un elemento estructural para la validación de resultados.
- Diseñar aplicando un software adecuado.
- Realizar ensayos mecánicos sobre probetas de fibra de vidrio nacional y resina.
- Realizar ensayo de fatiga sobre un elemento estructural en fibra de vidrio nacional y resina.
- Comparar resultados obtenidos en el diseño con los obtenidos en forma práctica.
- Analizar los resultados.
- Realizar análisis económico y financiero del proyecto.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO DE MATERIALES COMPUESTOS

INTRODUCCIÓN

Un material compuesto es un sistema de materiales constituidos por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro-constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí.

La importancia de un material compuesto para la ingeniería radica en que dos o más materiales distintos se combinan para formar un material compuesto cuyas propiedades sean superiores, o en algún modo más importantes que las de sus componentes.

En 1907, el químico belga Leo Baekeland obtuvo por primera vez una resina termoestable. Baekeland calentó y aplicó presión en un recipiente especial a un fenol y un formaldehído para obtener una resina líquida que polimerizó y tomó la forma del recipiente.

A lo largo de las tres primeras décadas de este siglo se van incorporando el resto de matrices:

- ◆ Las fenólicas
- ◆ Las poliéster
- ◆ Las vinilesteres
- ◆ Las epoxis

Los primeros métodos de fabricación fueron los moldeados por contacto a mano. En 1930 se estaba fabricando mediante este método un número elevado de estructuras donde los requerimientos mecánicos no eran elevados, pero había problemas de formas, peso o aislamiento eléctrico y por lo tanto, este tipo de materiales comenzaba a ser una alternativa frente a los tradicionales, acero, hormigón, aluminio o madera.

En 1951 aparecen las primeras patentes de métodos automatizados como la pultrusión. La producción arranca en 1956, desde entonces ha ido en aumento la producción de perfilería para una larga lista de sectores productivos.

Por primera vez, se disponía comercialmente de materiales compuestos estructurales ya que la fiabilidad de este proceso, así como la elevada resistencia del perfil lo hacía idóneo para aquellos casos donde no solo era importante el peso o el aislamiento eléctrico sino también los requerimientos mecánicos.

En los sesenta se comienzan a utilizar en los Estados Unidos, fibras avanzadas:

- ◆ Carbono
- ◆ Boro
- ◆ Aramidas

En ese momento, existían dos campos de materiales compuestos claramente diferenciados:

- ◆ El campo de la aeronáutica
- ◆ El campo de la gran difusión:
 - Sector eléctrico
 - La marina
 - Transporte terrestre
 - La construcción

Hoy en día, el panorama de los materiales compuestos es muy diferente, ya que no hay diferencias entre los dos campos salvo en el tema de normativa y control de calidad. En lo que se refiere a materiales y procesos, han aparecido nuevas tecnologías que han llenado el espacio entre los campos anteriormente expuestos y han difuminado las diferencias que existían entre las dos áreas hace cuatro décadas.

La fibra es un elemento de refuerzo del material compuesto, pues aporta resistencia mecánica:

- ◆ Tracción
- ◆ Rigidez
- ◆ Dureza

Es el componente determinante para obtener las principales propiedades mecánicas del compuesto. Las características más importantes de las fibras en

los materiales compuestos son su resistencia a la tracción específica y su modulo específico.

Tabla 2.1 Materias primas que componen un material compuesto.

FIBRAS	Fibras Cerámicas (carburo de silicio, alúmina)
	Fibras Metálicas
	Fibras Inorgánicas (carbono, vidrio, boro)
	Fibras Orgánicas (aramida, polietileno)
MATRICES	Matrices Inorgánicas (cemento, geopolímeros, yeso)
	Matrices Termoestables (epoxi, viniléster, poliéster, fenólica, esteres cianato, bismaleimidias, poliimidias, polieteramida)
	Matrices Termoplásticas (ABS, polipropileno, policarbonato, acetato, PBT, polieteramida, PET, nylon, poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS)
NÚCLEOS	Nidos de abeja (aluminio, nomex, polipropileno)
	Espumas (poliuretano, poliestireno, PVC)
	Sándwich Tejido 3D , madera de balsa
ADHESIVOS	Epoxi, poliuretano, acrílicos
RECUBRIMIENTOS	Cerámicos, fenólicos, epoxi + arena, intumescentes, mats

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 2.2 Clasificación de fibras en función de su origen.

FIBRAS DE ORIGEN MINERAL	Fibras Cerámicas (carburo de silicio, aramida)
	Fibras Metálicas
	Fibras de origen Inorgánico (carbono, vidrio, boro)
FIBRAS DE ORIGEN ORGÁNICO	Aramida, polietileno

Fuente: Materiales Compuestos I

2.1. MATERIAS PRIMAS

2.1.1. FIBRA DE VIDRIO

2.1.1.1. Generalidades

“La fibra de vidrio se remonta a la época de los Egipcios, quienes descubrieron sus virtudes de resistencia para armar vasos y ánforas en las tumbas de los faraones. Las fibras tejidas datan del siglo XVIII en Francia y la producción de fibra de vidrio continua se consiguió en 1938 en Estados Unidos, formándose la compañía Owens-Corning Fiberglass. Los primeros estudios ingenieriles sobre materiales compuestos fueron realizados sobre materiales compuestos de fibra de vidrio.”¹

Las fibras de vidrio se utilizan para reforzar matrices plásticas y formar así materiales compuestos estructurales y productos de moldeo. Los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio tienen las siguientes características favorables:

- ◆ Buena relación resistencia / peso.
- ◆ Buena estabilidad dimensional.
- ◆ Buena resistencia al calor.
- ◆ Buena resistencia al frío.
- ◆ Buena resistencia a la humedad y a la corrosión.
- ◆ Buenas propiedades aislantes eléctricas.
- ◆ Facilidad de fabricación.
- ◆ Costo relativamente bajo.

Las dos clases mas importantes de vidrio utilizadas para la fabricación de fibras de vidrio para materiales compuesto son los vidrios E (eléctricos) y los vidrios S (de alta resistencia).

“Los vidrios E son los más utilizados en la fabricación de fibras continuas. Básicamente, el vidrio E es un vidrio de borosilicato de calcio y aluminio con muy bajo o nulo contenido en potasio y sodio. La composición básica de los vidrios E es de un 52 a un 56 % de SiO_2 , de un 12 a un 16 % de Al_2O_3 , de un 16 a un 25 % de CaO , y 8 a un 13 % de B_2O_3 , este tipo de vidrio tiene una resistencia a la tracción de 500 KSI y un módulo de elasticidad de 10.5 MSI.

¹ “MATERIALES COMPUESTOS I”, Antonio Miravete, 1era Edición, pág.: 19.

Los vidrios S tienen una relación resistencia / peso más alta y son más caros que los vidrios E. Estos vidrios son utilizados especialmente en aplicaciones militares y aeroespaciales. Su resistencia a la tracción está sobre los 650 KSI, su módulo de elasticidad es de 12.4 MSI. Usualmente su composición es de aproximadamente un 65 % de SiO₂, 25 % de Al₂O₃ y 10 % de MgO.”²

2.1.1.2. Tipos de fibra de vidrio

Los vidrios más utilizados son aquellos a base de sílice que contiene en disolución por lo menos dos silicatos:

- ◆ Un silicato alcalino (silicato de sodio)
- ◆ Un alcalinotérreo (silicato de calcio)

El óxido de sodio actúa como fundente, facilitando el proceso al bajar la temperatura de fusión de la sílice, así como su viscosidad. Por el contrario su presencia afecta a la resistencia química del vidrio y por ello se introduce un alcalinotérreo.

- **Vidrio E (eléctrico):** Representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90 % de los refuerzos y tiene buenas propiedades eléctricas.
- **Vidrio A (alto contenido de álcali):** Es menos resistente y tiene un módulo más bajo que el vidrio E, presenta gran resistencia química.
- **Vidrio AR (álcali resistente):** Es el único tipo de vidrio que puede combinarse con el hormigón o cemento.
- **Vidrio C (químico):** se sitúa entre el vidrio A y el E y se utiliza entre las capas superficiales de estructuras anti corrosión, tiene una alta resistencia química.
- **Vidrio R ó S (resistencia):** Empleado en estructuras de elevadas características mecánicas, tiene una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio, resistente a la fatiga, temperatura y humedad.
- **Vidrio D (dieléctrico):** Con sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobre todo en la construcción de materiales electrónicos de

² “FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES”, William F. Smith, 3era Edición, pág.: 643.

telecomunicación. Estos materiales presentan muy débiles pérdidas eléctricas.

- **Vidrio B (boro):** Tiene excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido de álcali.
- **Vidrio ERC (eléctrico y resistente químico):** Con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.
- **Vidrio X:** Con base de Li_2O por su transparencia a rayos X.

2.1.1.3. Propiedades de la fibra de vidrio

Las principales características de la fibra de vidrio son:

- **Alta adherencia fibra – matriz,** gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- **Resistencia mecánica,** siendo su resistencia específica (tracción / densidad) superior a la del acero.
- **Características eléctricas,** es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad dieléctrica, permeable a las ondas electromagnéticas.
- **Incombustibilidad,** materia mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza, no propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- **Estabilidad dimensional,** poco sensible a las variaciones de temperatura, tiene un bajo coeficiente de dilatación.
- **Compatibilidad con la materias orgánicas,** su actitud de recibir diferentes ensamajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso o el cemento.
- **Imputrescibilidad,** es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.
- **Débil conductividad térmica,** la utilización de los materiales compuestos en la industria de la construcción permite suprimir los puentes térmicos.

Tabla 2.3 Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio.

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de Hilo (um)	5 – 13	10 – 20	10	10
Densidad (Kg/m ³)	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72.5	86	85
Resistencia a la tracción (GPa)	3.1	3.4	4.59	3.4 – 4.4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /K)	8.6	5	5.1	5

Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.1.4. Fabricación

La fibra de vidrio esta formado principalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado.

Varios son los procedimientos que conducen a la producción de fibra de vidrio pero, en general, el principio sobre el cuál se basa es siempre el mismo; el estiramiento a muy alta temperatura, por tracción mecánica o por acción de fluidos en movimiento, de una veta o vena de vidrio fundido y su inmediata solidificación.

2.1.1.4.1. Fases de fabricación:

- a. Composición – fusión: Las materias primas, finamente molidas, se dosifican con precisión y se mezclan de forma homogénea. La mezcla es introducida en el horno de fusión y calentada a una temperatura determinada aproximadamente 1550 °C.
- b. Fibrado: El vidrio fundido en el horno es distribuido por canales y alimenta las hileras, que son baños de platino / rodio en forma prismática y agujereados en su base (entre 400 y 4000 agujeros calibrados, entre 2 y 8 µm de diámetro).

El vidrio fundido se mantiene en la hilera a unos 1250 °C, temperatura que permite su colada por gravedad, dando origen a barras de algunas décimas de micras de diámetro. A la salida de la hilera, el vidrio se estira a gran velocidad, entre 10 y 60 m/s y se enfría, primero por radiación y después por pulverización de agua. De esta forma se obtiene filamentos de varias micras de diámetro, uno por cada agujero.

- c. Ensimado: El conjunto de filamentos, desnudos tal y como salen de la hilera es inutilizable, ya que no hay cohesión entre ellos, no resiste la abrasión, sufren los ataques del agua, etc.

Para corregir estos defectos es necesario revestir los filamentos con una fina película (ensimaje), que esta constituida por una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos. El ensimaje se deposita sobre los filamentos a la salida de la hilera, cuando la temperatura del vidrio está comprendida entre 80 y 120 °C.

La cantidad de ensimaje que se deposita sobre el vidrio es relativamente bajo (0.3 – 3 %).

Características del ensimaje:

- Dar cohesión entre filamentos.
- Hacer aumentar o disminuir la rigidez.
- Proteger contra la abrasión.
- Eliminar la electricidad estática.
- Modular la impregnación por la resina.
- Favorecer la unión vidrio – resina.

Tabla 2.4 Principales componentes del ensimaje.

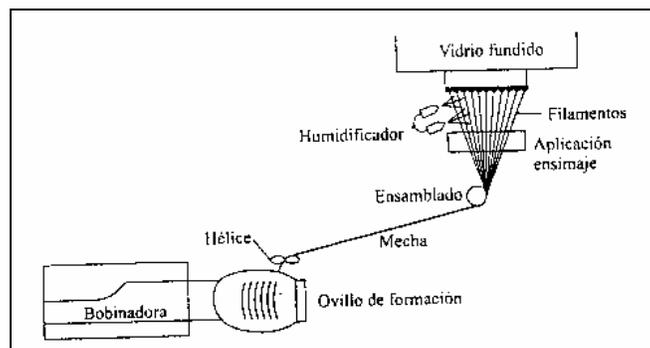
Constituyente	Porcentaje	Naturaleza química	Función
Líquido vector	85 - 95	Agua	Soporte
Agentes filmógenos colantes	3 - 15	Acetatos, poliésteres, epoxi, copolímeros	Integridad, rigidez, protección, impregnación
Agentes lubricantes	0.05 - 2	Aminas alif. Con radicales grasos, oxialcoholamidas, sales de amonio caaternario	Protección, lubricación
Agentes de puente	0.1 - 0.5	Silanos	Unión a la resina, resistencia, envejecimiento
Agentes antiestáticos	0.2 - 1	Sulfonatos de alquilarilo, sales de amonio cuaternario	Eliminar o reducir la electricidad estática

Fuente: Materiales Compuestos I

Tipos de Ensimaje:

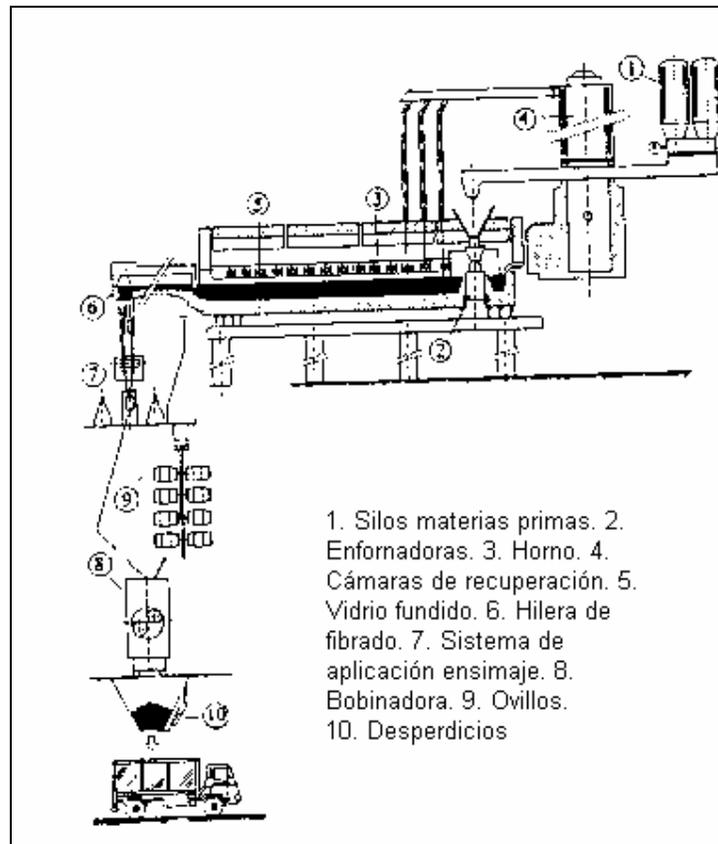
- Ensimajes textiles
- Ensimajes plásticos
- Ensimajes textil-plásticos:

Figura 2.1: Detalle de fabricación de la fibra de vidrio



Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.2: Fibrado de vidrio por fusión directa



Fuente: Materiales Compuestos I

- d. Bobinado: El conjunto de filamentos se agrupa en una o varias unidades para dar lugar a productos finales (roving directo) o productos intermedios (ovillos).
- e. Secado: Los productos procedentes del bobinado se pasan por diferentes dispositivos de secado con el objeto de eliminar el exceso de agua que se había disuelto el ensimaje.

2.1.1.5. Presentaciones Industriales

Tabla 2.5 Diferentes presentaciones de la fibra de vidrio.

MAT	SUPERFICIE HILOS CORTADOS HILOS CONTÍNUOS
ROVING	DIRECTO ENSAMBLADO SPUN ROVING VOLUMINIZADO TEXTURIZADO
TEJIDO	EQUILIBRADO ORIENTADO UNIDIRECCIONAL
PREFORMAS TEXTILES	BRAIDING WEFT KNITING WARP KNITING..
HILOS CORTADOS	REFUERZO TERMOPLÁSTICOS REFUERZO ESCAYOLA USOS VARIOS
VARIOS	FIBRA MOLIDA COMPLEJOS MAT-TEJIDO

Fuente: Materiales Compuestos I

a. MAT DE HILOS CORTADOS: Son filtros de hilos cortados a una longitud determinada y aglomerados entre sí mediante un ligante químico. Existen diversos tipos de mats, que se diferencian por las características del hilo de base (tipo de vidrio, diámetro de referencia, título y ensimaje) y por las del ligante (emulsión o polvo).

Se presentan en rollos bobinados sobre un tubo soporte de cartón y varían en cuanto al gramaje, que se encuentra entre 100 y 900 g/m² y en cuanto al ancho, entre 0.092 y 0.240 m.

Sus principales características son:

- Solubilidad en estireno
- Deformabilidad
- Nivel de impregnación
- Resistencia a la tracción
- Compatibilidad con las resinas

La capacidad de absorción de resina oscila entre dos y tres veces su peso, en el caso de los moldeos sin presión. La principal aplicación de este tipo de refuerzo es el moldeo de piezas por contacto a mano en molde abierto.

b. MAT DE HILOS CONTÍNUOS: Similar al anterior, siendo en este caso hilos continuos que se asocian entre sí a la salida de un conjunto de hileras. Sus principales características son:

- El tipo de vidrio (siempre es Vidrio E)
- Los diámetros de referencia, generalmente superiores a los del mat de hilos cortados
- El título de ensimaje, más simplificado y adaptado a la aplicación final
- El tipo de ligante, en proporciones más bajas

Se presenta en forma similar a los de mat de hilos cortados en cuanto a gramaje y ancho se refiere. Debido a su nivel de deformabilidad al mat de hilos continuos es posible realizar preformas profundas con alargamiento regular de mat en todas las direcciones. La principal aplicación de este tipo de refuerzo es el moldeo entre molde y contra molde de piezas de formas complejas por compresión, inyección o vacío.

c. MAT DE SUPERFICIE: También llamados velos, son fieltros de hilos cortados, ligados fuertemente y calandrados. Los gramajes oscilan entre 25 y 80 g/m² y las presentaciones son similares al resto de tipos de mat.

Las características principales de este tipo son:

- La deformabilidad
- La solubilidad
- El comportamiento al envejecimiento en medio químico agresivo, que es función del tipo de vidrio (A, C o E), y el ligante.

d. ROVING: Son ensamblados sin torsión de filamentos (roving directo) o hilos de vidrio (roving ensamblado) que han recibido un ensimaje plástico compatible con las resinas de estratificación. Las características que los distinguen son fundamentalmente las de los hilos de base:

- Naturaleza del vidrio
- Diámetro de referencia (filamento)
- Tipo de ensimaje
- Las presentaciones en este caso son numerosas
- Tipo de enrollamiento, según sean devanables por el exterior o por el interior
- Dimensiones de las bobinas (altura y diámetro)

Las propiedades exigibles, según el método de transformación son:

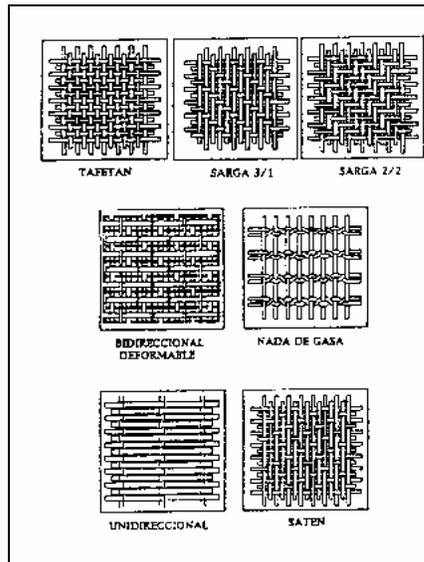
- Aptitud al devanado, adaptándose a las velocidades exigidas
- Equitensión de los hilos de base
- Rubanización (mayor o menor integridad de la media por agrupación de los filamentos o hilos de base)
- Apertura (inverso a la rubanización)
- Facilidad de impregnación

e. TEJIDO: En el caso de tejidos normalmente destinados al refuerzo de matrices termoestables, las armaduras más corrientes son:

- i. Telas o tafetanes (plan weave): Los hilos de trama y urdimbre se entrecruzan alternativamente. Los gramajes suelen variar de 150 a 1000 g/m².
 - ii. Satén (crowfoot satin): Los hilos de urdimbre y de trama están entrecruzados según un orden y una frecuencia programados a fin de obtener un aspecto unido, no estando los puntos de ligadura dispuestos en orden. Las armaduras de satén permiten obtener tejidos de fuerte gramaje que conservan una buena flexibilidad.
 - iii. Sarga (twill): Los hilos de urdimbre y trama están entrecruzados según un orden y una frecuencia programados a fin de obtener líneas diagonales características de este tipo de tejido.
 - iv. Unidireccionales: El número de hilos es netamente más elevado en un sentido que en el otro (tejido unidireccional urdimbre o tejido unidireccional trama). Los hilos están colocados en paralelo y simplemente sujetos entre ellos.
 - v. Bidireccional deformable: La sinuosidad de los hilos es suprimida y los hilos están dispuestos en capas colocadas a 90° las unas sobre las otras y ligadas entre ellas por un pequeño hilo que representa menos del 10 % del total.
- f. HILOS CORTADOS: Son hilos de base cortados generalmente en longitudes de 3 a 12 mm. Estos productos tienen múltiples aplicaciones como:
- El refuerzo de escayolas, cemento o papel
 - Se utiliza en procesos de moldeo de piezas de grandes series a base de resinas termoplásticas
- g. FIBRAS MOLIDAS: Mediante una operación de triturado, las fibras son reducidas a longitudes entre 0.1 y 0.02 mm, manteniéndose su diámetro entre 10 y 17 micras. Estas fibras se utilizan principalmente para el refuerzo de resinas termoplásticas y de poliuretanos (proceso RRIM) y en la mayoría de los casos van desprovistas de ensimaje.

- h. HILOS TEXTURIZADOS: Mediante una operación mecánica se aumenta el volumen de la mecha, obteniendo un producto de fibra de vidrio con cualidades óptimas para la realización de tejidos decorativos.
- i. ROVING RIZADO (SPUN ROVING): Para este caso sus rizos constituyen un refuerzo perpendicular a la dirección principal dada al roving. Esta particularidad está hecha a propósito, para mejorar la resistencia transversal de los composites unidireccionales (moldeados por pultrusión). La utilización del spun roving para la realización de tejidos permite aumentar la resistencia a los cortes interlaminares.
- j. COMPLEJOS MAT-TEJIDO: Estas fibras son asociaciones de mats (de superficie, de hilos cortados o continuos) con tejidos mediante un ligado químico (ligante) o por ligado mecánico (el caso más frecuente, a base de cosido). Se utiliza en los casos siguientes:
- Para economizar tiempos de moldeo, al aplicar los dos tipos de refuerzo en una sola operación de impregnación y desburbujeo
 - Cuando la manipulación de un tejido determinado se hace dificultosa debido a su constitución (unidireccionales)
 - Los complejos, como contrapartida ofrecen una deformabilidad mediocre, por lo que su utilización se ve restringida y limitada a piezas de forma plana o con grandes radios de curvatura.

Figura 2.3: Diferentes configuraciones de tejidos



Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.1.6. Condiciones de Almacenamiento

- Desde el punto de vista ambiental, el local deberá ser seco y atemperado. En época de frío es recomendable acondicionar los productos en su embalaje, sobre el sitio de utilización, a fin de evitar los eventuales fenómenos de condensación. La humedad excesiva modifica notablemente el comportamiento y las propiedades de la fibra de vidrio.
- Desde el punto de vista mecánico, es preciso evitar apilamientos excesivos que sobrecargan los embalajes inferiores. Los mats y los rovings pueden ser almacenados en vertical, mientras que los tejidos deben disponerse horizontalmente.
- Sobre la organización, se asegura una rotación regular de stocks y no mezclar los productos.
- Protección contra incendios, aunque la fibra de vidrio es incombustible, los ligantes de los mats, cuya tasa puede alcanzar el 15% en peso, el embalaje, son inflamables. Hay que tomar las debidas precauciones, evitando el uso de agua.

2.1.2. MATRICES

Podemos decir que matriz se entiende a la masa de material orgánico o inorgánico que da la forma y aporta con resistencia a compresión a un material compuesto, la cual es reforzada mediante fibras. Existen dos clases de matrices utilizando materiales compuestos: orgánicas e inorgánicas.

Las matrices orgánicas, en general, son compuestos orgánicos de elevado peso molecular, producto de reacciones de polimerización por adición o condensación de diferentes compuestos de base.

El término polímero se refiere a una macromolécula sintética, un plástico es un polímero adicionado y acondicionado para uso en la industria. La longitud de una cadena polimérica viene dada por el número de unidades monoméricas repetitivas que hay en ella y por tanto tendremos que hablar de diferentes pesos moleculares en un mismo tipo de plástico.

Las macromoléculas pueden estar unidas entre sí mediante fuerzas de diversa intensidad. Así, cuando sean de baja intensidad, podremos superarlas con un simple calentamiento dando lugar al plástico fundido. Los polímeros de estas características se llaman “**Termoplásticos**” los cuales se funden o plastifican con un suministro de calor.

Tabla 2.6 Clasificación de diferentes matrices utilizadas en materiales compuestos.

INORGÁNICAS	Cemento, Geopolímeros, Yeso, Matrices Cerámicas, Matrices Metálicas	
	TERMOESTABLES	Epoxi, Vinilester, Poliester, Fenólica, Esteres Cianato, Bismaleimidas, Poliimidas, Polieteramida
ORGÁNICAS	TERMOPLÁSTICAS	Policloruro de vinilo (PVC) Copolímeros de estireno (ABS, SAN), Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policarbonato (PC), Polimetacrilato de metilo (PMMA), Acetato, Poliestireno (PS), Polioximetileno (POM), PBT, Polieterimida, PET, Nylon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS

Fuente: Materiales Compuestos I

Cuando las fuerzas de unión de estos filamentos entre sí son tan intensas que llegan a igualar a las de construcción de ellos mismos, lo que implica que el incrementar la temperatura no podrán cambiar de estado sólido a líquido; denominando a estos polímeros **Termoendurecibles** o **Termoestables**.

Para la práctica las matrices más utilizadas para la fabricación de materiales compuestos son las resinas líquidas termoestables.

Los polímeros termoestables se fabrican normalmente a partir de precursores líquidos o semisólidos que endurecen irreversiblemente; esta reacción química es conocida como policondensación, polimerización o curado y al final del proceso, la resina líquida se convierte en un sólido duro con eslabones químicos en cruz, lo que produce una red tridimensional tirante de cadenas de polímero.

Podemos realizar una clasificación de las matrices termoestables en función de la temperatura de utilización:

Tabla 2.7 Clasificación de las resinas termoestables en función de la temperatura de utilización.

Bajas Temperaturas	Poliéster	Isoftálica, Ortoftálica, Ácido caliente
Medias Temperaturas	Vinilester Epoxi	
Medias-Altas Temperaturas	Fenólica	
Altas Temperaturas	Bismaleimida, Poliímida, Esteres cianato, Poleteramida	

Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.2.1. Termoestables

2.1.2.1.1. Epoxi

Las resinas epoxi son disfuncionales o poli funcionales, pueden estar basadas en estructuras alifáticas o estructuras aromáticas en forma de columna vertebral.

La mayoría de estas resinas son aromáticas pero algunas veces mezcladas con material alifático. En general las resinas aromáticas dan superiores prestaciones en los materiales compuestos. Las resinas se curan por reacción con un agente de curado, esta reacción se controla mediante el uso de catalizadores y aceleradores.

Las resinas epoxi tienen buena prestación a elevada temperatura, especialmente la resistencia a la tracción (en caliente o húmedo) del material compuesto, con su dureza y tolerancia al daño.

La dureza de los epoxi es superior a la de la resina poliéster, por ello, pueden operar a temperaturas mas altas. Tienen buena adherencia a muchos sustratos, baja contracción durante la polimerización y son especialmente resistentes a los ataques del álcali, permite moldeos de alta calidad con buena tolerancia dimensional.

Clasificación:

- Epoxi TGMDA: Esta molécula constituye el componente más importante de las resinas epoxi. La alta densidad del entrecruzamiento da a esta resina un alto valor de módulo de Young y una alta temperatura de servicio.
- Existen algunos inconvenientes como por ejemplo la deformación a la rotura es baja (1.5%), baja resistencia a la compresión después del impacto, presenta una gran absorción de agua (6% del peso de la resina).
- Epoxi DGEBA: Esta resina cura a menor densidad de entrecruzamiento, esto implica que el módulo de Young es mas bajo, además las propiedades mecánicas se ven reducidas, el curado de esta resina tiene una mayor deformación a la rotura y también menor absorción de agua. Es la resina mas utilizada en la actualidad.

Tabla 2.8 Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas.

	TGMDA	DGEBA
Modulo de Young (MPa)	3800 - 4500	2750 – 3450
Deformación a rotura (%)	1 - 2	5 – 8
Tg (°C)	175 - 235	120 - 175
Absorción de agua (%)	4 - 6	2 - 3

Fuente: Materiales Compuestos I

- ◆ Epoxi Novolacas: Curan a menor densidad de entrecruzamiento que TGMDA. Incrementa la Tg de la resina, pero disminuye la deformación de rotura.
- ◆ Epoxi Trifuncionales: Tienen propiedades intermedias entre la epoxi DGEBA y la TGMDA. Estas resinas se usan principalmente para incrementar la deformación a rotura de una resina TGMDA o para incrementar la Tg de una resina DGEBA.
- ◆ Epoxi Bisfenol F: Presenta menor viscosidad (2000 – 4000 cps), necesita menor cantidad de diluyente en formulaciones que requieren una baja viscosidad.
- ◆ Epoxi Alifáticas: Estas resinas son utilizadas como diluyentes, debido a que cura junto con la resina y poseen una muy baja viscosidad.

Tabla 2.9 Propiedades generales para la resina epoxi.

MAGNITUD (UNIDADES)	VALOR
Densidad (Kg/m ³)	1100 - 1400
Módulo de Young (MPa)	3000 – 6000
Relación de Poisson	0.38 – 0.4
Resistencia a la tracción (MPa)	35 – 100
Resistencia a la compresión (MPa)	100 – 200
Alargamiento de rotura a tracción (%)	1 - 6
Conductibilidad térmica (W/m.°C)	0.1
Coefficiente de dilatación térmica (x 10 ⁻⁶ /°C)	60
Temperatura de distorsión por calor (°C)	50 - 300
Contracción de curado (%)	1 – 2
Absorción de agua de 24 h a 20°C (%)	0.1 – 0.4

Fuente: Materiales Compuestos I

Agentes de curado:

- Aminas Alifáticas: Curan a temperatura ambiente, poseen baja temperatura de servicio puesto que su Tg esta entre 60 y 120 °C.
- Aminas Cicloalifáticas: Pueden gelificar una resina epoxi a temperatura ambiente, pero con un post curado.
- Aminas Aromáticas: Este tipo de curado permite mejorar las propiedades mecánicas, pero requieren temperaturas de 120 a 175 °C.
- Anhídridos: Son usados en enrollamiento filamentario húmedo y en laminados del preimpregnado para circuitos de procesos y otras aplicaciones eléctricas.

2.1.2.1.2. Viniléster

Son resinas termo endurecibles, se presentan en disolución con un 30 a 40% de monómero reactivo, se utilizan de la misma forma que las resinas de poliéster.

Características:

- Buenas cualidades mecánicas.
- Excelente resistencia a la fatiga.
- Excelente fluidez.
- Buena adhesión sobre las fibras de refuerzo.
- Resistente a la corrosión.
- Buena resistencia al fuego.

2.1.2.1.3. Esteres Cianato

Son matrices versátiles que ofrecen una elevada resistencia, dureza, propiedades eléctricas y muy baja absorción de humedad. Mejoran la estabilidad dimensional, eliminan la corrosión y tienen buena reparabilidad.

Normalmente son endurecidas con termoplásticos o partículas esféricas de caucho, el curado es relativamente sencillo comparado con las epoxis, debido a su perfil de viscosidad y volátil.

Tabla 2.10 Propiedades de las resinas Esteres Cianato.

MAGNITUD (UNIDADES)	VALOR
Densidad (Kg/m ³)	1250
Viscosidad (cps) = (mPa.s)	5 – 300
Tiempo de gel a 200 (°C)	> 30 min
Temperatura de transición vítrea Tg (°C)	400
Resistencia a tracción (MPa)	35
Módulo de tracción (MPa)	3000
Elongación (%)	2
Resistencia a compresión (MPa)	300

Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.2.1.4. Polieteramida

Ofrecen estabilidad ante la oxidación para altas temperaturas, su resistencia a la tracción esta en aproximadamente 195 MPa. Su aplicación se remonta a la Aeronáutica, Espacial, Sector eléctrico, Automoción.

2.1.2.1.5. Poliéster no saturado

Son materiales de baja viscosidad que pueden mezclarse con altas cantidades de materiales de relleno y de refuerzo.

Se los puede procesar mediante técnicas de molde abierto y rociado para muchas piezas de pequeño tamaño, generalmente se utiliza el moldeo por compresión.

Tabla 2.11 Propiedades de las resinas de Poliéster Polimerizadas.

Tipo de resina de Poliéster	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de tracción (GPa)	Porcentaje de elongación	HDT (°C) (Temperatura de deflexión bajo carga)	Porcentaje de fibra (para fibra de vidrio)
Ortoftálica	100	65 – 75	3.2	2 – 4	55 – 110	30
Isoftálica	140	70 – 85	3.5	3.5	75 – 130	30
Neopentil-glicol	130	70	3.4	2.4	110	30
Isoftálica / neopentilenglicol	130	60	3.4	2.5	90 – 115	30
Ácido HET	80	40 -50	3.2	1.3 – 4	55 – 80	30
Isoftálica / ácido HET	85	55	3.2	2.9	70	30
Bisfenol A (DGEBA)	130	60 -75	3.2	2.5 – 4	120 – 136	30
Parafina clorada	110	50 – 60	3.4	1.2 – 4.8	55 – 80	30
Isoftálica / parafina clorada	90	60	2	4.8	50	30

Fuente: Materiales Compuestos I

Aplicaciones:

- Paneles de automóviles
- Piezas de carrocería
- Cascos de barcos pequeños
- Paneles y componentes de el cuarto de baño
- Para tubos
- Para tanques

Las resinas de poliéster no saturadas conforman el grupo más importante de las resinas termoestables utilizadas en los materiales compuestos, ya que se utilizan en más del 90% de los laminados comerciales para fibra de vidrio.

2.1.2.1.6. **Fenólicas**

Fueron uno de los primeros tipos de resina utilizados para la producción de materiales compuestos. Inicialmente consistía en unas telas textiles y papeles impregnados con la resina, posteriormente curados.

Encuentran su aplicación como componentes aislantes en equipos eléctricos, reductores y materiales que sufren desgaste (especialmente donde la lubricación es mínima).

Ventajas:

- Excelente estabilidad a elevadas temperaturas
- Retardo a la llama
- Baja emisión de humo y gases tóxicos

Al utilizarlas como refuerzos con fibra de carbono o de vidrio, mejoran las propiedades mecánicas que cuando se utilizan los refuerzos con resinas epoxi, su comportamiento frente al fuego y frente a las emisiones tóxicas es superior.

Fueron las primeras resinas termo endurecibles utilizadas a escala industrial, se utilizan generalmente con cargas o refuerzos cuya elección se hace en función de las aplicaciones requeridas.

Propiedades:

- Excelentes características eléctricas
- Buena resistencia a temperaturas elevadas
- Buena resistencia al fuego

- Resistencia al choque
- Resistencia a la abrasión
- Buena resistencia al ataque químico
- Excelente adhesión a otras resinas
- Estabilidad dimensional

2.1.2.1.7. Bismaleimida y Poliimida

Las resinas bismaleimida son las que están más establecidas alcanzando temperaturas de operación de aproximadamente 250 °C, con características de procesamiento similares a la epoxi.

Las resinas poliimidadas tienen la prestación de la temperatura más elevada, son relativamente difíciles de procesar, su curado final trae consigo la reacción de condensación con la obtención de vapor condensado. Esta reacción trae consigo niveles inaceptables de porosidad.

Las matrices de bismaleimida presentan una temperatura de transición vítrea entre 275 y 300 °C, mientras que las poliimidadas alcanzan los 350 °C.

2.1.2.2. Termoplásticos

2.1.2.2.1. Policloruro de vinilo (PVC)

El PVC es uno de los plásticos más populares, para que tenga utilidad es necesario añadirle una serie de aditivos (estabilizantes, lubricantes), además el PVC admite una infinidad de aditivos; plastificantes, elastificantes, cargas, otros polímeros, etc.,

Debido al número y proporción de aditivos que contenga el PVC, podemos encontrarlo como material rígido, más o menos flexible, o hasta casi como caucho; transparente, translúcido o totalmente opaco; compacto o espumado; frágil o tenaz, etc.

El PVC es un polímero amorfo cuyas propiedades dependen de la formulación (aditivos). Sus propiedades mecánicas no son excelentes con la posibilidad de verse reducida a bajas temperaturas (a partir de -10°C); su resistencia química es buena.

Aplicaciones:

- Recubrimiento aislante de cables eléctricos
- Tuberías y mangueras flexibles
- Recubrimiento de tejidos
- Recubrimiento de piezas metálicas
- Filmes para usos diversos
- Pavimentos

2.1.2.2.2. Polietileno (PE)

Desde 1931, año en que apareció el primer polietileno en forma de polvillo blanco con un aspecto ceroso. Muchos estudios se han realizado y hoy tenemos algunos tipos de polietilenos.

Se ha adoptado internacionalmente el criterio de referirnos a su densidad. Se utilizan las siglas LDPE (densidad entre 910 a 930 Kg/m³) para las estructuras más ramificadas y HDPE (densidad entre 940 a 960 Kg/m³) para los más cristalinos. A este grupo se añadieron posteriormente unos polietilenos intermedios MDPE (densidad entre 930 a 940 Kg/m³). Más recientemente, han aparecido polietilenos de baja densidad pero de estructura muy lineal que han recibido las siglas de LLDPE.

El polietileno de baja densidad (LDPE) se utiliza para fabricar bolsas flexibles, es muy utilizado para infinidad de artículos domésticos e industriales. Gracias a su buena resistencia dieléctrica, frente a las altas frecuencias, se lo utiliza como aislante para cables.

La resistencia térmica del HDPE permite su esterilización en autoclave; por eso, se emplea en envases de leche, sueros fisiológicos, etc.

2.1.2.2.3. Polipropileno (PP)

Casi a continuación del HDPE se obtenía partiendo del propileno el polipropileno. El PP era rígido pero elástico, sus propiedades mecánicas superaban al HDPE, no era ceroso, brillante, transparente, resistía hasta 130°C, su densidad 905 gr/cm³, y su precio era uno de los más bajos.

Actualmente, muchas piezas de automóvil se fabrican de PP (parachoques son fabricados de polipropileno modificado con caucho y reforzado con fibra de vidrio), carcasas de electrodomésticos, juguetes, etc.

³ “El polipropileno es lineal (y cristalino). Presenta una especial ordenación macromolecular, si se moldea una pieza estrangulando el paso del material en una cierta línea, éste se orienta de forma que permite la flexión alterna casi ilimitadamente, es lo que se llama “efecto bisagra”.” Este efecto permite moldear cajas, estuches, etc.

El PP permite trabajar a temperaturas cercanas a los 100°C; por lo que, es muy apto para tuberías de fluidos calientes muy especialmente en la industria química.

2.1.2.2.4. Poliestireno (PS)

Es uno de los polímeros más fáciles de obtener, junto a su brillo y transparencia, su fácil moldeo y su precio económico (hasta hace pocos años), hizo que el poliestireno fuese un plástico muy popular.

Su densidad está alrededor de 500 Kg/m³. Una de sus particularidades es su gran resonancia acústica. Esta característica ha sido aprovechada en radio y televisión haciendo las cajas de estos aparatos con PS. También puede utilizarse como aislamiento térmico, pero no como aislamiento acústico.

2.1.2.2.5. Copolímeros de Estireno (ABS-SAN)

La idea de mezclarlo con cauchos da origen a los primeros blends de PS/caucho, que recibieron el calificativo de poli estireno anti choque, pero tenían una superficie desagradable y pasaron pronto al olvido. Estos blends dejaron de emplearse ante la aparición de copolímeros del PS con caucho.

El primero fue el copolímero de acrilonitrilo/butadieno/estireno (ABS). Con éste se mejoró la resistencia al impacto, presentaba una mejor resistencia a hidrocarburos y aceites.

Posteriormente apareció el copolímero (SAN), de características similares al ABS, pero conservando una buena apariencia; por eso se utiliza en luminotécnia. El ABS, además permite un recubrimiento con una capa metálica

³ “MATERIALES COMPUESTOS I”, Antonio Miravete, 1era Edición, pág.: 86.

(por medios galvánicos) con cierta facilidad; para una serie de aplicaciones puramente decorativas y funcionales.

También tenemos al SB, copolímero de estireno/butadieno, que es llamado poli estireno antichoque.

2.1.2.2.6. **Estéres de Celulosa**

El más antiguo es el nitrato de celulosa (CN) plastificado con alcanfor, presentaba propiedades como: buena rigidez, altísima tenacidad, resistente a impactos, aspecto atractivo y brillante. Se fabricaron con CN gafas, muñecos, artículos de tocador, bolas de billar, etc. La desventaja era que ardía con facilidad e incluso, era inflamable.

Posteriormente se creó el acetato de celulosa (CA), éste presentaba ventajas sobre el CN y no era inflamable. Le siguieron el butirato de celulosa (CB) y el acetobutirato de celulosa (CAB) y el propionato de celulosa (CP).

2.1.2.2.7. **Polimetacrilato de Metilo (PMMA)**

Este material es uno de los plásticos históricos, además de su rigidez y tenacidad, buena resistencia química (salvo a ácidos y bases concentrados y bastante disolventes) y a la intemperie, fácil moldeo y buen comportamiento dieléctrico, el PMMA presenta una transparencia perfecta.

Aplicaciones:

- Artículos de tocador
- Accesorios para cuarto de baño
- Elementos de decoración
- En parabrisas
- Ventanas de aviones y barcos
- Elementos para la industria química
- Aparatos ortopédicos
- Claraboyas y cubiertas

La polimerización del PMMA es bastante simple. Por eso, además de moldearlo por los sistemas habituales para termoplásticos, partiendo de granulado, cabe la posibilidad de moldearlo por colada.

A la familia del PMMA pertenecen otros polímeros como el poliacrilonitrilo (PAN), apto para el moldeo, pero más conocido en forma de fibras.

2.1.2.2.8. Poliamidas (PA)

La primera poliamida que hila con mucha facilidad en hebras de gran resistencia entraba al campo textil en 1930 por la marca Nylon.

Como plástico, al igual que como fibra (Nylon 66), la PA 6,6 se caracteriza por una elevada resistencia, tenacidad, elasticidad, resistencia a la abrasión y al ataque químico. Conserva sus propiedades mecánicas hasta 150°C.

Las poliamidas se consiguen por la poli adición de un producto o la poli condensación de dos productos distintos y añadiendo el número de carbonos de que se componen la molécula básica que forma la cadena.

Fueron los primeros plásticos que presentaban características mecánicas interesantes como:

- Resistencia a la tracción de 40 a 60 MPa, cercana a las de algunos metales no férricos.
- Presentaba una textura tal que su rozamiento era muy bajo, no necesitando lubricantes en piezas que habían de deslizarse entre sí o contra metales.
- Su bajo peso específico (entre 1040 y 1150 Kg/m³).
- Buena resistencia química.
- Resistencia a las temperaturas que permite trabajar hasta los 100°C.
- Fácil moldeo.

Aplicaciones:

- Engranajes
- Cojinetes
- Cremalleras
- Palas de ventiladores industriales
- Carcasas de pequeña maquinaria
- Bombas
- Bobinas
- Tortillería

Las poliamidas presentan una cierta admisión de agua en su estructura (hasta 11%) que influyen en sus propiedades mecánicas (rebajándolas), si bien aumenta su tenacidad, y también afecta sensiblemente a su estabilidad dimensional (la pieza se hincha).

Su utilización sigue vigente y en auge, especialmente reforzadas con fibra de vidrio que aún les confiere propiedades mecánicas y rebaja los riesgos de variaciones dimensionales.

2.1.2.2.9. Polioximetileno (POM)

El polioximetileno, o resinas acetálicas, es un plástico duro, de elevadas características mecánicas, con un buen coeficiente de deslizamiento, de resistencia química buena a disolventes, grasas y otros productos, pero deficiente en medios ácidos o fuertemente alcalinos, y no presenta absorción de agua. Su moldeo no exige, por tanto, secados previos, pero sí una atención cuidadosa a las temperaturas para que no se degrade.

El POM tiene un efecto de resorte extraordinario, por eso sus aplicaciones fueron:

- Muelles
- Ballestas
- Resortes
- Engranajes
- Cojinetes
- Elementos de sujeción en los esquís

2.1.2.2.10. Poliésteres Termoplásticos

El primero fue el polietilentereftalato (PETP), de alta resistencia mecánica y buen comportamiento a esfuerzos permanentes, muy buen coeficiente de deslizamiento, bastante buena resistencia química, y con temperaturas admisibles de utilización de hasta 200°C por corto tiempo.

El PETP tiene una cierta absorción de agua que no afecta sus propiedades, pero resiste mal al agua hirviendo (se hidroliza y descompone).

Posteriormente apareció el polibutilentereftalato (PBTP), cuyas características son muy similares a las del PETP, pero completan su campo de aplicación, especialmente reforzado con fibras de vidrio.

2.1.2.2.11. Policarbonato (PC)

El PC es un plástico amorfo y transparente, con una temperatura admisible de trabajo de hasta 135°C, conjuntamente con unas muy buenas propiedades mecánicas y tenacidad, buena resistencia química (salvo a los álcalis) y buena estabilidad dimensional.

Su aplicación esta en piezas que exijan transparencia y esfuerzos elevados o temperaturas, especialmente en electrotecnia y en aparatos electrodomésticos. Lamentablemente, el PC se hidroliza con el agua a elevadas temperaturas; por eso requiere un riguroso secado y acondicionamiento antes de su moldeo.

2.1.2.2.12. Plásticos Fluorados

De este tipo el más conocido es el politetra-fluoretileno (PTFE), más conocido como Teflón.

El PTFE es uno de los materiales más resistentes químicamente que se conocen. Presenta una marcada plasto deformación, pero puede mejorarse con la adición de cargas reforzantes. Tiene buena resistencia dieléctrica, así como su coeficiente de deslizamiento.

A pesar de tratarse de un termoplástico, no puede moldearse, ya que su viscosidad es fundido es tan alta que no puede moverse la masa en las máquinas.

Un plástico fluorado que se puede moldear es el copolímero de etileno y fluoroetileno (PETFE).

Tabla 2.12 Temperaturas de procesado (°C) para varias resinas termoplásticas con o sin refuerzo.

Resina base	Sin refuerzo	Con refuerzo
ABS	200 – 260	260 – 280
NYLON 6	215 – 260	215 – 280
NYLON 66	250 – 290	260 – 305
PC	260 – 315	280 – 345
HDPE	215 – 230	230 – 250
PP	175 – 230	240 – 260
PS	200 – 235	240 - 280

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 2.13 Propiedades de las principales matrices termoplásticas utilizadas en materiales compuestos.

	ABS	PMMA	HDPE	LDPE	POM	PC	PEEK	PBT	PET	PP	NYLON 6	NYLON 66
T _g (°C)	105	3	-90/-20	-110/-20	-85	150	143				50	
T _{MELT} (°C)	230	45-100	137	115	175	265	334		245	175	215	
T _{de deflexión a 1,82 MPa} (°C)	100	74-102			136	129	140	120	225		65	90
Dureza Rockwell	R103/M4 5-68	M84-97			R120	R118		R117	R120		R119	R121
Absorción H ₂ O (%)	0.3	0.3					0.15				1.3-1.9	1-1.28
Densidad (Kg/m ³)	1040- 1180	1190	960		1420	1200	1320	1310	1390- 1700	900	1130	1140
Resistencia tracción (MPa)	41	72.4	31		69	69	93.8	52- 170	159	25-38	80	82.7
Módulo tracción (MPa)	2300	3000	600- 1000		3200	2300	3500	2300	8960	1400- 1900	1400- 1800	2830
Resistencia flexión (MPa)	72.4	110			98.6	96.5	110	82.7	245		113	110

Módulo flexión (MPa)	2100-2700	3030-3100					3900	2300-10000	8960		2700	2800
Constante dieléctrica 60 Hz	2.8-3.5					3.2	3.7	3.3	3.6		3.8	4
Elongación a rotura							>40			100-600	30-100	15-60
Conductividad térmica (W/mK)	0.27	0.19	0.63	0.33	0.37	0.2	0.25		0.17		0.23	0.25
Coefficiente expansión térmica $10^{-5}/K$	5.3-10	3.4	20	12	3.7	3.8	2.6	4.5	1.5-0.3		2.5	4
Transparencia (%)	87	92										

Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.3. Interfase Fibra Matriz

“Los refuerzos deben de estar fuertemente unidos a la matriz, de forma que su resistencia y rigidez sea transmitida al material compuesto. El comportamiento a la fractura también depende de la resistencia de la interfase.

Una interfase débil da como resultado un material con baja rigidez y resistencia pero con alta resistencia a la fractura mientras que una interfase fuerte resulta en un material rígido y resistente pero con una frágil resistencia a la fractura.”⁴

Las características de la interfase están determinadas por la discontinuidad en propiedades, por esta razón son específicas para combinación fibra matriz.

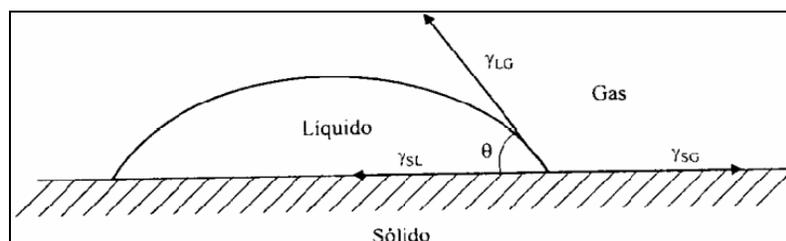
2.1.3.1. Impregnabilidad

Es la capacidad de un líquido para extenderse por una superficie sólida, la adhesión fibra matriz depende totalmente de la fabricación del material compuesto, la fibra y la matriz deben ser llevadas a un contacto íntimo.

Una buena impregnabilidad significa que la matriz fluirá perfectamente por la superficie de refuerzo y desplazara todo el aire.

En buen impregnado se dará cuando la viscosidad de la matriz no sea muy alta y cuando exista un descenso de la energía libre del sistema, el ángulo de contacto es aquel que forma el liquido con la superficie sólida.

Figura 2.4: Ángulo de contacto en un equilibrio líquido-sólido



Fuente: Materiales Compuestos I

$$(Ec. 2.1) \quad \cos \theta = \frac{(\gamma_{sg} - \gamma_{sl})}{\gamma_{lg}}$$

Fuente: Materiales Compuestos I

⁴ “MATERIALES COMPUESTOS I”, Antonio Miravete, 1era Edición, pág.: 100.

“En el caso de que el ángulo de contacto tenga un valor de 180° , la gota es esférica con un único punto de contacto entre el líquido y el sólido, el impregnado no tendrá lugar.

Cuando el ángulo de contacto es de 0° se produce un impregnado perfecto. Se considera que el líquido no impregna el sólido si el ángulo de contacto es mayor de 90° .”⁵

2.1.3.2. Unión en la interfase

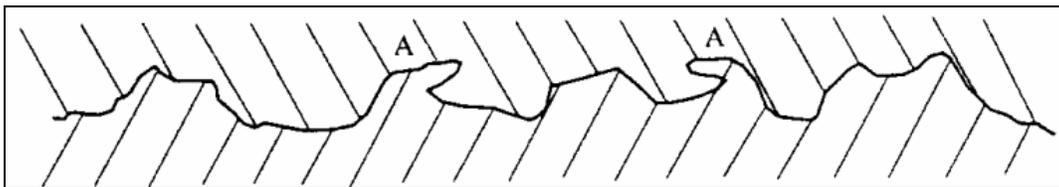
La unión de la interfase tiene lugar una vez que la matriz haya impregnado el refuerzo.

Existen tres tipos de unión:

- Unión mecánica
- Unión electrostática
- Unión química
- Unión mediante reacción

a. Unión mecánica: Esta unión es efectiva cuando la fuerza se aplica paralela a la superficie (esfuerzos cortantes). Es poco efectiva para esfuerzos a tracción, cuanto mas rugosa sea la superficie mas efectiva es la unión.

Figura 2.5: Unión mecánica



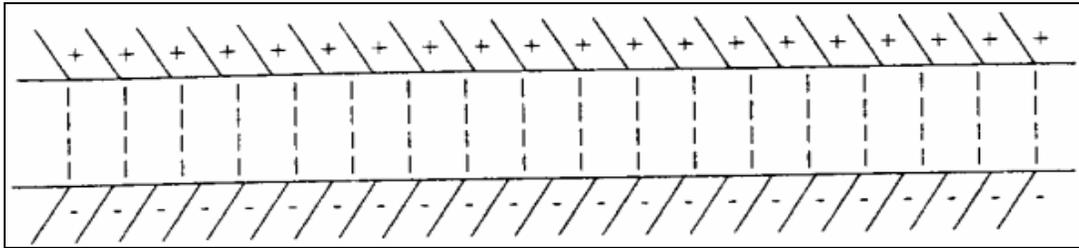
Fuente: Materiales Compuestos I

⁵ “MATERIALES COMPUESTOS I”, Antonio Miravete, 1era Edición, pág.: 101.

b. Unión electrostática: Esta unión ocurre cuando una superficie está cargada positivamente y la otra negativamente. La unión es efectiva cuando la distancia es pequeña (orden atómico).

c.

Figura 2.6: Unión electrostática

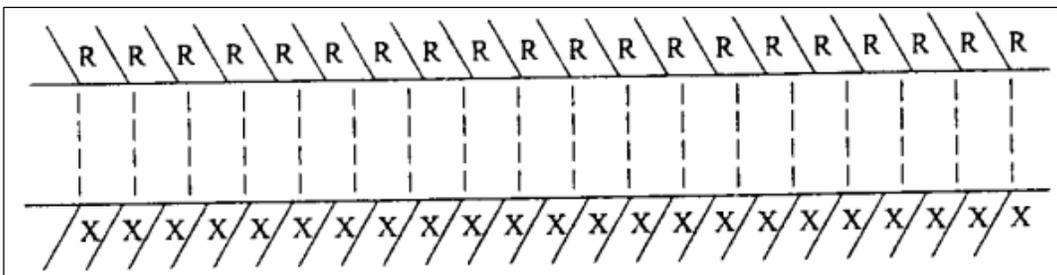


Fuente: Materiales Compuestos I

d. Unión química: Puede estar formada entre grupos químicos en la superficie de refuerzo y grupos químicos compatibles en la matriz.

La resistencia de la unión depende del número de uniones por unidad de área.

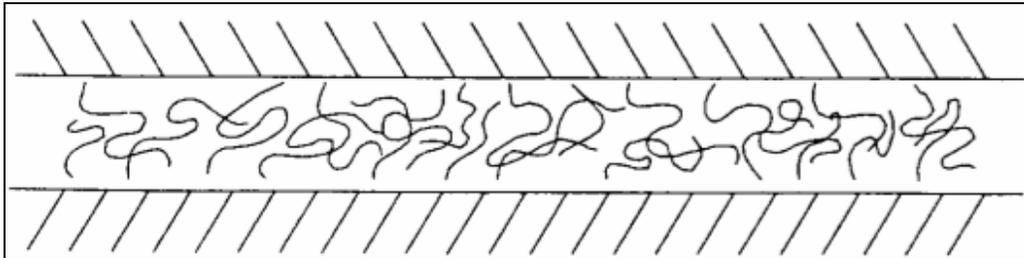
Figura 2.7: Unión química



Fuente: Materiales Compuestos I

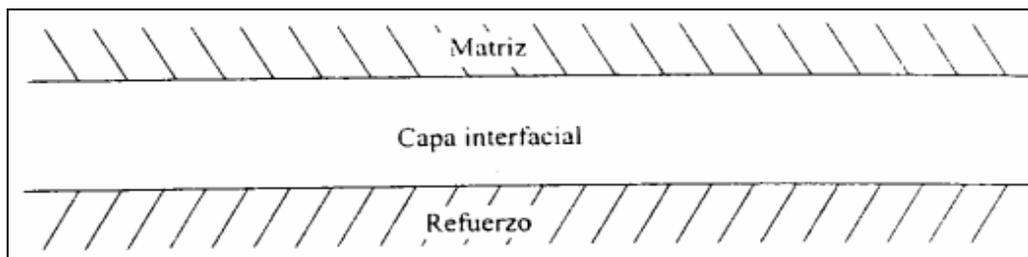
- e. Unión mediante reacción: Los átomos o moléculas de los componentes del material compuesto pueden difundirse en la interfase para dar lugar a este tipo de unión. Para interfaces en las que estén involucrados polímeros, este tipo de unión puede considerarse como un entrelazado entre moléculas.

Figura 2.8: Unión mediante interdifusión en polímeros



Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.9: Unión mediante interdifusión en metales y cerámicas



Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.4. Cargas y aditivos.

Las propiedades aportadas por cada uno de los productos añadidos al material compuesto son las siguientes:

1. Cargas reforzantes (permiten aligerar la pieza).
2. Cargas de bajo coste (abaratán el producto final).
3. Cargas ignífugas.
4. Cargas conductoras y antiestáticas.
5. Colorantes y pigmentos.
6. Agentes anti ultravioleta.
7. Agentes anti retracción.

Para mejorar la procesabilidad del material compuesto se utiliza:

1. Sistema catalítico (endurecedor, inhibidor, estabilizantes térmicos, antioxidantes)
2. Lubrificantes.
3. Agentes de desmolde (reducen la tendencia de la resina a pegarse en la superficie de los moldes).
4. Agentes de flujo.
5. Agentes trixotrópicos (evitan el descuelgue de resina en paredes verticales).

Efectos de las cargas sobre las resinas:

- Aumento de la viscosidad de la mezcla.
- Aumento de la tenacidad
- Aumento del modulo de elasticidad.
- Aumento de la dureza.
- Aumento de la estabilidad dimensional.

La correcta elección de una carga o resina depende de:

- Su constitución química.
- Sus propiedades físicas.
- Su coste.
- Su facilidad de manipulación.
- Su disponibilidad.

2.1.4.1. Cargas

2.1.4.1.1. Cargas reforzantes:

Las cargas reforzantes mas utilizadas son las micro esferas de vidrio, las cuales repartes regularmente los esfuerzos en las piezas, evitando las concentraciones de tenciones. Debido a que su relación $\frac{\text{superficie}}{\text{volumen}}$, no tiene una gran influencia sobre la viscosidad de la resina se las puede utilizar en porcentajes altos.

Estas micro esferas pueden ser huecas o macizas y su diámetro esta comprendido entre 10 a 150 micras.

2.1.4.1.2. Cargas no reforzantes:

Generalmente son de origen mineral y se incorporan a la resina en proporciones compatibles con las características buscadas, su precio generalmente es bajo.

Las más utilizadas son:

- Carbonatos (Carbonato de calcio, carbonato doble de calcio y magnesio).
- Silicatos. (Silicato de magnesio hidratado, silicato de alúmina hidratado, silicato de alúmina anhídrido, silicato de calcio).
- Sílices (Cristalina, micro cristalina, amorfa).

2.1.4.2. Aditivos

- Lubrificantes: el lubricante interno modifica las fuerzas de cohesión intermoleculares, disminuyendo la viscosidad de la resina sin alterar sus propiedades. El lubricante externo aflora a la superficie de la resina para reducir su tendencia a pegarse a los moldes.
- Pigmentos: son de origen mineral u orgánico, son preparados a partir de productos insolubles, en forma sólida.
- Colorantes: Compuestos solubles en agua o disolvente orgánico, se utilizan poco debido a su mala resistencia química y térmica.
- Pastas colorantes: Son dispersiones de pigmentos en un soporte pastoso, es de fácil incorporación y dispersión en la resina.
- Agentes anti reacción: Se utilizan para obtener un mejor acabado superficial.
- Aditivos anti ultravioleta: su principal función es la de proteger al material compuesto de los rayos UV.

2.1.5. Criterios de elección de los constituyentes:

- a. Las propiedades mecánicas de la pieza son función del porcentaje de refuerzo y de la orientación de las fibras.
 - La resistencia del producto final es directamente proporcional a la cantidad de vidrio que contiene.
 - La orientación del refuerzo influye decisivamente en las características de la pieza.
 - Todas las fibras están orientadas en la misma dirección, la pieza presenta su máxima resistencia.
 - El refuerzo presenta orientaciones perpendiculares, su resistencia sigue siendo elevada.
 - Las fibras están orientadas en todas las direcciones. La resistencia de la pieza es mucho menor que en los casos anteriores.
 - Las propiedades químicas, eléctricas y térmicas vienen determinadas por el tipo y formulación de la resina.

2.1.6. Materiales para núcleos de sándwich

Este tipo de estructura esta compuesta de tres elementos:

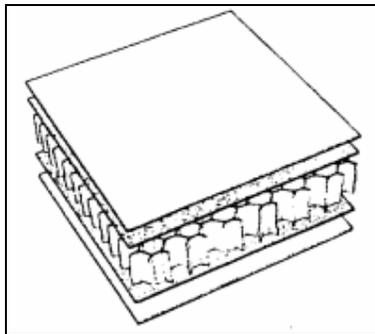
- a. Las alas: generalmente compuestas por unas láminas delgadas y resistentes, tienen mejores propiedades mecánicas que el resto del componente.
- b. El núcleo: es un material ligero cuya principal función es separar las alas y transmitir los esfuerzos cortantes de un ala a la otra.
- c. Interfase de unión entre las alas y el núcleo: su principal objetivo es el unir el núcleo y las alas.

Este tipo de configuración permite aumentar la rigidez y la resistencia del elemento cuando es sometido a flexión o a compresión casi sin incrementar el peso del elemento.

Aplicaciones:

- Fabricación de contenedores de carga.
- Refugios móviles
- Industria aérea
- Industria marítima
- Componentes de automoción
- Vehículos industriales
- Esquí
- Puertas
- Cabinas.

Figura 2.10: Estructura sándwich



Fuente: Materiales Compuestos I

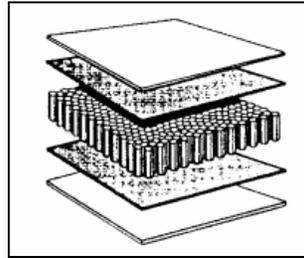
2.1.6.1. Núcleos de nido de abeja

“Se los realizan a partir de laminas delgadas de diversos materiales metálicos y no metálicos cuyas propiedades, unidas al espesor de la lamina, la forma y tamaño de la celdilla formada, pueden variarse considerablemente y conducir a productos con un amplio margen de densidades y resistencias.

Las laminas se unen entre si mediante adhesivos de distintos tipos o por soldadura, formando estructuras por lo regulares y repetitivas a base de un conjunto de prismas rectos de lados comunes en forma de panal y con una celdilla básica de sección transversal dada, comúnmente se utiliza la forma hexagonal.”⁶

⁶ “MATERIALES COMPUESTOS I”, Antonio Miravete, 1era Edición, pág.: 115.

Figura 2.11: Estructura sándwich con núcleo de nido de abeja



Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.6.1.1. Métodos de fabricación:

- Procesos de expansión: Las laminas del material que formara el núcleo pasan entre dos rodillos de suministro de adhesivo en los que este se encuentra en gargantas separadas entre si la distancia adecuada, correspondiente a la que debe existir entre nodos una vez expandido el núcleo.
- Procesos de corrugado: Las láminas, cortadas con un ancho del orden del espesor máximo del núcleo deseado o de los espesores normalizados por el fabricante, se pasan entre cilindros acanalados que producen la ondulación deseada.

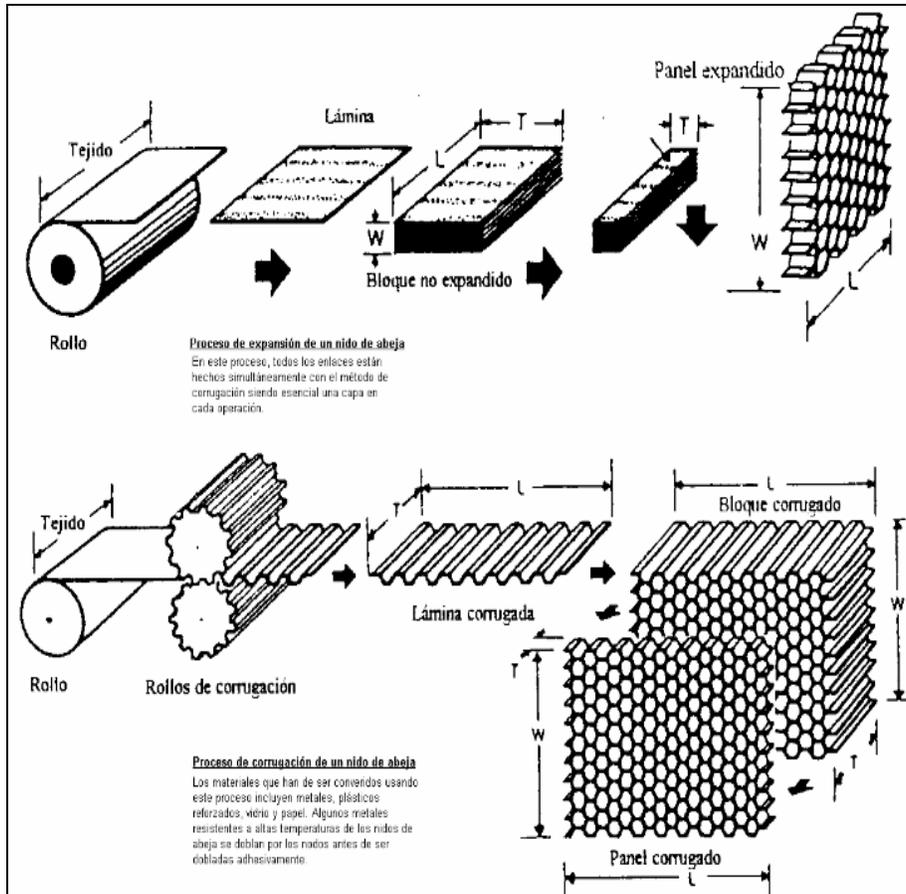
Los núcleos de nido de abeja están fabricados con laminas de materiales metálicos (aleaciones de aluminio, acero, titanio, etc.) y no metálicos (fibra de vidrio, nomex, Kevlar, papel, etc.), se los impregna con resinas a fin de darles rigidez.

Los nidos de abeja para su uso común pueden estar formados por papel pre impregnado o no en resina, se construyen mediante unión adhesiva de una serie de tiras de material que se posicionan en una determinada forma.

La conductividad térmica a través de los paneles sándwich puede ser aislada mediante la contribución de cada componente:

- Alas
- Núcleo
- Adhesivo.

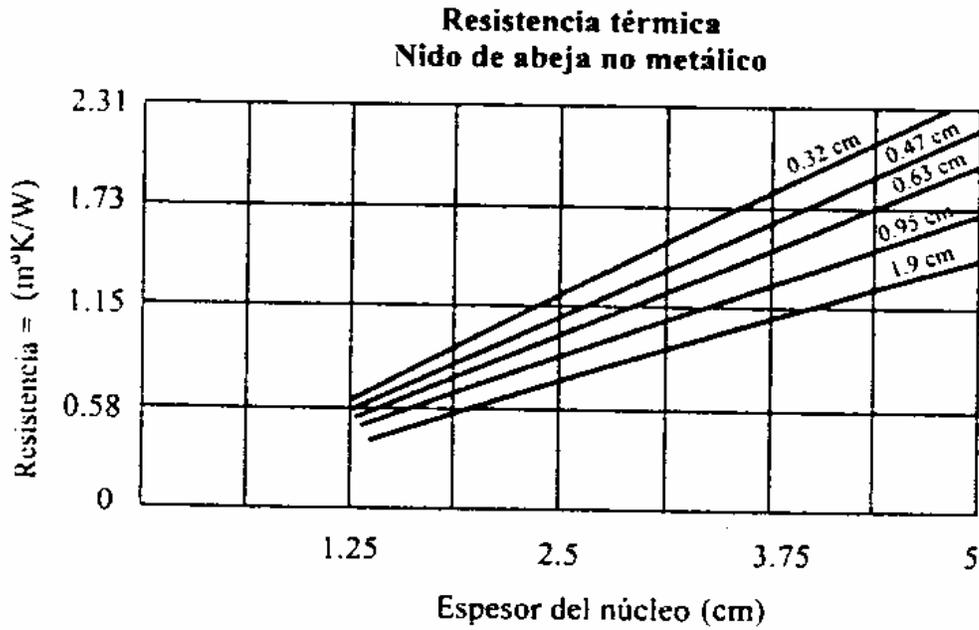
Figura 2.12: La mayoría de los nidos de abeja se obtienen por el proceso de expansión. La forma actual de la celda que se obtiene, puede variar en gran medida según el método utilizado.



Fuente: Materiales Compuestos I

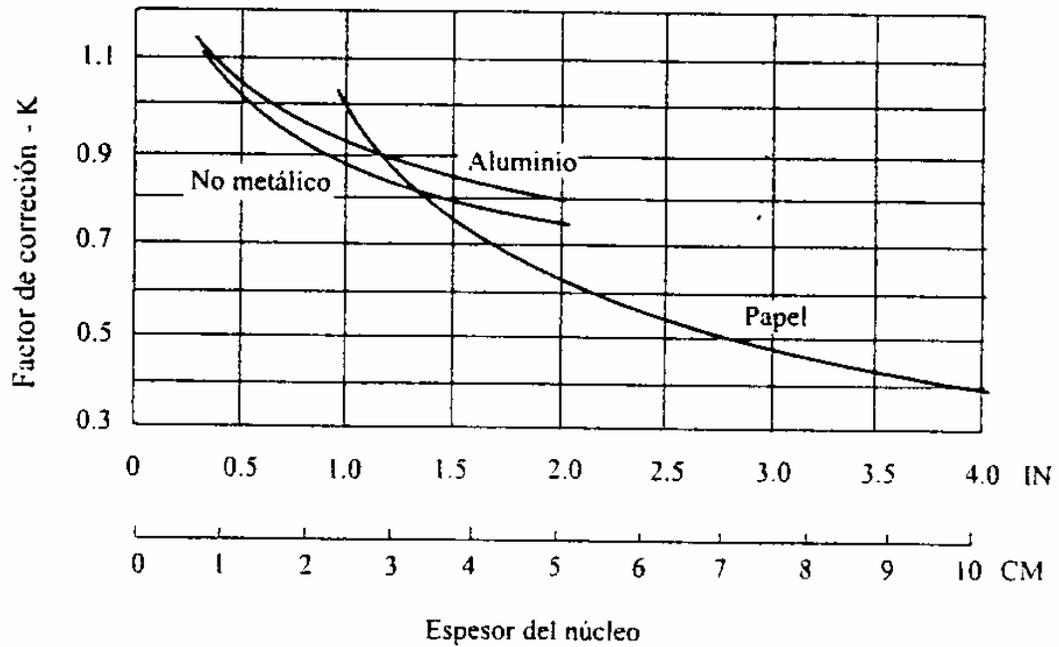
La resistencia puede ser añadida, incluyendo el efecto de las condiciones del contorno de la lámina. Los valores de resistencia térmica para un típico núcleo con alas adhesivas es de 0.003 para una película de adhesivo con un recubrimiento soporte, es de 0.01 para adhesivos sin soporte.

Figura 2.13: Gráfica de resistencia térmica del nido de abeja



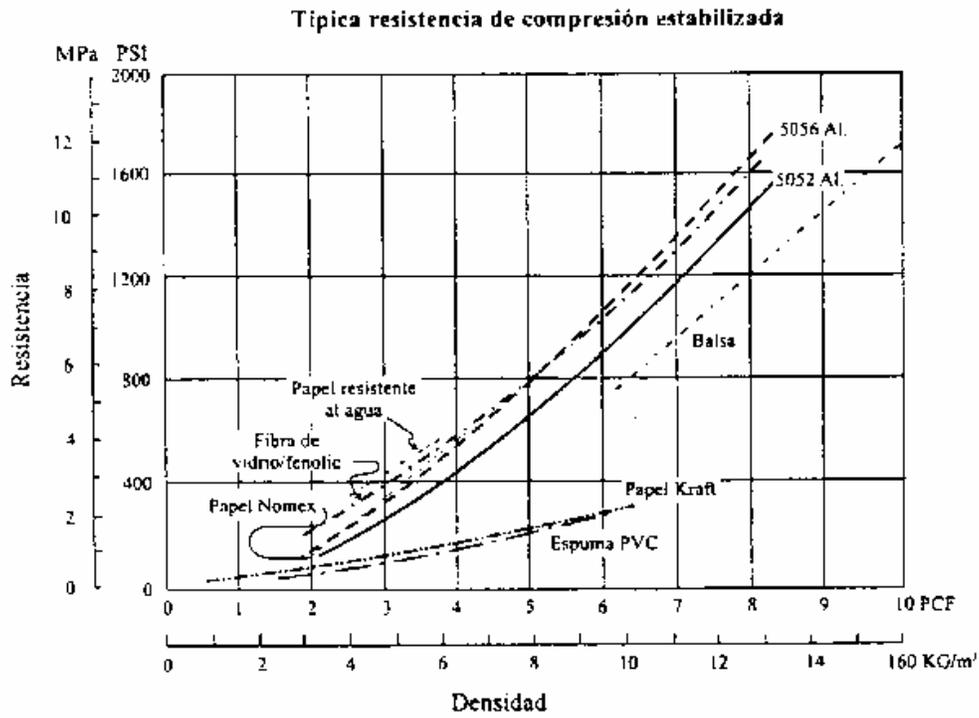
Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.14: Resistencias a cortadura medidas en los núcleos.



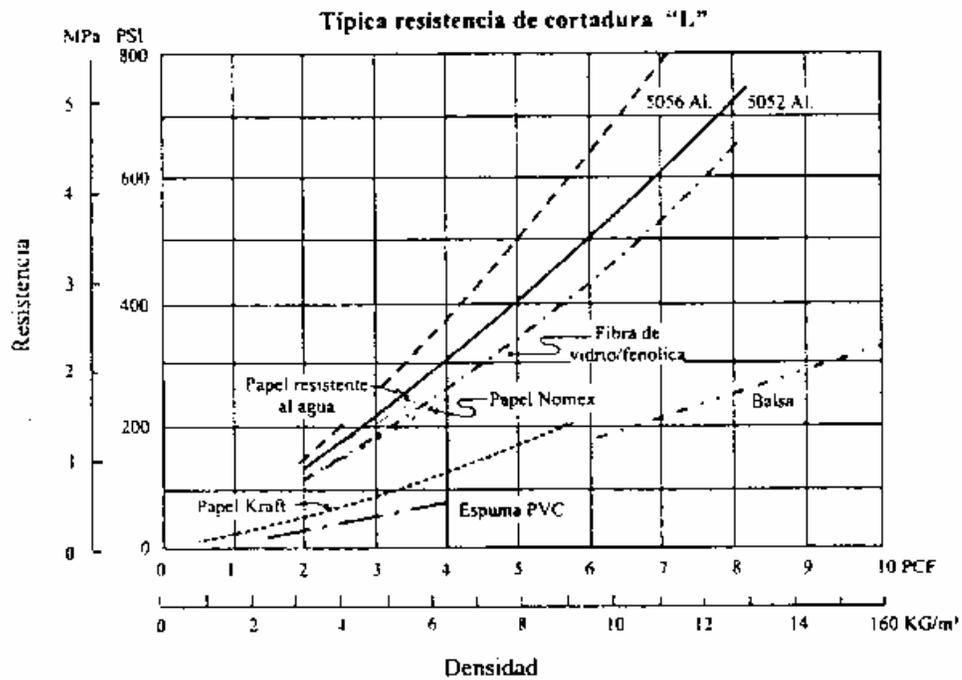
Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.15: Resistencia de compresión



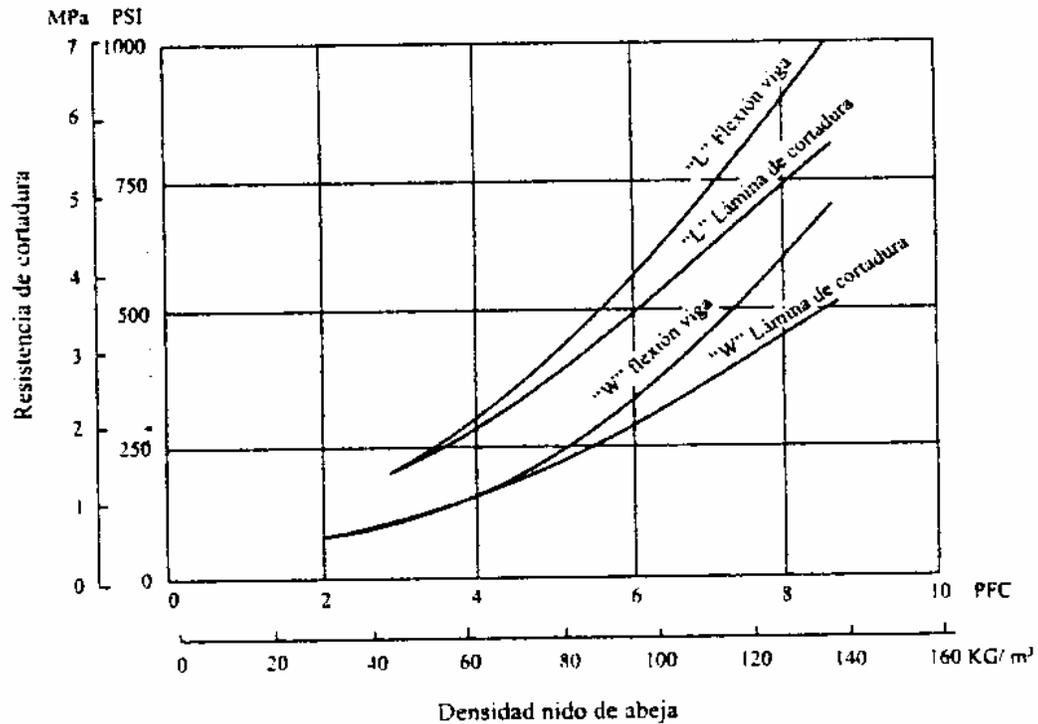
Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.16: Resistencia a cortadura típicas



Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.17: Valores típicos de la cortadura frente a flexión de una placa de nido de abeja de aluminio 5052



Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.7. Adhesivos

Los adhesivos para piezas estructurales aparecieron a partir de la década de los 50, fueron adhesivos basados en resinas termoestables fenólicas y epoxis a los que se les adicionaba un elastómero (caucho sintético) para proporcionar flexibilidad.

En función del criterio a seguir para la elección de un adhesivo pueden clasificarse en:

- Adhesivos metal-metal
- Adhesivos metal plástico
- Adhesivos para usos generales
- Adhesivos para papel y embalajes
- Adhesivos para plásticos
- Adhesivos para cerámicas

Esta clasificación es inconclusa ya que ciertos adhesivos sirven para varias aplicaciones, por lo que podemos clasificar según ciertos criterios:

Clasificación por la temperatura de unión:

- Endurecimiento por debajo de la temperatura ambiente
- Endurecimiento a temperatura ambiente sin aporte de calor
- Temperatura de endurecimiento intermedia (desde temperatura ambiente hasta 100°C)
- Endurecimiento con aporte de calor a temperaturas superiores a 100°C

Adhesivos convertibles y no convertibles

- Convertibles: adhesivos que experimentan transformación química de reticulación en el proceso de adhesión.
- No convertibles: no presentan procesos de reticulación y son menos resistentes que los convertibles.

Clasificación según el ingrediente mayoritario

- Adhesivos termoplásticos: Formados por resinas termoplásticas o por elastómeros. Estos se funden de manera reversible, son solubles en disolventes, pierden propiedades mecánicas con el calor y presentan fenómenos de creep. Presentan problemas de fluencia y bajas propiedades frente a temperaturas altas. Se aplican en estructuras que soportan cargas pequeñas.
- Adhesivos termoestables: Son aquellas que una vez alcanzado su endurecimiento no son fundibles o recuperables en presencia de calor, ya que se produce transformación química durante el curado. Se comporta mejor frente a altas temperaturas, tienen mejores propiedades mecánicas, resistencia a la radiación, humedad, agentes atmosféricos, etc.
 - Adhesivos formados por mezclas de resinas-cauchos: son conocidos como de alta tenacidad. Aprovechan las propiedades de cada componente (resistencia de resina y elasticidad del elastómero).

Clasificación según su presentación física

- Sólidos
- Líquidos
- En polvo fundible
- En pasta

2.1.7.1. Adhesivos estructurales

“Es aquel que usado en combinación con un material estructural, trabaja de modo que la junta o línea de encolado no falle cuando el material trabaje a tensiones de hasta su límite elástico y permita que la estructura trabaje según requerimientos mecánicos y físicos. Están formados de adhesivos termoestables y termoplásticos. Se utilizan sobre todo en el pegado de estructuras tipo sándwich.”⁷

- Acrilatos: líquidos, dos componentes que se aplican por separado sobre las superficies a unir. Endurecen en 3-4 minutos. El 60-70 % de su resistencia total se adquiere a los 15-30 minutos.
- Cianoacrilatos: son líquidos de endurecimiento ultrarrápido formados por un solo componente. Deben ser aplicados sobre superficies muy lisas y ajustadas, no dan buen resultado en materiales porosos.
- Anaeróbicos: Son líquidos en presencia del oxígeno del aire y endurecen en ausencia del mismo. Su endurecimiento es muy rápido.
- Resinas fenólicas: estos proporcionan buenos valores de cortadura (hasta 40 MPa), pero presentan alta contracción durante el curado y tienen baja resistencia al pelado, al impacto y son frágiles.
- Resinas epoxi: comercialmente se presentan en forma sólida, líquida, pasta o films, y, dentro de cada grupo, existen de endurecimiento en caliente con aporte de calor y endurecimiento a temperatura ambiente.

Se pueden realizar relleno de material entre superficies de los materiales a unir, tienen las siguientes propiedades:

- Gran poder de adherencia sobre vidrio, porcelana, hormigón, caucho, vulcanizado, materias plásticas, aleaciones metálicas, madera, materiales compuestos, etc.
- Poca contracción durante el curado.
- Muy buenas propiedades mecánicas y elásticas.
- Capacidad de trabajar desde muy bajas temperaturas hasta 200°C.
- Buena resistencia química, incluso frente a ácidos no concentrados.
- Estabilidad frente al envejecimiento.

⁷ “MATERIALES COMPUESTOS I”, Antonio Miravete, 1era Edición, pág.: 146.

Existen algunas epoxi modificadas para mejorar alguna propiedad como:

- Nitrilo-epoxi: sistemas mono componentes de durabilidad intermedia entre los epoxi comunes. Son muy caros pero presentan excelentes propiedades.
- Nilon-epoxi: tienen muy buenas propiedades mecánicas pero se degradan con la humedad.
- Poliuretanos: son bi componentes, su aplicación radica en el pegado de perfiles plásticos o metálicos entre los que se requiera una unión elástica.

Tabla 2.14 Comparación de los diferentes sistemas estructurales

SISTEMAS ESTRUCTURALES VALORACIÓN COMPARATIVA		
SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Epoxi	Alta adhesión final Durabilidad Cualquier espesor Contracción del 2 %	Preparación de superficies Vida de la mezcla Ciclos de curado (especialmente los monocomponentes) Dosificación y mezcla de los componentes
Poliuretanos	Flexibilidad Mejor para plásticos	Menor adhesión final que los epoxis Peor para cristal y metales
Acrílicos	Buena adhesión final Fácil aplicación Curado rápido Preparación de superficies	Espesor de la capa Contracción del 7 % Durabilidad

Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.7.2. Preparación de superficies

La calidad de la unión encolada depende, tanto de la calidad del adhesivo como de la preparación de las superficies a unir.

Generalmente existen tres tipos de preparación:

- Tratamiento mecánico:
 - Lijado
 - granallado metálico
 - chorro de arena
- Tratamiento químico de la superficie
- Tratamientos diversos:
 - Eléctricos
 - Flameado
 - Imprimaciones

Mecanismos de adhesión:

- Adhesión mecánica: El adhesivo penetra en el interior de poros dentro de los cuales solidifica. Se consiguen mejores resultados sobre superficies que sean rugosas.
- Electroquímica: Basada en fenómenos electrostáticos entre materiales que tengan este tipo de afinidad con el adhesivo.

Las fuerzas de adherencia entre adhesivo y sustrato son mayores que las fuerzas de cohesión internas del adhesivo, es recomendable utilizar uniones con poco espesor de adhesivo (menor que 0.2 mm) para permitir la transmisión de esfuerzos sin rotura cohesiva del adhesivo.

2.1.7.3. Elección del adhesivo

Para elegir un adhesivo se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Naturaleza de los materiales a unir.
- Estado de las superficies a unir.
- Rigidez.
- Resistencia mecánica de la unión.
- Resistencia al pelado, vibraciones, fatiga, etc.
- Temperatura de servicio.
- Entorno químico (agentes atmosféricos, agua marina, productos corrosivos).

- Necesidad de estanqueidad o aislamiento (térmico, eléctrico).
- Facilidad para la puesta en obra (aplicación de presión, temperatura, superficie).
- Consideraciones económicas.

2.1.8. Recubrimientos

Una pieza fabricada en materiales compuestos además de presentar altas prestaciones mecánicas, debe brindar protección en su superficie, así como un excelente acabado a fin de cumplir con exigencias provocadas por agentes atmosféricos y químicos.

Generalmente los gel coats o capas superficiales de resina son suficientes para resolver la mayoría de los problemas medio ambientales.

Cuando el material compuesto esta sometido a abrasión o a altas temperaturas, lo más aconsejable es realizar la pieza como si no hubiera tal requerimiento y posteriormente añadir el recubrimiento adecuado.

Clasificación:

Tabla 2.15 Esquemas de recubrimientos disponibles.

Tipo de recubrimiento	Sistema
Ambientales	Gel Coat
Abrasión	Metálicos
	Cerámicos
	Fenolitos
	Epoxi / arena
	Termoplásticos
Fuego	Tejidos cerámicos
	Pinturas intumescentes
	Mats endotérmicos
	Mats de vidrio
	Mats intumescentes
	Sistemas híbridos Cerámicos / intumescentes
Químicos	PVC
	Polipropileno
	PVDF
	PTFE
	Polietileno

Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.8.1. Criterios Los Gel coat

Son resinas de poliéster, normalmente isoftálicas, con pigmentos y aditivos en suspensión, el gel coat es la primera capa que se aplica al molde preparado y constituye el acabado de una de las superficies del laminado, proporcionándole protección contra productos químicos, la intemperie o la humedad.

Debe ser aplicado cuando la pieza requiera una de las siguientes características:

- Calidad y estabilidad de color.
- Resistencia a la intemperie.
- Resistencia al agua.
- Resistencia al calor.
- Resistencia a la abrasión.
- Ausencia de porosidad superficial.
- Alto brillo, permanente en el tiempo.
- Resistencia a los productos químicos.

Criterios de selección:

a. Las En función del color de la pieza:

posibilidades de color actualmente son muy amplias gracias a la pigmentación controlada por ordenador.

b. En función del tipo de equipo de aplicación:

Las características físicas de los gel coats, influyen en la facilidad de aplicación. El tipo de equipo se escoge en función de la viscosidad del gel coat.

Tabla 2.16 Elección del gel coat en función del equipo de aplicación.

Tipo	Viscosidad (cps)	Numero de tixotropía	Forma de empleo
Viscosidad normal	10000 – 12000	3.5 – 4.5	A brocha
Viscosidad media	6500 – 7500	3.5 – 4.5	A rodillo
Viscosidad para equipos	4500 – 5500	3.5 – 4.5	Con equipos de presión
Baja viscosidad	3000 – 3500	3.5 – 4.5	Pistola de gravedad

Fuente: Materiales Compuestos I

c. En función del sistema de curado:

El curado de los gel coats consisten en una reticulación entre el poliéster y el monómero en el que esta disuelto, generalmente estireno, requiere de la presencia de un sistema catalítico añadido antes de su aplicación.

d. En función de la utilización final de la pieza a producir:

• Gel coats para usos alimentarios:

Existen dos tipos de aplicaciones:

- Para uso en contacto con alimentos líquidos, pueden atacar el poliéster.
- Aquellas aplicaciones que tienen un contacto esporádico con los alimentos, no atacan el poliéster.

• Gel coats Industriales:

Se los ha desarrollado para la fabricación de piezas industriales donde el gel coat debe proporcionar buenas propiedades mecánicas y una coloración adecuada.

• Gel coats resistentes ala abrasión:

Contienen materias inorgánicas de dureza elevada, permiten la fabricación de superficies expuestas a la abrasión (silos, suelos de camiones, etc)

- Gel coats resistentes a la intemperie y ambientes corrosivos:
 Son fabricados en base a una resina isoftálica, son los mas indicados para la fabricación de piezas que vayan a estar expuestas en exteriores, o bien sometidas a ambientes marinos, o en contacto con agua, disoluciones salinas, ácidos, etc.
 A pesar de estar sometidos a los ambientes corrosivos, mantienen su flexibilidad y brillo a largo plazo.
- Gel coats metalizados:
 Consisten en una dispersión de pigmentos metalizados en un gel coat incoloro y coloreado. Se utilizan tamaños de partícula metálica de grano fino (0.1 mm) y grano grueso (0.4 mm), obteniendo una excelente estabilidad a la luz. Siempre se los debe aplicar a pistola, y no a brocha.
- Gel coats resistentes al fuego:
 Son fabricados con resina de poliéster y cargas ignifugas a base de compuestos inorgánicos que al arder desprenden cierta cantidad de agua incorporada en su molécula.
 Este tipo de gel coats debe evitarse en la fabricación de piezas sometidas a esfuerzos mecánicos o cuando la pieza este sometida a la intemperie ya que las resinas utilizadas en su elaboración no son estables a los rayos ultravioleta y provocan un amarillamiento general de la superficie exterior.
- Gel coats para moldes:
 Se utilizan en la fabricación de moldes para plásticos reforzados con fibra de vidrio. Además de brillo tienen una elevada resistencia al rayado y al ataque de disolventes.
- Gel coats para sanitarios:
 Tienen alta flexibilidad y una elevada resistencia al agua caliente. Son resistentes a las manchas pero es aconsejable no utilizar productos abrasivos.
- Gel coats de resistencia química:
 Es resistente a los agentes químicos pero a pesar de ello para conseguir las propiedades de resistencia química deseadas es necesario generalmente que la pieza reciba un post curado a temperatura elevada.

2.1.8.2. Aplicación del gel coat

El gel coat se lo aplica cuando requerimos de un acabado superficial óptimo (por necesidades de rugosidad superficial, protección química, color, etc.)

“La aplicación de la capa del gel coat se realizara de la manera mas uniforme posible, con un espesor comprendido entre 0.2 y 0.5 mm, bien a brocha, rodillo o pistola según el tamaño del molde, la preparación del operador o el tipo de gel coat. En el caso de que la capa del gel coat deba ser de mayor espesor, es recomendable aplicarla en dos o tres veces, esperando que cure en cada una de ellas.”⁸

Su aplicación a brocha no ofrece ninguna dificultad técnica, pero en estos casos es necesario preparar el gel coat parcialmente y en pequeñas cantidades (1 kg aproximadamente), acelerándolo primero (0.2 a 0.4%), añadiendo y mezclando el catalizador (2%) a continuación, en el caso de que sea necesario diluirlo, debe usarse estireno en una proporción que no debe superar el 20%.

2.1.8.3. Recubrimientos anti abrasión y de adherencia

En numerosos casos, el material compuesto debe soportar sollicitaciones abrasivas de carga, generalmente fibra/matriz no es apto para este tipo de carga debido a que la matriz se desgasta con facilidad, esto provoca que queden fibras al descubierto con los consiguientes problemas estructurales y de comportamiento en servicio.

Para poder solucionar este tipo de problemas generalmente se realiza la aportación de un material, apto para soportar la abrasión y unido mecánicamente o mediante adhesivo al material compuesto.

Recubrimientos metálicos:

- Es un material idóneo para soportar fenómenos de abrasión.
- Su costo es bajo
- Se une de forma aceptable al material compuesto mediante adhesivo de tipo epoxi o poliuretano.
- Se puede unir mediante uniones mecánicas.

⁸ MATERIALES COMPUESTOS I”, Antonio Miravete, 1era Edición, pág.: 160.

- No existen problemas de deformaciones ante gradientes térmicos ya que su coeficiente de dilatación térmica es muy similar al material compuesto vidrio/matriz orgánica.
- No presenta problemas de par galvánico con materiales compuestos de fibra de vidrio.
- Aporta rigidez al material, debido al elevado modulo elástico del acero.
- Permite resolver problemas de concentración de tensiones.

Recubrimientos cerámicos:

Son muy resistentes ala abrasión, su uso esta muy extendido como recubrimiento.

No se recomienda la unión mecánica entre el material cerámico y el material compuesto debido a la fragilidad de los sistemas cerámicos.

Se utilizan adhesivos para evitar despegues debido a gradientes térmicos o posibles cargas cortantes de magnitud elevada, proveen protección ante el fuego, calor o altas temperaturas.

Recubrimientos fenólicos:

Presenta un excelente comportamiento a altas temperaturas, fuego y abrasión en aplicaciones no estructurales.

Se lo utiliza con frecuencia en aquellos casos donde además de abrasión existan las condiciones mencionadas, presenta un mejor aislamiento térmico.

Es más fácil de unir, ya que la aplicación de la propia resina fenólica permite una adhesión excelente tras el curado de la misma.

Recubrimientos epoxi arena

Se lo utiliza en aquellas aplicaciones donde exista un doble requerimiento de abrasión y anti deslizamiento.

Este recubrimiento puede aplicarse a materiales compuestos con resina de poliéster, ya que una vez seco el agarre no presenta ninguna dificultad.

Recubrimientos termoplásticos

Presentan excelentes características frente al impacto y la abrasión. Los materiales termoplásticos que se destacan comercialmente son:

- El teflón.
- El polietileno.

2.1.8.4. Sistemas de Material Compuesto

De entre todos los materiales compuestos existen combinaciones adecuadas para aplicaciones industriales o de alta tecnología.

Tabla 2.17 Clasificación de los materiales compuestos en función del tipo de fibra de refuerzo

Materiales Compuestos de Partículas	Dispersiones (Aluminio Sinterizado, Torio)
	MC de partículas (Carburos cementados, Polímeros)
Materiales Compuestos de Fibras	Fibra Corta (Aleatoria)
	Fibra Larga (Unidireccional)
	Fibra larga (Textiles)

Fuente: Materiales Compuestos I

2.1.8.4.1. Sistemas de materiales compuestos de fibra de vidrio

Tabla 2.18 Propiedades mecánicas de Mats de vidrio E

Fibra	MAT-E-600 ^a	MAT-E-300	MAT-E-600B	MAT-UNIFILO
Matriz	Poliéster	Poliéster	Vinilester	Vinilester
E _x (MPa)	7733	9771	14236	13461
E _y (MPa)	7733	9771	14236	13641
G _{xy} (MPa)	2880	3659	5357	5131
V _{xy}	0,3426	0,3354	0,3287	0,3292
V _f (%)	16,51	23,53	37,72	35,94
h (mm)	1,4	0,49	0,61	0,48
X (MPa)	100	140	160	180
X' (Mpa)	100	140	150	180
Y (MPa)	100	140	160	180
Y' (MPa)	100	140	150	180
S ₁₂ (MPa)	30	30	30	30

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 2.19 Propiedades de estructuras de pultrusión con fibra de vidrio

	Perfil Poliéster	Perfil Vinilester	Redondo Poliéster	Placa Poliéster	Placa Vinilester
E _x (MPa)	17250	17940	41350	12420	12420
E _y (MPa)	5520	5520		6210	6900
G _{xy} (MPa)	2932				
V _{xy}	0,33	0,33		0,31	0,32
X (MPa)	207	207	689	138	138
X' (Mpa)	207	207	448	165	165
Y (MPa)	48	48		51	51
Y' (MPa)	103	109		113	120
S _{xy} (MPa)	31	31			
Izod (Nm/m)	1334	1334	2134	987	987
Izod' (Nm/m)	213	213		266	266

Barcol	45	45	55	40	40
Densidad	1,7-1,9	1,7-1,9	2-2,1	1,7-1,9	1,7-1,9
CTE (m/m/C)	2,4	2,4	1,6	4,4	4,4
CT (w/mK)	0,58	0,63			

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 2.20 Propiedades mecánicas de SMC

Fibra	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio E	Vidrio S
SMC	SMC-R65	SMC R-65	SMC C60R5	SMC C60R5	SMC C45R20	SMC C45R20
Vf (%)	45	45	45	45	45	45
E _x (MPa)	14500	15000	35700	41000	24700	40100
E _y (MPa)	14500	15000	8900	9900	12000	12900
V _x	0,26	0,26	0,31	0,29	0,3	0,28
X (Mpa)	225	271	768	1059	675	909
Y (MPa)	225	271	22,1	30	44	59

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 2.21 Propiedades mecánicas de SMC

Fibra	Vidrio E	Vidrio E	Vidrio E	Vidrio E
SMC	SMC-R25	SMC R-50	SMC-C20R3	XMC-3
Densidad	1,83	1,87	1,81	1,97
E _x (MPa)	13200	15800	21400	35700
E _y (MPa)	13200	15800	12400	12300
V _x	0,25	0,31	0,30	0,31
X (Mpa)	82,4	164	289	561
Y (MPa)	82,4	164	84	69,9

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 2.22 Propiedades mecánicas de Unidireccionales de vidrio R y E

Fibra	UNI-R-600	UNI-R-1200	UNI-R-1200	UNI-E-PRE	UNI-E-500
Matriz	Epoxi	Standard	Vinilester	Epoxi	Poliéster
E_x (MPa)	57,1	60,83	31,161	38,6	39,296
E_y (MPa)	15,067	19,865	7,452	8,27	10,289
G_{xy} (MPa)	5,032	6,517	2,738	4,14	4,26
V_{xy}	0,302	0,29	0,3397	0,26	0,3222
Vf (%)	65,31	69,6	40,23	45	51,85
h_o (mm)	1	1	0,44	0,125	0,49
X (MPa)	1300	1600	500	1062	1000
X' (Mpa)	1100	1400	500	610	900
Y (MPa)	80	70	50	31	60
Y' (MPa)	70	65	50	118	60
S_{12} (MPa)	75	70	50	72	65

Fuente: Materiales Compuestos I**Tabla 2.23** Propiedades mecánicas de Tejidos de vidrio E

Fibra	TEJ-E-500 ^a	TEJ-E-500B	TEJ-E-580	TEJ-E-600	TEJ-E-500C
Matriz	Poliéster	Poliéster	Poliéster	Poliéster	Vinilester
E_x (MPa)	14440	16228	19817	20065	9320
E_y (MPa)	13639	15312	19817	19569	36960
G_{xy} (MPa)	2070	2260	2781	2781	3347
V_{xy}	0,148	0,1415	0,1309	0,1326	0,0825
Vf (%)	27,41	31,58	40,91	40,91	48,51
h_o (mm)	0,7	0,61	0,55	0,56	0,4
X (MPa)	196	400	185	185	350
X' (Mpa)	196	400	180	180	350
Y (MPa)	180	380	180	180	320
Y' (MPa)	180	380	175	175	320
S_{12} (MPa)	45	40	45	45	45

Fuente: Materiales Compuestos I

2.2. TEORÍA DE DISEÑO

El daño es el proceso físico progresivo por el cual un material se rompe, consiste en la rotura de enlaces tanto en el ámbito atómico como a nivel de grieta. Por lo general el daño es un fenómeno localizado.

Existen tres formas de analizar el daño, las cuales son:

- Escala microscópica: el daño consiste en la acumulación de micro tensiones en la frontera de micro grietas, y en la rotura de enlaces.
- Escala mesoscópica: el daño consiste en el crecimiento y coalescencia de micro grietas y micro huecos, que al juntarse inician una grieta.
- Escala macroscópica: el daño es el crecimiento de la grieta.

2.2.1. TIPOS DE DAÑO

“Aunque el daño a escala microscópica este gobernado por un único mecanismo general de pérdida de adhesión entre átomos, en una escala media se puede manifestar de varias maneras dependiendo de la naturaleza de los materiales, del tipo de carga o de la temperatura.”⁹

2.2.1.1. Daño frágil

Se produce cuando las grietas se inician a nivel mesoscópico sin que aparezca una cantidad importante de deformación plástica.

En general el daño frágil se inicia cuando la relación entre la deformación plástica y la elástica se mantiene por debajo de la unidad.

$$\text{(Ec. 2.2)} \quad \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_e} < 1$$

2.2.1.2. Daño dúctil

Aparece al mismo tiempo que la deformación plástica, es consecuencia de la nucleación de cavidades debido a la descohesión entre inclusiones y la matriz seguida por su crecimiento y su coalescencia a través de fenómenos de inestabilidad plástica, se lo compara con el daño frágil.

⁹ MATERIALES COMPUESTOS I”, Antonio Miravete, 1era Edición, pág.: 415.

2.2.1.3. Daño por termo fluencia

Para materiales compuestos con matriz termoestable, la deformación plástica acarrea viscosidad, el material se puede deformar incluso a carga constante. Cuando esta deformación es lo suficiente mente grande, se producen descohesiones ínter granulares.

2.2.1.4. Daño por fatiga a ciclos bajos

Este tipo de daño aparece cuando el material esta sometido a cargas cíclicas de valor elevado, el daño aparece y se desarrolla junto con deformaciones plásticas cíclicas.

El grado de localización del daño es mayor que el daño dúctil.

2.2.1.5. Daño por fatiga a ciclos altos

Aparece cuando el material esta sometido a cargas cíclicas mas bajas, la deformación plástica a nivel mesoscópico es pequeña, el numero de ciclos de fatiga es superior a los 10^5 ciclos.

2.2.1.6. Daño en los materiales compuestos de fibra continua

El daño depende tanto de la dirección de la carga como de la orientación de las fibras en las láminas que forman el material.

2.2.1.6.1. Daño intralaminar y daño ínter laminar

En ambos casos la grieta progresa en un plano paralelo al ocupado por las fibras de refuerzo, la fractura se la puede describir por:

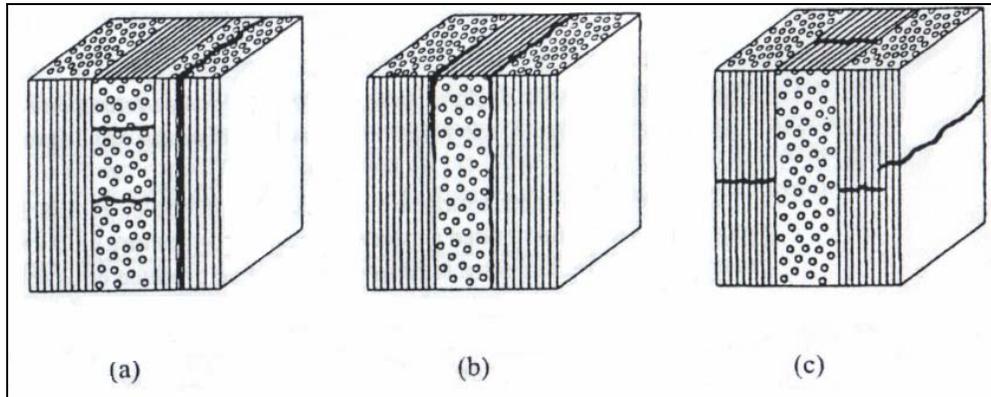
- Tracción
- Por cortante en el plano

Los mecanismos de daño tienden a estar dominados por fractura en la matriz y por separación fibra matriz.

2.2.1.6.2. Rotura en tracción:

La máxima tensión principal se produce en la dirección perpendicular al plano de fractura. La tensión produce hendiduras del tipo frágil las cuales a su vez producen originan superficies planas distinguibles de pérdida de cohesión en la matriz.

Figura 2.18: Diferentes formas de daño en materiales compuestos de fibra continua. (a) Grietas intralaminares, (b) Grietas interlaminares, (c) Grietas translaminares.



Fuente: Materiales Compuestos I

2.2.1.6.3. Daño por cortante en el plano:

Los planos del laminado que se forman a cada lado de la grieta se desplazan lateralmente uno respecto del otro, la máxima tensión principal forma un ángulo de 45 grados respecto al plano de fractura, presenta una serie de micro grietas inclinadas.

2.2.1.7. Fractura trans laminar

Este tipo de fractura se produce a nivel macroscópico y se subdivide en dos:

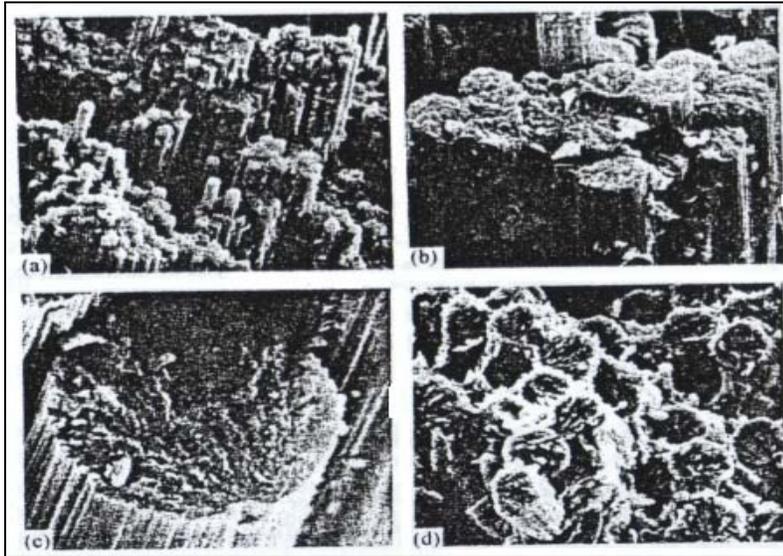
- Por tracción
- Por compresión

2.2.1.7.1. Fractura trans laminar por tracción

Presenta una superficie de rotura extremadamente rugosa, con gran cantidad de fibras emergiendo del plano de rotura.

Las fibras se agrupan en haces y presentan una superficie de rotura relativamente plana.

Figura 2.19: Fractura trans laminar por tracción



Fuente: Materiales Compuestos I

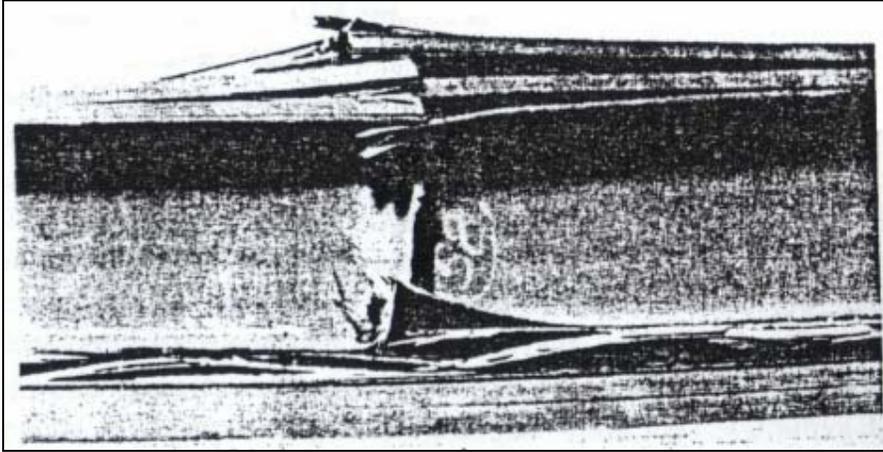
2.2.1.7.2. Fractura trans laminar por compresión

Presenta un elevado pandeo, los extremos de las fibras rotas revelan una superficie plana de rotura, con extensas zonas dañadas. La superficie de rotura es mucho más plana que en caso de rotura por tracción.

Características:

- ◆ Pandeo de fibras
- ◆ Rotura en los extremos de las fibras
- ◆ Rotura de la matriz

Figura 2.20: Vista lateral de un espécimen roto a compresión, con extensa de laminación



Fuente: Materiales Compuestos I

2.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN

La fibra de vidrio esta formado principalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado.

Varios son los procedimientos que conducen a la producción de fibra de vidrio pero, en general, el principio sobre el cuál se basa es siempre el mismo; el estiramiento a muy alta temperatura, por tracción mecánica o por acción de fluidos en movimiento, de una veta o vena de vidrio fundido y su inmediata solidificación.

2.3.1. FASES DE FABRICACIÓN:

2.3.1.1. Composición – fusión

Las materias primas, finamente molidas, se dosifican con precisión y se mezclan de forma homogénea. La mezcla es introducida en el horno de fusión y calentada a una temperatura determinada aproximadamente 1550 °C.

2.3.1.2. Fibrado

El vidrio fundido en el horno es distribuido por canales y alimenta las hileras, que son baños de platino / rodio en forma prismática y agujereados en su base (entre 400 y 4000 agujeros calibrados, entre 2 y 8 μm de diámetro).

El vidrio fundido se mantiene en la hilera a unos 1250 °C, temperatura que permite su colada por gravedad, dando origen a barras de algunas décimas de micras de diámetro. A la salida de la hilera, el vidrio se estira a gran velocidad, entre 10 y 60 m/s y se enfría, primero por radiación y después por pulverización de agua. De esta forma se obtiene filamentos de varias micras de diámetro, uno por cada agujero.

2.3.1.3. Encimado

El conjunto de filamentos, desnudos tal y como salen de la hilera es inutilizable, ya que no hay cohesión entre ellos, no resiste la abrasión, sufren los ataques del agua, etc.

Para corregir estos defectos es necesario revestir los filamentos con una fina película (ensimaje), que esta constituida por una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos. El ensimaje se deposita sobre los filamentos a la salida de la hilera, cuando la temperatura del vidrio está comprendida entre 80 y 120 °C.

La cantidad de ensimaje que se deposita sobre el vidrio es relativamente baja (0.3 – 3 %).

Características del ensimaje:

- Dar cohesión entre filamentos.
- Hacer aumentar o disminuir la rigidez.
- Proteger contra la abrasión.
- Eliminar la electricidad estática.
- Modular la impregnación por la resina.
- Favorecer la unión vidrio – resina.

Tabla 2.24 Principales componentes del ensimaje.

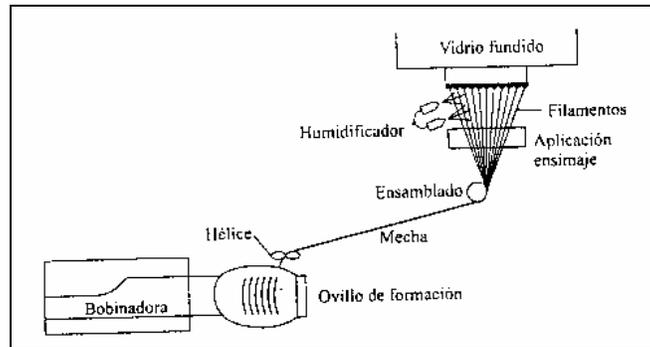
Constituyente	Porcentaje	Naturaleza química	Función
Líquido vector	85 – 95	Agua	Soporte
Agentes filmógenos colantes	3 – 15	Acetatos, poliésteres, epoxi, copolímeros	Integridad, rigidez, protección, impregnación
Agentes lubricantes	0.05 – 2	Aminas alif. Con radicales grasos, oxialcoholamidas, sales de amonio cuaternario	Protección, lubricación
Agentes de puente	0.1 – 0.5	Silanos	Unión a la resina, resistencia, envejecimiento
Agentes antiestáticos	0.2 – 1	Sulfonatos de alquilarilo, sales de amonio cuaternario	Eliminar o reducir la electricidad estática

Fuente: Materiales Compuestos I

2.3.1.3.1. Tipos de Ensimaje:

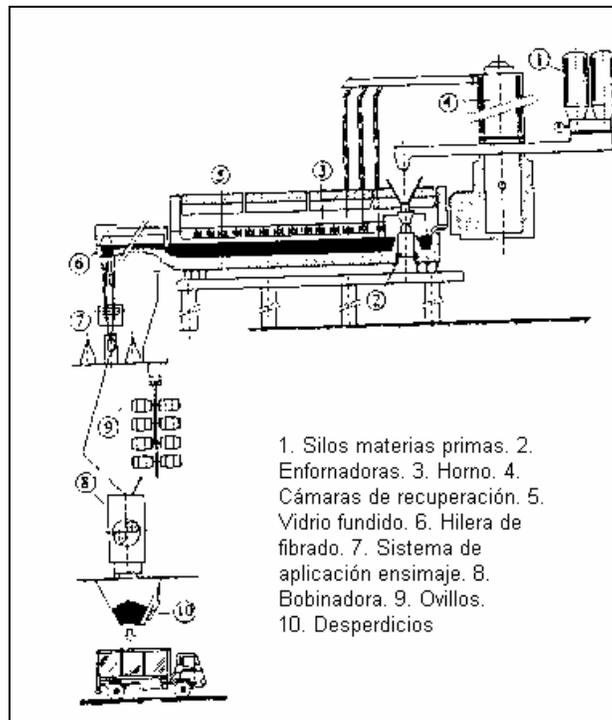
- **Ensimajes textiles:** Aportan a los hilos las características necesarias para resistir las operaciones puramente textiles (cohesión interfilamentar, resistencia a la abrasión, deslizamiento y la posibilidad de ser eliminados rápida y completamente por métodos térmicos).
- **Ensimajes plásticos:** Aportan a los hilos las características necesarias para su transformación, les hacen además compatibles con las resinas a reforzar.
- **Ensimajes textil-plásticos:** Por su combinación aportan soluciones que son suficientes en algunos casos de aplicación.

Figura 2.21: Detalle de fabricación de la fibra de vidrio



Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.22: Fibrado de vidrio por fusión directa



Fuente: Materiales Compuestos I

2.3.1.4. Bobinado

El conjunto de filamentos se agrupa en una o varias unidades para dar lugar a productos finales (roving directo) o productos intermedios (ovillos).

2.3.1.5. Secado

Los productos procedentes del bobinado se pasan por diferentes dispositivos de secado con el objeto de eliminar el exceso de agua que se había disuelto el ensimaje.

2.4. ENSAYOS

2.4.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción uniaxial constituye el método fundamental para la determinación de datos tales como la especificación del material, inspección, investigación, desarrollo y diseño de componentes estructurales.

Para materiales compuestos de fibra de vidrio unidireccionales y tejidos podemos medir los siguientes parámetros:

- E_x y E_y , que son los módulos de Young en la dirección de la fibra y en dirección transversal, respectivamente.
- ν_{xy} , el coeficiente de Poisson.
- X e Y , la resistencia a tracción en la dirección de la fibra y en la dirección transversal, respectivamente.

Para laminados simétricos multidireccionales, podemos medir:

- E_1 , módulo del laminado en la dirección de aplicación de la carga.
- ν_{12} , coeficiente de Poisson.
- X , resistencia a la tracción del laminado en la dirección de aplicación de la carga.

2.4.1.1. Probeta de ensayo

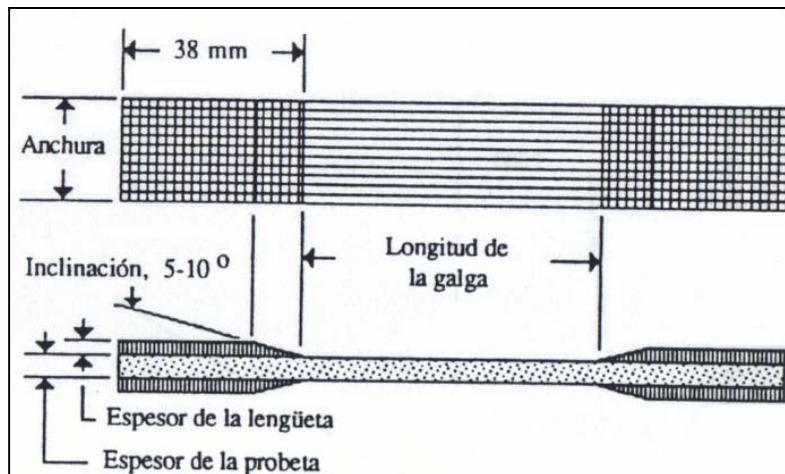
Según la normativa americana ASTM D 3039 para tracción de compuestos fibra-resina, se aceptan universalmente probetas rectangulares, de sección constante con lengüetas incorporadas en los extremos.

Tabla 2.25 Dimensiones recomendadas de la probeta en mm

Orientación	Anchura (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)
0 grados	12.7	127	1 a 2.54
90 grados	25.4	38	1 a 2.54
Multidireccional	25.4	127	1 a 2.54

Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.23: Probeta de ensayo a tracción con lengüetas en los extremos



Fuente: Materiales Compuestos I

2.4.1.2. Lengüetas de amarre

- Se utilizan generalmente placas de tejido o laminado cruzado de vidrio E/epoxi. Las probetas con fibra orientadas a 90 grados se ensayan sin lengüeta de amarre.
- La longitud de la lengüeta se determina en función de la resistencia a cortadura del adhesivo y la resistencia a tracción del material compuesto. Debe estar entre 25 y 38 mm.
- El espesor de la lengüeta varía con el espesor de la probeta, y su rango se encuentra entre 1.5 y 2.5 mm.

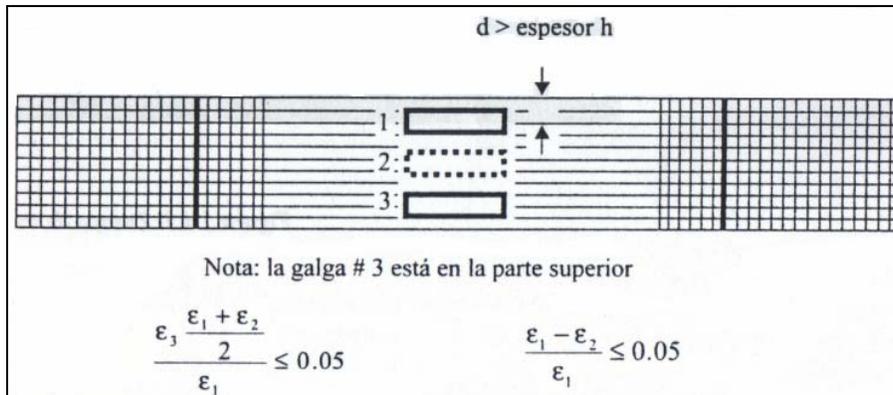
2.4.1.3. Corte de la probeta

- Hay que evitar que los cortes de los bordes sean ásperos o desiguales, así como rayados de la superficie.
- Los bordes de la probeta deben ser paralelos con un error máximo de 0.125 mm.

2.4.1.4. Procedimiento de ensayo

- Determinar la anchura y el espesor en varios puntos, y tomar los valores mínimos para el cálculo de la sección de la probeta.
- Aplicar la carga a través de una serie de mordazas en forma de cuña con el objeto de generar la presión lateral suficiente para evitar el deslizamiento.
- La alineación de los ejes de la probeta respecto a la dirección de carga es muy importante. La flexión debida a una mala alineación puede detectarse mediante galgas extensométricas.
- Se recomienda una relación de deformación constante desde 16.7×10^{-6} a $33.7 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$. se acepta también una velocidad de carga constante o una relación de carga constante correspondiente a la relación de deformación.
- La medición de carga se hará mediante:
 - Extensómetro con longitud de galga de 12.5 o 25 mm.
 - Resistencia eléctrica de la galga de deformación: 350 o 120 Ohm. Galga tipo lámina con longitud de 3.3 a 6.5 mm.
- En el circuito de la galga extensométrica es recomendable para minimizar la generación de calor un voltio.

Figura 2.24: Posicionamiento de las galgas extensométricas y cálculos para la comprobación de desalineación



Fuente: Materiales Compuestos I

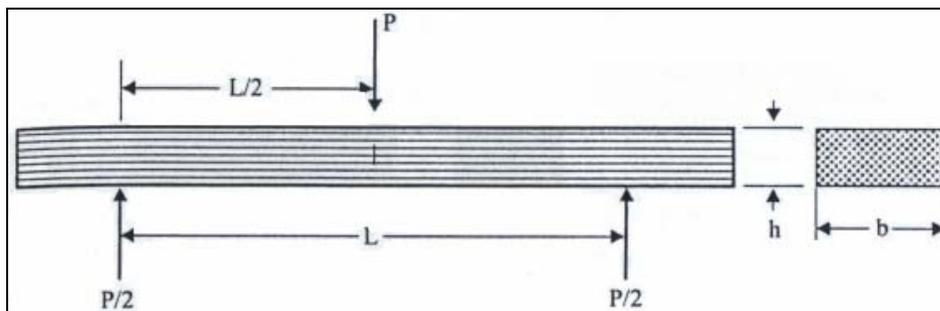
2.4.2. ENSAYO DE FLEXIÓN

Este ensayo se utiliza para control de calidad y especificación de material. Este ensayo no sirve para caracterizar el material. También se usa para determinar la resistencia de las fibras exteriores y el módulo de Young de materiales compuestos homogéneos y poliméricos.

Para el caso de ensayo de flexión de laminados multidireccionales, la interpretación de la resistencia y rigidez no es tan sencilla.

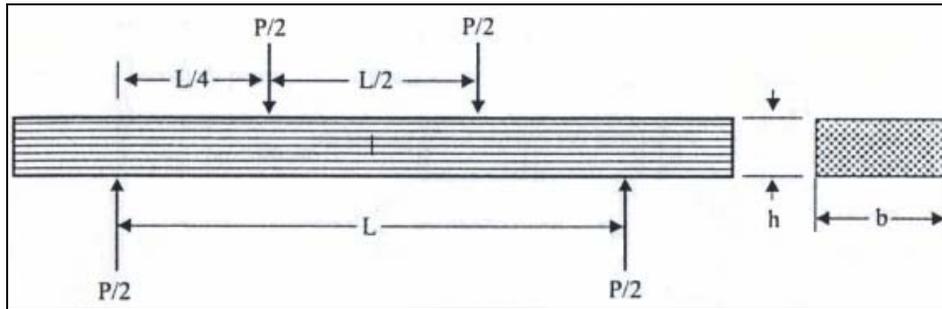
En las figuras 2.25 y 2.26, muestran los ensayos de flexión a tres y cuatro puntos, respectivamente. El ensayo a tres puntos está diseñado principalmente para materiales que rompen a una deflexión relativamente pequeña.

Figura 2.25: Ensayo de flexión a tres puntos



Fuente: Materiales Compuestos I

Figura 2.26: Ensayo de flexión a cuatro puntos



Fuente: Materiales Compuestos I

El análisis del ensayo a tres puntos es:

$$\text{(Ec. 2.3)} \quad X = \frac{3PL}{2bh^2}$$

$$\text{(Ec. 2.4)} \quad E_x = \frac{PL^3}{4bh^3d}$$

Donde d = deflexión en el punto medio.

El ensayo a cuatro puntos está diseñado para materiales que alcanzan grandes desplazamientos.

El análisis de este ensayo es:

$$\text{(Ec. 2.5)} \quad X = \frac{3PL}{4bh^2}$$

$$\text{(Ec. 2.6)} \quad E_x = \frac{11PL^3}{64bh^3d}$$

La probeta debe cargarse hasta que se alcance la rotura a tracción o compresión, o hasta que se alcance la máxima deformación de las fibras en las láminas más exteriores.

El desplazamiento no debe exceder el 10 por ciento de la longitud entre apoyos según la ASTM D 790. Es preciso la utilización de factores de corrección para grandes deformaciones. Para los apoyos y puntos de carga se utilizan bulones. Un diámetro de bulón superior a 6.4 mm minimizará la incrustación localizada y la concentración de tensiones.

La relación L/h óptima, depende de la relación entre la resistencia de a tracción y a cortadura ínter laminar. Se recomiendan relaciones de 16, 32, 40, 60.

La EN 63 recomienda diámetros de bulones de 5 mm y 2 mm para el útil de carga y los soportes respectivamente, siendo la relación L/h óptima de 16.

Un ensayo de probeta con una relación longitud entre apoyos/espesor baja, el desplazamiento a cortadura puede reducir el módulo aparente. Para la determinación del módulo se utiliza la relación 60:1.

La anchura de la probeta b deberá ser mayor que el espesor h , pero no superar la cuarta parte de la longitud entre apoyos.

2.4.3. ENSAYO DE COMPRESIÓN

Con este ensayo podemos determinar las constantes elásticas y resistencias a compresión de un material compuesto. Es muy difícil determinar resistencias a compresión precisas, fiables y reproducibles en materiales compuestos unidireccionales. Debido al alto grado de anisotropía de estos materiales, la resistencia a compresión es altamente dependiente del método de ensayo utilizado. Una carga ligeramente excéntrica provocará una rotura prematura a pandeo antes de que ocurra la rotura intrínseca a compresión.

El método de aplicación de la carga, ya sea directa sobre el extremo de la probeta o bien de cortadura como se indica en la norma ASTM D3410, tiene una influencia significativa sobre la resistencia a compresión y modo de rotura. La carga de compresión directa sobre la probeta provoca aplastamiento en el extremo de la probeta y rotura por fisuración vertical en materiales ortótropos.

Esta rotura por fisuración vertical ocurre a un nivel de tensión menor que la resistencia de compresión. Para evitar estos problemas, se recurre a la aplicación de la carga mediante cortadura. El método de ensayo más utilizado es el descrito en la norma ASTM D3410 que usa los utillajes Celanese o IITRI.

Estos utillajes son válidos para una probeta de longitud menor de 12.6 mm, siendo inicialmente utilizados para laminados a 0.90 grados y laminados cruzados.

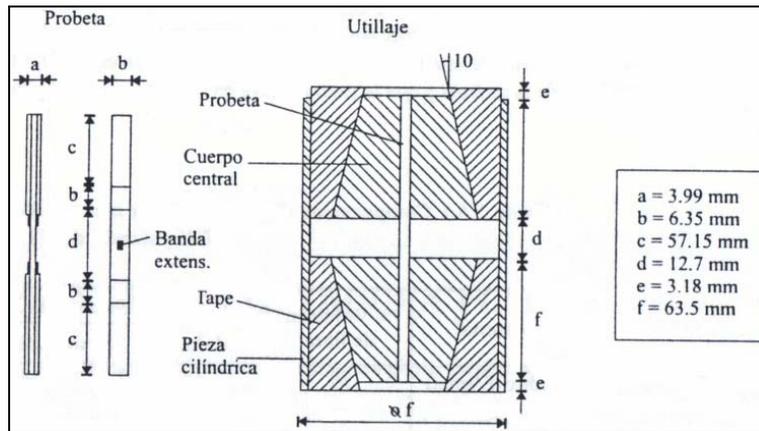
El espesor recomendado para el vidrio es de 3.2 – 4.0 mm.

El cálculo del espesor de la probeta puede llevarse a cabo mediante la fórmula de pandeo de la columna de Euler. Para una columna biapoyada de longitud L .

$$(Ec. 2.7) \quad P_{critica} = \frac{\pi EI}{L^2}$$

Para una columna biempotrada, la carga de pandeo es cuatro veces superior a la biapoyada.

Figura 2.27: Probeta y utililaje Celanese para ensayos de compresión



Fuente: Materiales Compuestos I

La medición de las constantes elásticas y resistencias puede estar afectada por efectos localizados en los extremos de la probeta. Este ensayo no puede aplicarse a laminados no orientados con la dirección de la carga, y no puede utilizarse para ensayos a fatiga tracción-compresión. La rotura normalmente se presenta en la zona de amarre de la probeta y no en la parte central.

La tensión de rotura última determinada a través de estos ensayos puede no ser representativa de la rotura a compresión real del material compuesto. Existe un método de ensayo que utiliza una probeta tipo mini sándwich cuyas pieles están realizadas con el material compuesto a ensayar y el núcleo está formado por matriz pura similar del material compuesto a ensayar. La geometría de la probeta está dada por la norma ASTM D3410.

La resistencia a compresión en el material compuesto que compone las pieles del sandwich viene dada por la regla de las mezclas para una probeta trabajando a tracción:

$$(Ec. 2.8) \quad X' = \frac{(\sigma_a - \varepsilon_a E_2 V_2)}{V_1}$$

Donde V es el tanto por uno en volumen de fibra, σ tensión, ϵ deformación y E módulo elástico. Los subíndices a, 1 y 2 representan el sandwich completo, pieles y núcleo respectivamente.

Las resistencias a compresión obtenidas a partir de la probeta sándwich son significativamente mayores que las dadas por la norma y son comparables a las tensiones de tracción.

Tabla 2.26 Comparación de resistencias a compresión obtenidas mediante mini sándwich IITRI y Standard IITRI

Material	% Volumen de fibra	Sándwich IITRI			Laminado sólido ITRI Resistencia, MPa
		Módulo, GPa	Resistencia, MPa	% CC	
Vidrio-E/epoxi	62	44	1085	6.4	806
Vidrio-S2/1034	60	58	2238	4.5	1400
AS4/3501-6	62	137	2020	3.1	1260
AS4/APC-2	57	129	1573	3.4	1100
IM8/3501-6	65	x	2270	X	1380
Boro/epoxi	50	x	3625	x	2930

Fuente: Materiales Compuestos I

2.4.4. ENSAYO DE FATIGA

Este ensayo nos permite obtener los niveles de tensión admisibles, fundamentales para la selección de materiales, la verificación de modelos analíticos y el estudio del efecto de factores tales como el tipo de probeta, dimensiones, forma de la carga cíclica, frecuencia, etc. Existen muchos factores que modifican la resistencia a la fatiga de un material compuesto, como las variables propias del material, es aquí donde el diseñador no puede únicamente referirse al diagrama S-N para obtener la resistencia a la fatiga de una pieza porque el valor obtenido en el laboratorio puede ser considerablemente mayor que el correspondiente al comportamiento real de la pieza.

2.4.4.1. Métodos de ensayo y definición de probetas

Las probetas utilizadas varían en función del objetivo del ensayo. Según ASTM D3039 las probetas se utilizan para estudiar la fatiga de materiales compuestos y verificación de modelos analíticos. Esta probeta sirve únicamente para cargas de fatiga tracción-tracción, aunque también puede utilizarse en ensayos compresión-compresión o tracción-compresión, si se utiliza algún dispositivo para evitar el pandeo de la probeta generado por las cargas a compresión.

El número de repeticiones depende del objetivo del ensayo.

Los ensayos de fatiga para materiales compuestos se utilizan una gran variedad de condiciones de carga. Las cargas cíclicas pueden clasificarse en cargas de amplitud constante y variable. Para la determinación de curvas S-N y parámetros de modelos de vida a fatiga se utiliza cargas de amplitud constante y diferentes coeficientes de tensión ($R=s_{\min}/s_{\max}$). Para generar una curva S-N completa se utiliza cargas tracción-tracción ($R\geq 0$), tracción-compresión ($R\leq 0$) y compresión-compresión ($R\geq 0$).

La frecuencia de un ensayo de fatiga varía de 0.1 a 30 Hz. Las frecuencias menores generalmente reducen la vida a fatiga y su efecto es mayor en laminados con rotura de matriz dominante.

2.4.4.2. Reducción de datos de fatiga

Hasta la fecha, no existe una metodología de análisis de vida a fatiga de materiales compuestos suficientemente precisas. Existen metodologías como de predicción de vida estadística que son las más importantes.

Para el diagrama S-N no se ha seguido una regla general existen ideas que constituyen una vía general para este tema. Normalmente se realizan ensayos de fatiga a amplitud constante bajo un número variable entre tres y cinco niveles de tensiones. Los límites de los valores de tensiones son entre 10^4 y 10^6 ciclos.

El número de probetas a ensayar bajo cada nivel de tensión depende del grado de dispersión de datos y de disponibilidad de probetas y tiempo de ensayo; para material compuesto es normal utilizar de cuatro a diez probetas.

2.4.4.3. Modelo de degradación de resistencia

Este modelo permite predecir la distribución estadística de la vida a fatiga y de la resistencia residual. La resistencia residual se refiere a la totalidad del daño en el material más que a la longitud de la grieta ya que en materiales compuestos se caracteriza la existencia de múltiples agrietamientos de matriz y roturas de fibras.

El modelo de degradación de resistencia se basa en la hipótesis de que la distribución de resistencia estática y la vida a fatiga siguen una distribución Weibull de dos parámetros, con un parámetro a_0 y un parámetro de escala b_0 para la resistencia estática y a_f y b_f para la vida a fatiga. La vida a fatiga sigue una ley exponencial y genera las siguientes expresiones:

Relación entre resistencia estática, $X(o)^c$ y resistencia residual, $X(n)^c$: (Ec. 2.9)

$$(Ec. 2.9) \quad X(n)^c = X(o)^c - b_o^c KS^b n$$

Distribución de resistencia residual: (Ec. 2.10)

$$(Ec. 2.10) \quad R(x) = \exp \left[- \left\{ \left(\frac{x}{b_o} \right) + nKS^b \right\}^{\frac{a_o}{c}} \right]$$

Distribución de vida a fatiga: (Ec. 2.11) y (Ec. 2.12)

$$(Ec. 2.11) \quad R(n) = \exp \left[- \left(\frac{n}{\frac{1}{KS^b}} \right)^{\frac{a_o}{c}} \right]$$

$$Ó \quad (Ec. 2.12) \quad R(n) = \exp \left[- \left(\frac{n}{N} \right)^{a_f} \right]$$

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA DE DISEÑO APLICABLE A LA FIBRA DE VIDRIO

INTRODUCCIÓN

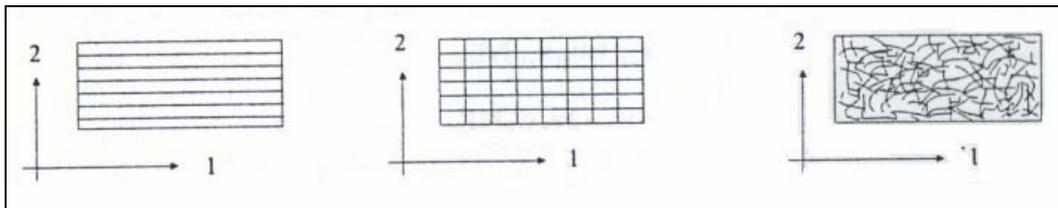
La mecánica trata con

- Esfuerzos
- Deformaciones
- Desplazamientos de estructuras sujetas a cargas
- Mecánicas
- Térmicas

- Los compuestos reforzados con fibras son microscópicamente no-homogéneos y no isotrópicos

En estructuras construidas en fibra de vidrio, la lámina constituye la unidad básica del laminado.

Figura 3.1: Tipos de láminas



Fuente: Materiales Compuestos I

Los tres tipos de láminas más conocidas son:

- Lámina Unidireccional:** todas las fibras están orientadas en una única dirección. En este tipo de lámina existe isotropía (mismas propiedades en todas las direcciones en un plano perpendicular al de las fibras).
- Lámina Tipo Tejido:** todas las fibras están orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí. La urdimbre (fibras longitudinales) esta entrelazada con la trama (fibras transversales). El 50% de las fibras puede estar orientada en cada dirección (tejido equilibrado) o puede haber más

fibras en una dirección que en la otra (tejido no equilibrado). Se considera que existe ortotropía en este tipo de lámina.

- c) **Lámina Tipo Mat:** está compuesta por fibras cortadas aleatoriamente orientadas. Se considera que existe isotropía (mismas propiedades en todas direcciones) en el plano de la lámina. Este es el posible caso de la fibra de vidrio nacional y por consiguiente tema de estudio de esta tesis.

3.1 ALTERNATIVAS

- La mecánica de materiales compuestos se estudia a dos niveles:

3.1.1. NIVEL MICRO MECÁNICO

La interacción de los materiales constituyentes se examina en una escala microscópica.

- Permite obtener las ecuaciones en las que se basa el comportamiento de láminas
- Permite estudiar los modos de falla de un material

Para este método es necesario empezar por la ley de Hooke para tipos de simetrías y concepto de constante ingenieril, para luego plantear la ley de Hooke generalizada y obtener diferentes relaciones matriciales tensión-deformación.

Constantes elásticas. Ley de Hooke generalizada.

La ley de Hooke generalizada esta definida por la relación tensión deformación para un material anisótropo y se obtiene a partir de la energía elástica como postulado básico de la teoría de la elasticidad.

Estas constantes varían según el tipo de simetría del material y por ello vamos a considerar las simetrías que puedan representar a la fibra de vidrio nacional.

3.1.1.1. Simetría Ortótropa

Un material es ortótropo cuando existe simetría en tres planos ortogonales. El número de constantes independientes en este caso son 9. Si los planos de simetría coinciden con el sistema de coordenadas de referencia, el número de componentes distintas de cero es 12, como se muestra a continuación.

Tabla 3.1 Matriz de rigidez de un material ortótropo

	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
σ_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	0	0	0
σ_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	0	0	0
σ_3	C_{31}	C_{32}	C_{33}	0	0	0
σ_4	0	0	0	C_{44}	0	0
σ_5	0	0	0	0	C_{55}	0
σ_6	0	0	0	0	0	C_{66}

Fuente: Materiales Compuestos I

3.1.1.2. Simetría transversalmente isótropa

Para el caso de un material transversalmente isótropo el número de constantes independientes es 5, si el plano de isotropía coincide con uno de los planos del sistema de coordenadas. Las componentes distintas de cero son 12.

Tabla 3.2 Matriz de rigidez de un material transversalmente isótropo

	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
σ_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	0	0	0
σ_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	0	0	0
σ_3	C_{31}	C_{32}	C_{33}	0	0	0
σ_4	0	0	0	$(C_{22}-C_{23})/2$	0	0
σ_5	0	0	0	0	C_{66}	0
σ_6	0	0	0	0	0	C_{66}

Fuente: Materiales Compuestos I

La isotropía transversal del material permite plantear cuatro relaciones que reducen el número de constantes independientes de 9 a 5.

$$\begin{aligned}
 & C_{22} = C_{33}, C_{13} = C_{12} \\
 \text{(Ec. 3.1)} \quad & C_{55} = C_{66}, C_{44} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2}
 \end{aligned}$$

3.1.1.3. Simetría isótropa

Si un material es totalmente isótropo, el número de constantes independientes disminuye de 5 a 2 según las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 \text{(Ec. 3.2)} \quad & C_{11} = C_{22} = C_{33} \\
 & C_{12} = C_{23} = C_{31} \\
 & C_{44} = C_{55} = C_{66} = \frac{C_{11} - C_{12}}{2}
 \end{aligned}$$

Al igual que en las simetrías anteriores existen 12 constantes distintas de cero.

Tabla 3.3 Matriz de rigidez de un material isótropo

	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
σ_1	C_{11}	C_{12}	C_{12}	0	0	0
σ_2	C_{21}	C_{11}	C_{12}	0	0	0
σ_3	C_{21}	C_{21}	C_{11}	0	0	0
σ_4	0	0	0	$(C_{11}-C_{12})/2$	0	0
σ_5	0	0	0	0	$(C_{11}-C_{12})/2$	0
σ_6	0	0	0	0	0	$(C_{11}-C_{12})/2$

Fuente: Materiales Compuestos I

Para analizar los componentes de la matriz de flexibilidad se sigue el mismo modelo de número de componentes independientes y distintas de cero de la matriz de rigidez. Simplemente se sustituye C_{ij} por S_{ij} .

Únicamente hay una diferencia; la equivalencia de cortadura pura y la tracción y compresión combinada aplicadas a 45 grados de orientación, conducen a la siguiente relación, para la matriz de flexibilidad:

$$\begin{aligned}
 \text{(Ec. 3.3)} \quad & S_{44} = 2(S_{22} - S_{23}) \\
 & S_{55} = 2(S_{33} - S_{31}) \\
 & S_{66} = 2(S_{11} - S_{12})
 \end{aligned}$$

En términos de constantes ingenieriles, la equivalencia se puede expresar como:

$$\text{(Ec. 3.4)} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Donde G, E y ν son el módulo de cortadura, el módulo de Young y el coeficiente de Poisson respectivamente.

Tabla 3.4 Matriz de flexibilidad de un material isótropo

	σ_1	σ_1	σ_1	σ_1	σ_1	σ_1
ϵ_1	S_{11}	S_{12}	S_{12}	0	0	0
ϵ_1	S_{21}	S_{11}	S_{12}	0	0	0
ϵ_1	S_{21}	S_{21}	S_{11}	0	0	0
ϵ_1	0	0	0	$2(S_{11}-S_{12})$	0	0
ϵ_1	0	0	0	0	$2(S_{11}-S_{12})$	0
ϵ_1	0	0	0	0	0	$2(S_{11}-S_{12})$

Fuente: Materiales Compuestos I

3.1.1.4. Constantes ingenieriles

Las definiciones de los módulos de Young y módulos de cortadura para un material anisótropo son las siguientes:

$$(Ec. 3.5) \quad E_1 = \frac{1}{S_{11}}, E_2 = \frac{1}{S_{22}}, E_3 = \frac{1}{S_{33}}$$

$$(Ec. 3.6) \quad E_4 = G_{23} = \frac{1}{S_{44}}, E_5 = G_{31} = \frac{1}{S_{55}}$$

$$E_6 = G_{12} = \frac{1}{S_{66}}$$

3.1.1.5. Obtención de las características elásticas de la lámina.

Para láminas unidireccionales, se considera que el material es transversalmente isótropo.

$$(Ec. 3.7) \quad E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

Donde V_f es el volumen de la fibra

$$(Ec. 3.8) \quad E_2 = \frac{\frac{E_m}{(1 - \nu_m^2) * (1 + 0.85V_f^2)}}{(1 + V_f)^{1.25} + \frac{\frac{E_m}{E_f} V_f}{1 - \nu_m^2}}$$

$$(Ec. 3.9) \quad G_{12} = \frac{G_m (1 + 0.6V_f^{0.5})}{(1 - V_f)^{1.25} + \frac{V_f}{(1 - \nu_m^2)}}$$

$$(Ec. 3.10) \quad \nu_{12} = V_f \nu_f + (1 - V_f) \nu_m$$

Para un tejido equilibrado, se considera que el módulo longitudinal 1 coincide con el módulo longitudinal en la dirección 2:

$$(Ec. 3.11) \quad E_1 = E_2 = V_f (E_f 1/2 + E_m 3/2) + E_m$$

$$(Ec. 3.12) \quad G_{12} = \frac{E_m}{\frac{(4V_f + 1)}{3}}$$

$$(Ec. 3.13) \quad \nu_{12} = \frac{G_{12}}{E_1}$$

Para un tejido no equilibrado se utilizan las siguientes expresiones para las direcciones longitudinal (urdiumbre) y transversal (trama):

$$(Ec. 3.14) \quad E_{ur} = \frac{C_e E_L + (1 - C_e) E_T}{\lambda}$$

$$(Ec. 3.15) \quad E_{tr} = \frac{C_e E_T + (1 - C_e) E_L}{\lambda}$$

$$(Ec. 3.16) \quad \nu_{ur} = \frac{\nu_{LT}}{\left[C_e + (1 - C_e) \frac{E_L}{E_T} \right]}$$

$$(Ec. 3.17) \quad G_{ur} = G_{LT}$$

$$\lambda = 1 - \nu_{LT} * \nu_{TL}$$

$$(Ec. 3.18) \quad \text{Con:} \quad C_e = \frac{(N_f \cdot T)_{urdiumbre}}{((N_f \cdot T)_{urdiumbre} + (N_f \cdot T)_{trama})}$$

Siendo N_f el número de hilos por centímetro y T , el título del hilo en Tex.

Para láminas tipo mat, se considera que el material es isótropo, es decir, presenta las mismas propiedades en todas direcciones. Los valores aproximados de las constantes elásticas son las siguientes:

$$(Ec. 3.19) \quad E_1 = E_2 = V_f (E_f 16/45 + E_m 2) + E_m 8/9$$

$$(Ec. 3.20) \quad G_{12} = V_f (E_f 2/15 + E_m 3/4) + E_m 1/3$$

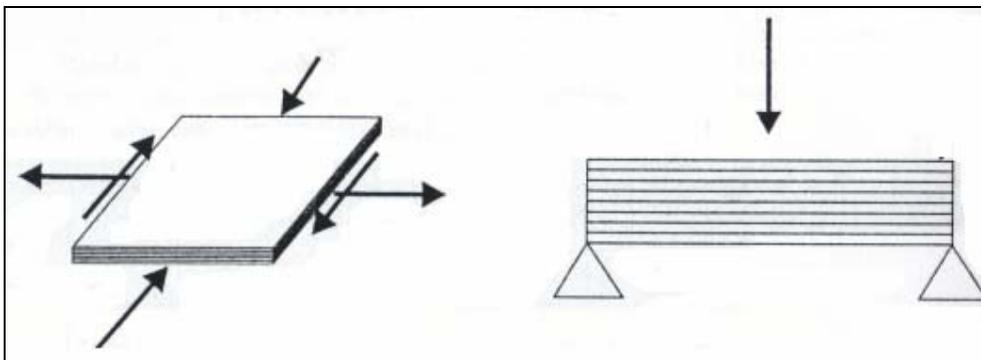
$$(Ec. 3.21) \quad \nu_{12} = 1/3$$

3.1.1.6. Teoría de placas laminadas.

La lámina es la configuración básica de una estructura de materiales compuestos. Como el espesor de la lámina de fibra de vidrio nacional es muy bajo, en general, de 0.1 a 1.5 mm, las configuraciones resistentes utilizadas constan de una agrupación secuencial de láminas, denominado laminado.

Un laminado de material compuesto puede estar trabajando a a tensión plana (esfuerzos en el plano) y/o a flexión.

Figura 3.2: Laminado trabajando en tensión plana (izquierda) y laminado trabajando a flexión (derecha)



Fuente: Materiales Compuestos I

3.1.2. NIVEL MACRO MECÁNICO: LA RESPUESTA DE UN MATERIAL COMPUESTO

Reforzado por fibras sujeto a cargas mecánicas y térmicas se examina en una escala macroscópica

- Se asume que el material es homogéneo
- Se utilizan las ecuaciones de la elasticidad ortotrópica para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones.

3.1.2.1. Fibras Paralelas Continuas

Asumiendo unión perfecta entre fibra y matriz se puede escribir:

(Ec. 3.22) $\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon_c$

Dado que las fibras y la matriz son elásticas, los esfuerzos longitudinales respectivos se pueden calcular como:

$$\text{(Ec. 3.23)} \quad \sigma_f = E_f \varepsilon_f = E_c \varepsilon_c$$

$$\text{(Ec. 3.24)} \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_m = E_c \varepsilon_c$$

Comparando las ecuaciones (3.23) y (3.24) y tomando en cuenta que $E_f \gg E_m$ se concluye que el esfuerzo en las fibras siempre es mayor que el esfuerzo en la matriz.

La tracción total aplicada a la lámina de compuesto es compartida tanto por las fibras como por la matriz, de modo que:

$$\text{(Ec. 3.25)} \quad P = P_f + P_m$$

Dado que Carga = Esfuerzo x Área, la ecuación (3.25) se puede reescribir como:

$$\text{(Ec. 3.26)} \quad \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

De donde se obtiene que

$$\text{(Ec. 3.27)} \quad \sigma_c = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación (3.27) para ε_c y usando las ecuaciones (3.23) y (3.24), se puede escribir el módulo longitudinal para el compuesto como

$$\text{(Ec. 3.28)} \quad E_L = E_f v_f + E_m (1 - v_f)$$

La fracción de carga soportada por las fibras en una lámina reforzada por fibras continuas es

$$(Ec. 3.29) \quad \frac{P_f}{P} = \frac{\sigma_f v_f}{\sigma_f v_f + \sigma_m (1 - v_f)} = \frac{E_f v_f}{E_f v_f + E_m (1 - v_f)}$$

En general, la deformación de la fibra en el punto de falla es menor que la deformación de la matriz en el punto de falla. Asumiendo que todas las fibras tienen la misma resistencia, la ruptura a tracción de las fibras precipitará la ruptura a tracción del compuesto. Por ello, utilizando la ecuación (3.27), la resistencia longitudinal a la tracción σ_{Ltu} de un compuesto reforzado por fibras continuas unidireccionales se puede estimar como:

$$(Ec. 3.30) \quad \sigma_{Ltu} = \sigma_{fu} v_f + \sigma'_m (1 - v_f)$$

Para que el refuerzo de la matriz sea efectivo, esto es, para que $\sigma_{Ltu} \geq \sigma_{mu}$, la fracción volumétrica de fibras en el compuesto debe ser mayor que un valor crítico. Esta fracción volumétrica crítica se calcula haciendo $\sigma_{Ltu} = \sigma_{mu}$. Entonces, a partir de la ecuación (3.30) se tiene

$$(Ec. 3.31) \quad v_{f,critico} = \frac{\sigma_{mu} - \sigma'_m}{\sigma_{fu} - \sigma'_m}$$

Se debe tomar en cuenta que además de los esfuerzos longitudinales, existen otros esfuerzos en la lámina:

1. Debidos a coeficientes de Poisson diferentes
2. Debidos a CTE's diferentes

3.1.2.2. Fibras Paralelas Discontinuas

- Dado que la matriz de un material compuesto tiene un módulo menor que las fibras, la deformación longitudinal en la matriz es mayor que en las fibras adyacentes.

- Si se asume unión perfecta entre fibra y matriz, la diferencia en la deformación longitudinal da lugar a un esfuerzo cortante a lo largo de la intercara.
- Ignorando la transferencia de esfuerzo en los extremos de la fibra y la interacción entre fibras adyacentes, se puede calcular la distribución de esfuerzos en una fibra discontinua utilizando un análisis de equilibrio
- Considere un segmento infinitesimal dx a una distancia x de uno de los extremos de una fibra. La ecuación de equilibrio para este segmento es

$$\left(\frac{\pi}{4}d_f^2\right)(\sigma_f + d\sigma_f) - \left(\frac{\pi}{4}d_f^2\sigma_f\right) - \pi d_f dx \tau = 0$$

τ = esfuerzo cortante en la inter cara fibra/matriz

que simplificando resulta en

$$\text{(Ec. 3.32)} \quad \frac{d\sigma_f}{dx} = \frac{4\tau}{d_f}$$

- Si se asume que $\sigma_f = 0$ en $x = 0$, e integrando la ecuación (3.32), se determina que la distribución longitudinal de esfuerzos en la fibra viene dada por

$$\text{(Ec. 3.33)} \quad \sigma_f = \frac{4}{d_f} \int_0^x \tau dx$$

- Asumiendo que el esfuerzo cortante interfacial es constante, la integración de la ecuación (3.33) resulta en

$$\text{(Ec. 3.34)} \quad \sigma_f = \frac{4\tau_i}{d_f} x$$

- Cuando una lámina de material compuesto contiene fibras discontinuas, el esfuerzo en las fibras no es uniforme.
- El máximo esfuerzo que se puede alcanzar a una carga dada es

$$\text{(Ec. 3.35)} \quad (\sigma_f)_{\max} = 2\tau_i \frac{l_t}{d_f}$$

$\frac{l_t}{2}$ = longitud de transferencia de carga a cada extremo de la fibra. l_t es la longitud mínima de la fibra en la cual se alcanza el esfuerzo máximo en la fibra.

- Para un diámetro de la fibra dado y para una condición determinada de la intercara fibra/matriz, se calcula la longitud crítica de la fibra a partir de la ecuación (3.35)

$$\text{(Ec. 3.36)} \quad l_c = \frac{\sigma_{fu}}{2\tau_i} d_f$$

σ_{fu} = Resistencia última de la fibra

l_c = Longitud mínima de la fibra que se requiere para que el máximo esfuerzo en la fibra sea igual a la resistencia última de la fibra en su posición media

τ_i = Resistencia al cizallamiento en la intercara fibra/matriz o resistencia al corte en la matriz adyacente a la intercara

- A partir de las ecuaciones (3.35) y (3.36) se pueden realizar las siguientes observaciones
 - a) Para $l_f < l_c$, el máximo esfuerzo en las fibras no puede alcanzar la resistencia última de las fibras
 - b) Para $l_f > l_c$, el máximo esfuerzo en las fibras puede alcanzar la resistencia última de las fibras sobre gran parte de su longitud
 - c) Para un reforzamiento efectivo se debe seleccionar $l_f \gg l_c$
 - d) Para un diámetro y una resistencia de la fibra dados, l_c se puede controlar aumentando o disminuyendo τ_i

- El esfuerzo promedio en las fibras viene dado por

$$\text{(Ec. 3.37)} \quad \bar{\sigma}_f = \frac{1}{l_t} \int_0^{l_f} \sigma_f dx = (\sigma_f)_{\max} \left(1 - \frac{l_t}{2l_f} \right)$$

- Nótese que la longitud de transferencia de carga para $l_f < l_c$ es l_f mientras que para $l_f > l_c$ es l_c
- Para $l_f > l_c$, la resistencia longitudinal a la tracción de un compuesto unidireccional reforzado con fibras discontinuas se calcula sustituyendo $(\sigma_f)_{\max} = \sigma_{fu}$ y $l_t = l_c$. Con lo cual se tiene

$$\text{(Ec. 3.38)} \quad \sigma_{Ltu} = \bar{\sigma}_{fu} v_f + \sigma'_m (1 - v_f) = \sigma_{fu} \left(1 - \frac{l_c}{2l_f} \right) v_f + \sigma'_m (1 - v_f)$$

- Para $l_f < l_c$ no existirá falla de las fibras. En su lugar, la lámina fallaría debido a la falla a tracción de la matriz. Dado que el esfuerzo promedio a la tracción es $\bar{\sigma}_f = \tau_i \frac{l_f}{d_f}$, la resistencia longitudinal a la tracción viene dada por:

$$\text{(Ec. 3.39)} \quad \sigma_{Ltu} = \tau_i \frac{l_f}{d_f} v_f + \sigma_{mu} (1 - v_f)$$

σ_{mu} = Resistencia a la tracción de la matriz

3.1.2.3. Cargas Transversales de Tracción

- Cuando una carga transversal se aplica a una lámina, las fibras actúan como inclusiones duras en lugar de miembros que soportan cargas
- El módulo de la matriz se incrementa por la presencia de fibras
- Los esfuerzos y deformaciones en la región que rodea a las fibras es mayor que el esfuerzo aplicado

- La componente radial del esfuerzo en torno a las fibras es de tracción. Por ello se pueden desarrollar fisuras perpendiculares a la dirección de carga ya sea en la intercara fibra/matriz o en la matriz a $\theta = 90^\circ$
- Una ecuación sencilla que se puede utilizar para predecir la resistencia transversal a la tracción de una lámina unidireccional es

$$\text{(Ec. 3.40)} \quad \sigma_{Ttu} = \frac{\sigma_{mu}}{K_\sigma}$$

Donde:

$$\text{(Ec. 3.41)} \quad K_\sigma = \frac{1 - v_f \left(1 - \frac{E_m}{E_f} \right)}{1 - \left(\frac{4v_f}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{E_m}{E_f} \right)}$$

- La ecuación (3.40) asume que la resistencia transversal de la lámina está limitada por la resistencia última a la tracción de la matriz. K_σ representa la máxima concentración de esfuerzos en una matriz en la cual las fibras están dispuestas en un arreglo cuadrangular.

3.1.2.4. Cargas Longitudinales de Compresión

- En compuestos de matriz polimérica en los que el módulo de la matriz es relativamente bajo, un modo de falla crítico en compresión longitudinal está dado por el micro pandeo de las fibras.
- Utilizando la teoría de pandeo para columnas en una cimentación elástica, se puede predecir la resistencia a la compresión en modo de cizallamiento mediante

$$\text{(Ec. 3.42)} \quad \sigma_{Lcu} = \frac{G_m}{1 - v_f}$$

- Además del micro pandeo, se han observado varios otros modos de falla durante la compresión longitudinal:
 1. Falla por compresión o fluencia del refuerzo
 2. Falla longitudinal en la matriz debido al efecto del coeficiente de Poisson
 3. Fluencia de la matriz
 4. Separación interfacial
 5. Partido de las fibras, o fibrilación (en compuestos reforzados con Kevlar 49)
- Algunos factores que parecen mejorar la resistencia a la compresión longitudinal de compuestos unidireccionales son:
 1. Mayores valores del módulo al corte de la matriz
 2. Módulo a tracción de las fibras
 3. Diámetro de las fibras
 4. Deformación última de la matriz
 5. Resistencia de la inter cara fibra/matriz

Entre los factores que reducen la resistencia a la compresión longitudinal está la desalineación de las fibras.

3.2 ANÁLISIS Y SELECCIÓN

Ya expuestas las alternativas anteriormente vamos a realizar la metodología aplicable a la fibra de vidrio nacional desde un **nivel macro mecánico**, debido a que este método permite de manera rápida interpretar las características del material.

Por otro lado el nivel micro mecánico es muy complejo y se necesita un conocimiento avanzado mecánica de medio continuo por lo que no lo vamos a aplicar.

Con los datos que obtendremos en los ensayos mecánicos (Capítulo 6), haremos el análisis de resultados prácticos con las fórmulas del nivel macro mecánico descritas en este capítulo.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS Y DISEÑO

4.1. CONDICIONES DE CARGA

4.1.1. TRACCIÓN

En una viga de dimensiones L (longitud), b (ancho) y h (espesor), existe una deformación constante a lo largo de la longitud de la viga y del espesor del laminado.

$$\text{(Ec. 4.1)} \quad \varepsilon = \frac{P}{bhE}$$

El desplazamiento entre extremos de la viga toma el siguiente valor:

$$\text{(Ec. 4.2)} \quad \delta = \frac{PL}{bhE}$$

Para laminado multi direccional, la tensión media a lo largo del espesor del laminado sigue siendo $\frac{P}{bh}$, pero la tensión a lo largo del espesor varía lámina a lámina, siendo proporcional a la rigidez longitudinal de cada lámina.

$$\text{(Ec. 4.3)} \quad \sigma = \frac{PhE}{bh^2E}$$

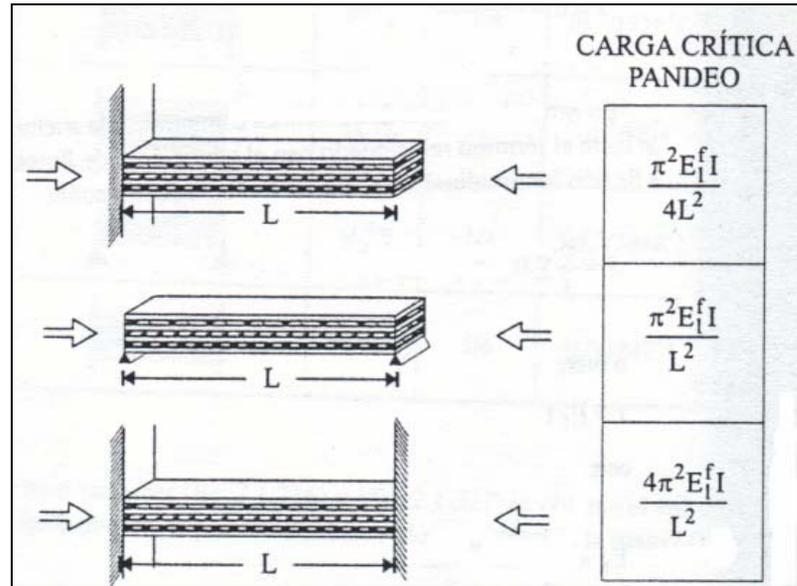
4.1.2. COMPRESIÓN

Una viga trabajando a compresión se calcula de la misma manera que una viga trabajando a tracción, por tal motivo las ecuaciones expresadas en tracción son válidas para compresión.

Cuando una viga es sometida a una carga de compresión, puede existir problemas de inestabilidad (pandeo), el pandeo es mas crítico en materiales compuestos que en materiales dúctiles como los aceros, ya que la inestabilidad aumenta con la flexibilidad.

$$\text{(Ec. 4.4)} \quad P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$$

Figura 4.1: Cargas críticas de pandeo para diferentes condiciones de contorno



Fuente: Materiales Compuestos I

(Ec. 4.5)
$$I = \frac{bh^3}{12}$$

4.1.3. FLEXIÓN

En este caso tenemos dos tipos de flexión en vigas, las cuales son:

- Flexión en vigas delgadas
- Flexión en vigas gruesas

Cuando la relación entre la longitud y el espesor $\frac{L}{h} > 10$ se trabaja con vigas delgadas, caso contrario con vigas gruesas.

(Ec. 4.6)
$$M_{\max} = \frac{PL}{4}$$

(Ec. 4.7)
$$\delta_{\max} = \frac{PL^3}{48EI}$$

En las ecuaciones 4.6 y 4.7, podemos calcular el momento máximo y la deflexión máxima.

Tabla 4.1 Valores de momentos y flechas con distintas condiciones de carga y de contorno

TIPO DE CARGA	M_{max}	M^*	δ_{max}	δ^*
	PL	1	$PL^3/3E^fI$	1
	$PL/4$	1/4	$PL^3/48E^fI$	1/16
	$PL/8$	1/8	$PL^3/192E^fI$	1/64
	$qL^2/2$	1	$qL^4/8E^fI$	1
	$qL^2/8$	1/4	$5qL^4/384E^fI$	5/48
	$qL^2/12$	1/6	$qL^4/384E^fI$	1/48

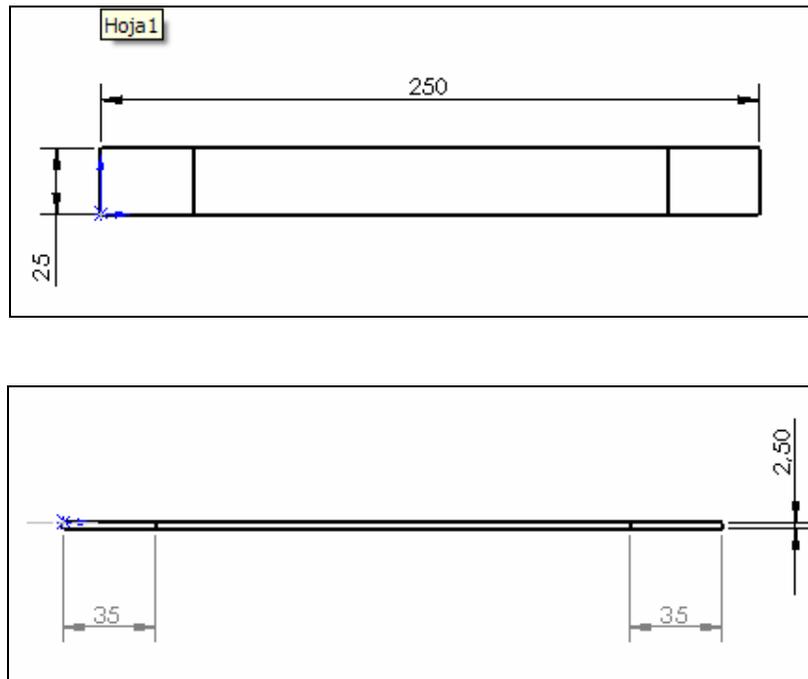
Fuente: Materiales Compuestos I

4.2. GEOMETRÍA DE PIEZAS ESTRUCTURALES

4.2.1. GEOMETRÍA DE PIEZA ESTRUCTURAL PARA TRACCIÓN

La geometría que se utilizó para el ensayo de tracción tiene una forma prismática, la cuál fue obtenida de la norma ASTM D 3039 (Método de prueba para las propiedades tensoras de materiales compuestos).

Figura 4.2: Geometría de la probeta para tracción

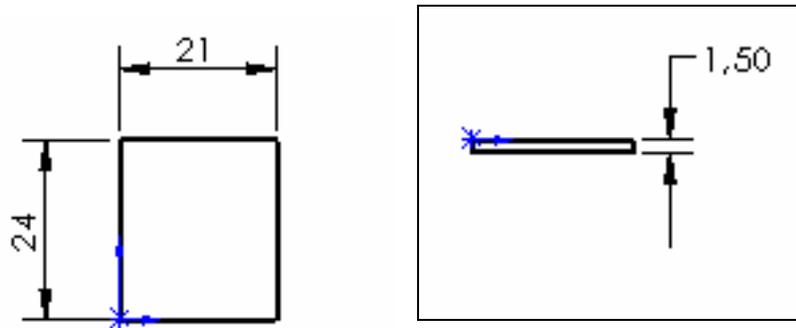


4.2.2. GEOMETRÍA DE PIEZA ESTRUCTURAL PARA COMPRESIÓN

La geometría que se utilizó para el ensayo de compresión tiene una forma prismática, la cuál fue obtenida de la norma ASTM D 3410 (Método de prueba para las propiedades de compresión de materiales compuestos).

Es importante aclarar que no se tomo en cuenta las medidas para las mordazas, ya que se utilizó solamente la zona de compresión.

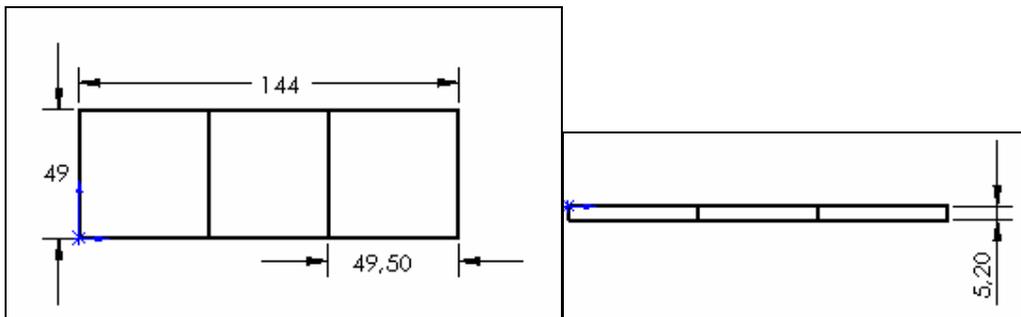
Figura 4.3: Geometría de la probeta para compresión



4.2.3. GEOMETRÍA DE PIEZA ESTRUCTURAL PARA FLEXIÓN

La geometría que se utilizó para el ensayo de flexión tiene una forma prismática, la cuál fue obtenida de la norma ASTM D 790 (Método de prueba para las propiedades flectoras de materiales compuestos).

Figura 4.4: Geometría de la probeta para flexión



4.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

De entre todos los materiales compuestos existen combinaciones adecuadas para aplicaciones industriales o de alta tecnología.

Tabla 4.2 Clasificación de los materiales compuestos en función del tipo de fibra de refuerzo

Materiales Compuestos de Partículas	Dispersiones (Aluminio Sinterizado, Torio)
	MC de partículas (Carburos cementados, Polímeros)
Materiales Compuestos de Fibras	Fibra Corta (Aleatoria)
	Fibra Larga (Unidireccional)
	Fibra larga (Textiles)

Fuente: Materiales Compuestos I

4.3.1. SISTEMAS DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE VIDRIO

Tabla 4.3 Propiedades mecánicas de Mats de vidrio E

Fibra	MAT-E-600 ^a	MAT-E-300	MAT-E-600B	MAT-UNIFILO
Matriz	Poliéster	Poliéster	Vinilester	Vinilester
E _x (MPa)	7733	9771	14236	13461
E _y (MPa)	7733	9771	14236	13641
G _{xy} (MPa)	2880	3659	5357	5131
V _{xy}	0,3426	0,3354	0,3287	0,3292
V _f (%)	16,51	23,53	37,72	35,94
h (mm)	1,4	0,49	0,61	0,48
X (MPa)	100	140	160	180
X' (MPa)	100	140	150	180
Y (MPa)	100	140	160	180
Y' (MPa)	100	140	150	180
S ₁₂ (MPa)	30	30	30	30

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 4.4 Propiedades de estructuras de pultrusión con fibra de vidrio

	Perfil Poliéster	Perfil Vinilester	Redondo Poliéster	Placa Poliéster	Placa Vinilester
E _x (MPa)	17250	17940	41350	12420	12420
E _y (MPa)	5520	5520		6210	6900
G _{xy} (MPa)	2932				
V _{xy}	0,33	0,33		0,31	0,32
X (MPa)	207	207	689	138	138
X' (Mpa)	207	207	448	165	165
Y (MPa)	48	48		51	51
Y' (MPa)	103	109		113	120
S _{xy} (MPa)	31	31			
Izod (Nm/m)	1334	1334	2134	987	987
Izod' (Nm/m)	213	213		266	266
Barcol	45	45	55	40	40
Densidad	1,7-1,9	1,7-1,9	2-2,1	1,7-1,9	1,7-1,9
CTE (m/m/C)	2,4	2,4	1,6	4,4	4,4
CT (w/mK)	0,58	0,63			

Fuente: Materiales Compuestos I**Tabla 4.5** Propiedades mecánicas de SMC

Fibra	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio E	Vidrio S
SMC	SMC-R65	SMC R-65	SMC C60R5	SMC C60R5	SMC C45R20	SMC C45R20
V _f (%)	45	45	45	45	45	45
E _x (MPa)	14500	15000	35700	41000	24700	40100
E _y (MPa)	14500	15000	8900	9900	12000	12900
V _x	0,26	0,26	0,31	0,29	0,3	0,28
X (Mpa)	225	271	768	1059	675	909
Y (MPa)	225	271	22,1	30	44	59

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 4.6 Propiedades mecánicas de SMC

Fibra	Vidrio E	Vidrio E	Vidrio E	Vidrio E
SMC	SMC-R25	SMC R-50	SMC-C20R3	XMC-3
Densidad	1,83	1,87	1,81	1,97
E_x (MPa)	13200	15800	21400	35700
E_y (MPa)	13200	15800	12400	12300
V_x	0,25	0,31	0,30	0,31
X (Mpa)	82,4	164	289	561
Y (MPa)	82,4	164	84	69,9

Fuente: Materiales Compuestos I**Tabla 4.7** Propiedades mecánicas de Unidireccionales de vidrio R y E

Fibra	UNI-R-600	UNI-R-1200	UNI-R-1200	UNI-E-PRE	UNI-E-500
Matriz	Epoxi	Standard	Vinilester	Epoxi	Poliéster
E_x (MPa)	57,1	60,83	31,161	38,6	39,296
E_y (MPa)	15,067	19,865	7,452	8,27	10,289
G_{xy} (MPa)	5,032	6,517	2,738	4,14	4,26
V_{xy}	0,302	0,29	0,3397	0,26	0,3222
V_f (%)	65,31	69,6	40,23	45	51,85
h_o (mm)	1	1	0,44	0,125	0,49
X (MPa)	1300	1600	500	1062	1000
X' (Mpa)	1100	1400	500	610	900
Y (MPa)	80	70	50	31	60
Y' (MPa)	70	65	50	118	60
S_{12} (MPa)	75	70	50	72	65

Fuente: Materiales Compuestos I

Tabla 4.8 Propiedades mecánicas de Tejidos de vidrio E

Fibra	TEJ-E-500 ^a	TEJ-E-500B	TEJ-E-580	TEJ-E-600	TEJ-E-500C
Matriz	Poliéster	Poliéster	Poliéster	Poliéster	Vinilester
E _x (MPa)	14440	16228	19817	20065	9320
E _y (MPa)	13639	15312	19817	19569	36960
G _{xy} (MPa)	2070	2260	2781	2781	3347
V _{xy}	0,148	0,1415	0,1309	0,1326	0,0825
Vf (%)	27,41	31,58	40,91	40,91	48,51
h _o (mm)	0,7	0,61	0,55	0,56	0,4
X (MPa)	196	400	185	185	350
X' (Mpa)	196	400	180	180	350
Y (MPa)	180	380	180	180	320
Y' (MPa)	180	380	175	175	320
S ₁₂ (MPa)	45	40	45	45	45

Fuente: Materiales Compuestos I

4.4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL UTILIZANDO UN SOFTWARE ADECUADO

El estudio estático de los diferentes elementos que componen el ensayo de tracción, compresión y flexión se lo realizó con el programa Cosmos Works 2005, el cual es un programa de simulación de diseño por elementos finitos.

Cosmos works 2005 se impulsa por el rápido, robusto y exacto solucionador que es muchos casos 100 veces más rápido que cualquier técnica convencional de resolución. Se podrá rápidamente analizar las partes y ensamblajes creados en un sistema CAD

4.4.1. PROCEDIMIENTO PARA EL ANALISIS

4.4.1.1. Cargar un archivo de sólidos

Para empezar el trabajo en la barra de herramientas de solid woks pulsamos abrir, se carga un archivo de superficies, sólidos y regiones que en este caso fue realizado en solid Works.

4.4.1.2. Definir un tipo de estudio adecuado: Luego de cargar el dibujo en el programa se procede a definir un tipo de estudio, múltiples son los tipos de estudio que permite el programa realizar. A continuación procedemos a enumerar estos.

- Estudio estático.
- Estudio de frecuencia.
- Estudio de pandeo.
- Estudio Térmico.
- Estudio de optimización.

En el presente proyecto se utilizo un estudio estático ya que las cargas aplicadas a las probetas son tracción, compresión y flexión puras.

4.4.1.3. Aplicar el material

Cosmos Works incluye una librería de las propiedades mecánicas y térmicas de los principales materiales usados en ingeniería.

Para nuestro caso Cosmos Works no tienen las propiedades de materiales compuestos, por lo cual las propiedades mecánicas se los obtuvo de los ensayos mecánicos realizados en la facultad de ingeniería mecánica, para luego proceder a personalizar el material.

4.4.1.4. Aplicar cargas y restricciones

Las restricciones utilizadas en las probetas de tracción como de compresión son del tipo inmóvil.

Las cargas aplicadas son del tipo distribuidas alrededor de la cara.

4.4.1.5. Crear la malla

Cosmos Works es un software que utiliza el método de elementos finitos para sus análisis, por lo tanto una malla para empezar con el estudio de cargas y restricciones para determinar esfuerzos, elongaciones y deflexiones.

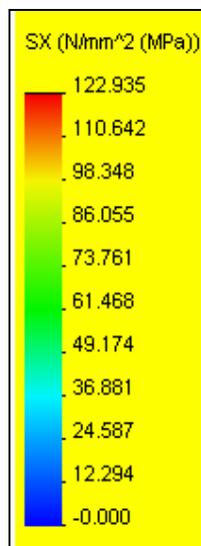
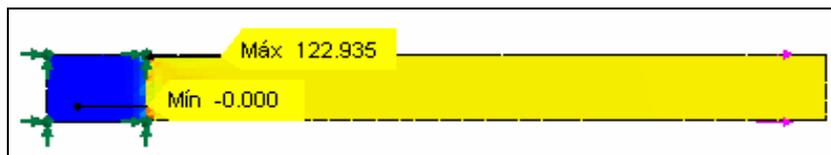
4.5. RESULTADOS

El objetivo de este análisis estático es definir el estado de esfuerzos, desplazamiento, tensión, deformación y verificación de diseño al cual se encuentran sometidas las probetas.

4.5.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

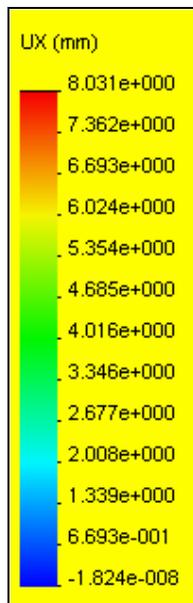
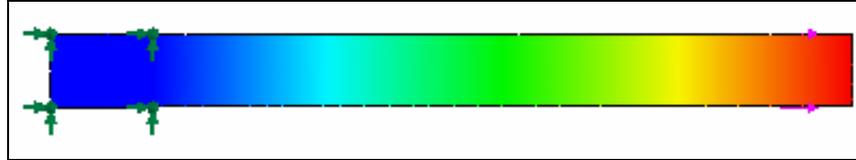
4.5.1.1. Esfuerzos

Figura 4.5: Esfuerzos para el ensayo de tracción



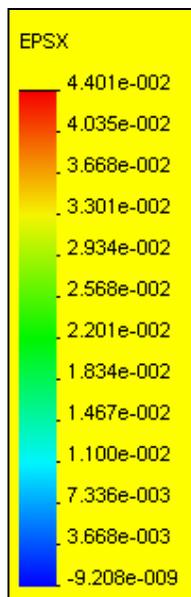
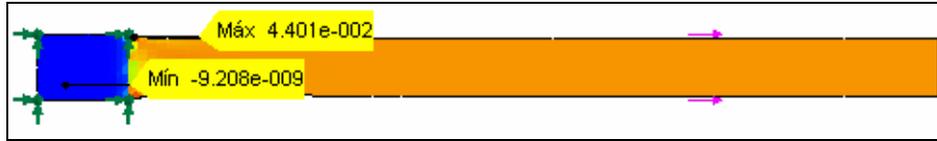
4.5.1.2. Desplazamiento

Figura 4.6: Desplazamiento para el ensayo de tracción



4.5.1.3. Tensión

Figura 4.7: Tensión para el ensayo de tracción



4.5.1.4. Deformación

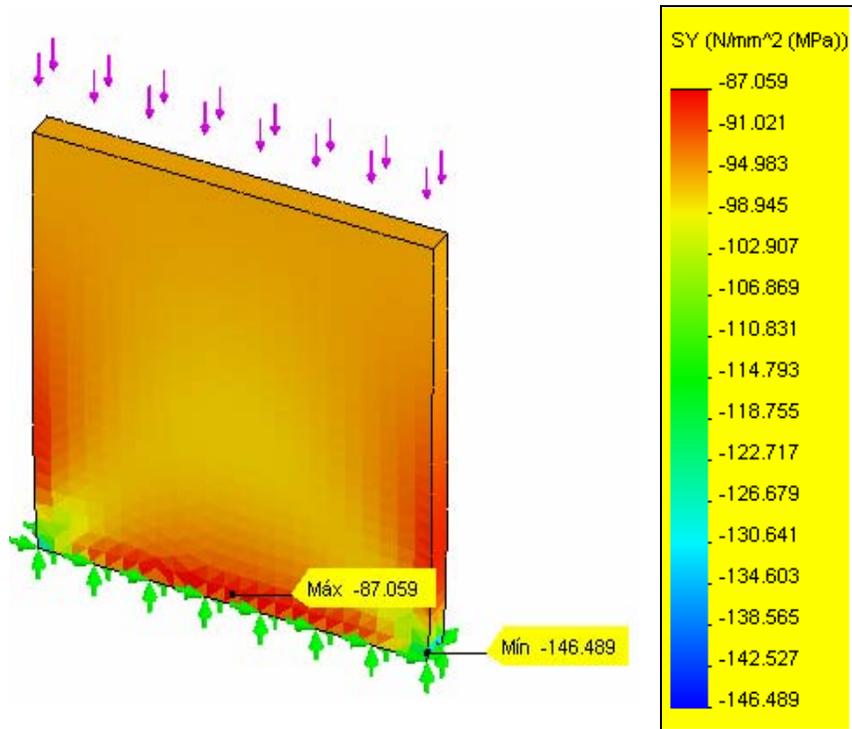
Figura 4.8: Deformación para el ensayo de tracción



4.5.2. ENSAYO DE COMPRESIÓN

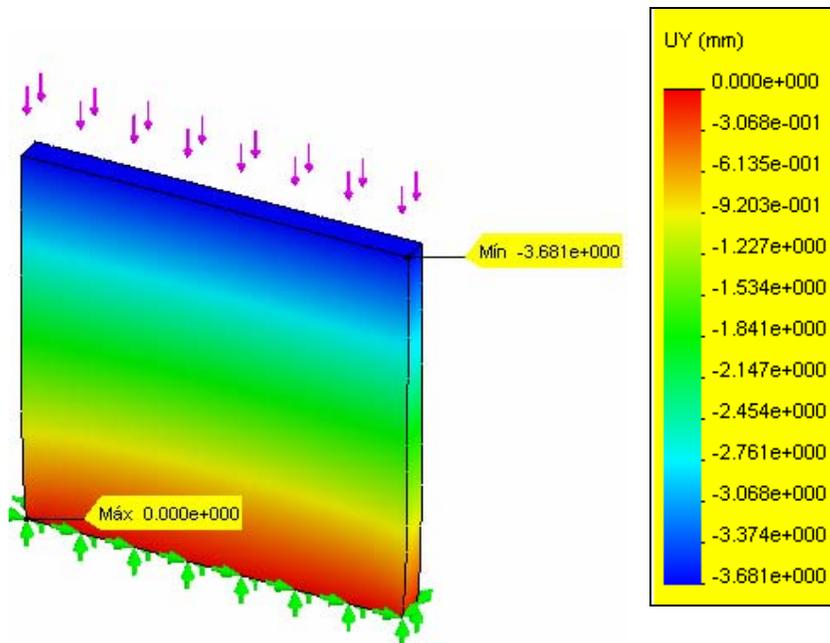
4.5.2.1. Esfuerzos

Figura 4.9: Esfuerzos para el ensayo de compresión



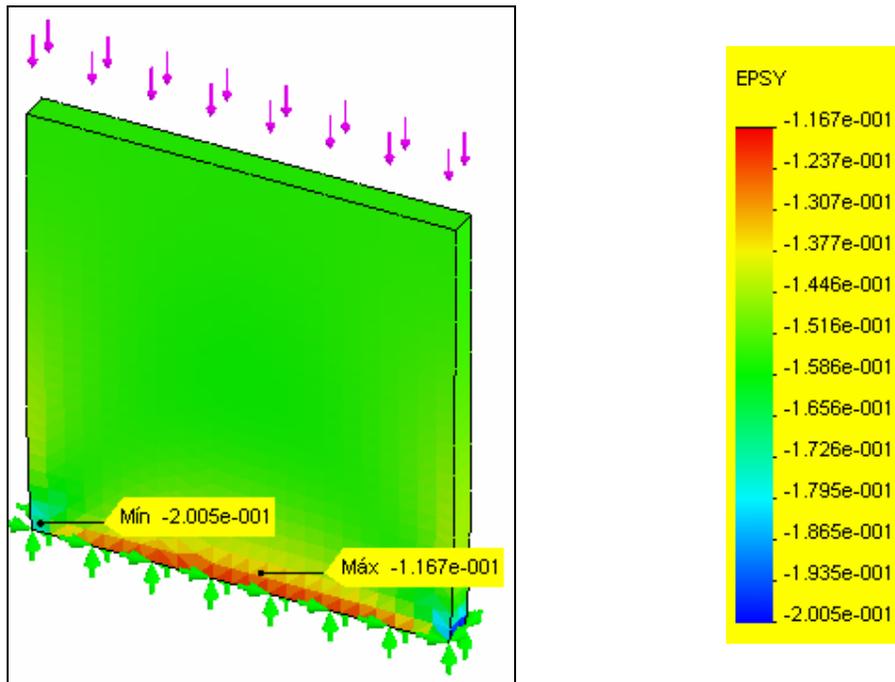
4.5.2.2. Desplazamiento

Figura 4.10: Desplazamiento para el ensayo de compresión



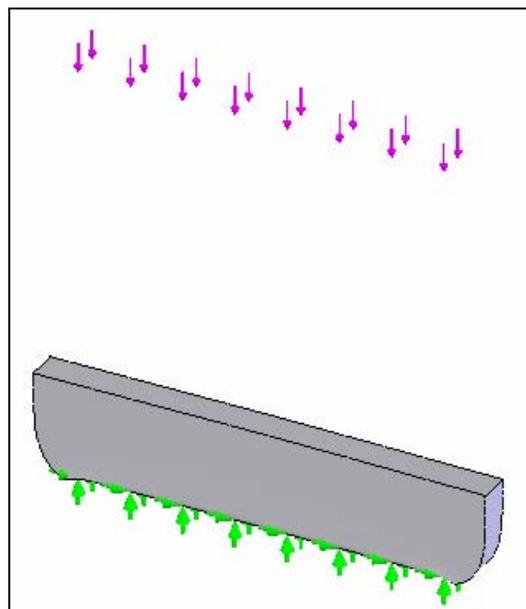
4.5.2.3. Tensión

Figura 4.11: Tensión para el ensayo de compresión



4.5.2.4. Deformación

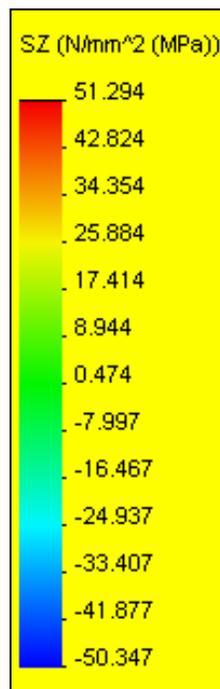
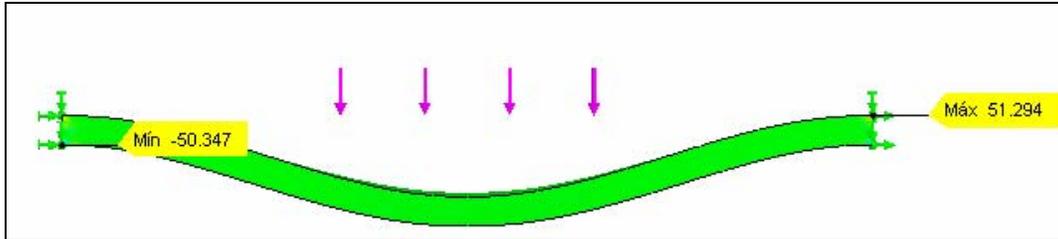
Figura 4.12: Deformación para el ensayo de compresión



4.5.3. ENSAYO DE FLEXIÓN

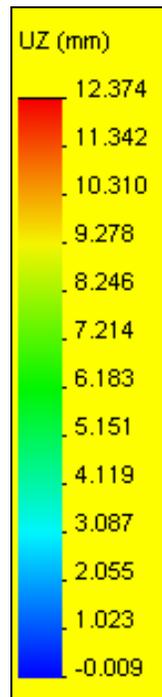
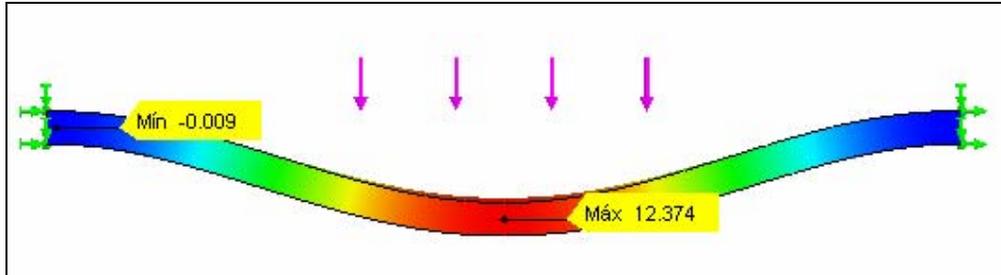
4.5.3.1. Esfuerzos

Figura 4.13: Esfuerzos para el ensayo de flexión



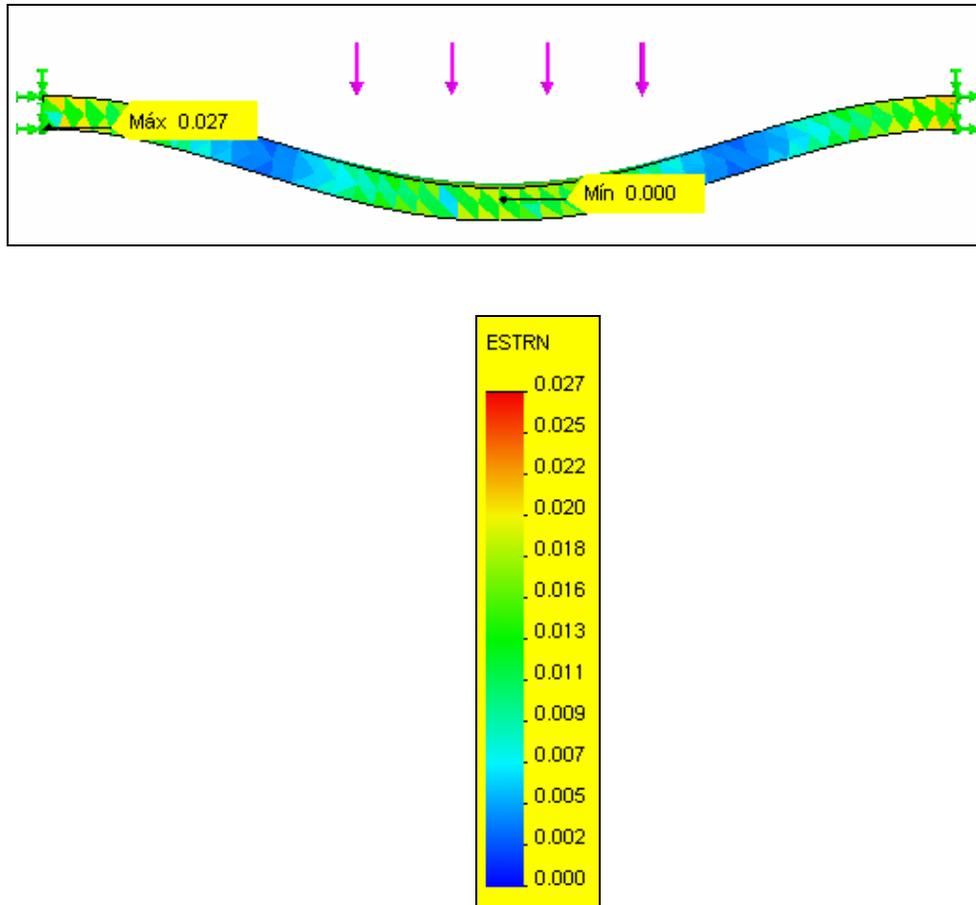
4.5.3.2. Desplazamiento

Figura 4.14: Desplazamiento para el ensayo de flexión



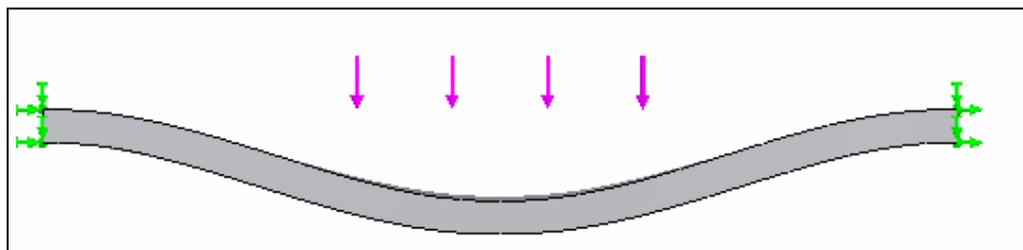
4.5.3.3. Tensión

Figura 4.15: Tensión para el ensayo de flexión



4.5.3.4. Deformación

Figura 4.16: Deformación para el ensayo de flexión



CAPÍTULO 5

5. CONSTRUCCIÓN DE PIEZAS ESTRUCTURALES

5.1. MATERIALES

5.1.1. FIBRA DE VIDRIO

5.1.1.1. Nombre comercial: Fibra de Vidrio Nacional Tipo Malla

5.1.1.2. Características Técnicas

- Ancho: 1.4 m = 55.12”
- Espesor: 1mm = 0.039”
- La fibra de vidrio al igual que otros materiales utilizados en la fabricación de las probetas como resina, acelerador, catalizador, desmoldante y tinte se adquirió en “Pintulac”.

Figura 5.1: Fibra de Vidrio Nacional tipo Malla



Fuente: Propia

5.1.2. RESINA POLIÉSTER

5.1.2.1. Nombre comercial: # 83 Polyester Laminating Resin (Resina Poliéster para lámina)

5.1.2.2. Características

- Resina Poliéster # 83 sirve para laminar pieles de fibra de vidrio delgadas.
- Se utilizo mucho para reparaciones de fibra de vidrio con propósitos generales.
- Este sistema se utiliza para maximizar las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de vidrio.
- Su baja viscosidad y su gran característica de maniobrabilidad la hacen favorita en el mercado.

- La resina poliéster tiene un tiempo de caducidad de seis meses, luego de este tiempo ya no debe utilizarse.

Figura 5.2: Resina Poliéster



Fuente: Propia

Es importante aclarar que la resina poliéster se la puede conseguir con o sin marca, los fiberos normalmente trabajan con resina poliéster sin marca.

Figura 5.3: Resina Poliéster # 83



Fuente: www.fiberglast.com

5.1.3. PERÓXIDO DE METIL-ETIL-CETONA MEKP (CATALIZADOR)

5.1.3.1. Nombre comercial: # 69 MEKP

5.1.3.2. Características:

- El MEKP es el catalizador para el endurecimiento que se lo utiliza en resinas poliéster,
- Es una sustancia altamente reactiva e inflamable.
- Se aconseja el 2% en promedio de volumen respecto a la resina poliéster.

Figura 5.4: Peróxido de metil-etil-cetona MEKP



Fuente: Propia

5.1.4. OCTOATO DE COBALTO (ACELERANTE)

5.1.4.1. Nombre comercial: Cobalto o Azul de Cobalto

5.1.4.2. Características:

- El octoato de cobalto o acelerante se utiliza para acortar el tiempo de secado de la resina de poliéster. Normalmente, y a menos que indique lo contrario el cliente, nuestra resina ya va preacelerada. Es importante saber que **jamás** se debe mezclar el acelerante con el catalizador sin haber mezclado el primero con la resina, ya que se produciría una reacción explosiva.
- El cobalto es lo que preacelera o provoca el tiempo de “gelado” en la resina, esto quiere decir que es lo que causa que la resina se ponga más viscosa o gelatinosa y a mayor cantidad de cobalto en la proporción de la resina, mas gelatinosa y espesa será y catalizará más rápido también.

Figura 5.5: Azul de Cobalto



Fuente: Propia

5.1.5. ALCOHOL POLIVINÍLICO (DESMOLDANTE)

5.1.5.1. Nombre comercial: Alcohol Polivinílico o desmoldante para fibra

5.1.5.2. Características:

- Este desmoldante crea una película separadora para evitar que entre el molde y la probeta exista algún tipo de adherencia.

5.1.6. TINTES

5.1.6.1. Nombre comercial: Tintes para fibra de vidrio.

5.1.6.2. Características:

- Existe una gran gama de colores para adicionar a la fibra de vidrio.
- El cambiar el color original de la fibra de vidrio no se modifican las propiedades físicas y químicas de la probeta.
- Se utilizó para la fabricación de las probetas un color negro por motivos de apreciación en la rotura de las probetas en los ensayos.

5.2. MOLDES

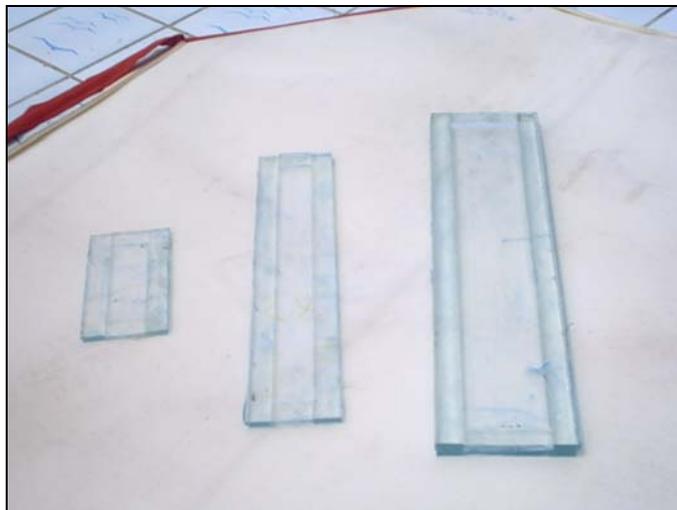
Para la construcción de las probetas se decidió utilizar vidrio como material para el molde, ya que en este caso las probetas son de forma prismática rectangular, por este motivo se corto pedazos de vidrio de acuerdo a las medidas de las probetas y se unieron mediante silicona. Esto nos permitió una fácil y rápida fabricación, ahorrando de esta forma tiempo y dinero.

El proceso comienza eligiendo el espesor del vidrio en función del espesor de la probeta para asegurar un espesor final requerido por la norma.

En el caso de utilizar un molde de madera se debe tener en cuenta algunas consideraciones como:

- Debe ser blanda con objeto de trabajar cómodamente.
- Debe ser regular en su constitución, exenta de nudos que originarían procesos prolongados de endurecido y pulido.
- Y cualquiera que sea el tipo de madera que se utilice, debe estar muy seca y tener mínima absorción de humedad.

Figura 5.6: Fotografías de los moldes



Fuente: Propia

5.2.1. PREPARACIÓN

Una vez que la silicona esté totalmente seca y todas las partes del molde estén completamente unidas se procede a colocar el desmoldante.

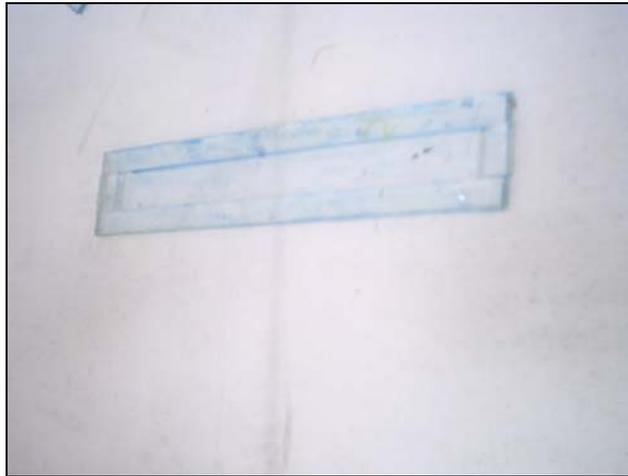
Para moldes de madera es necesario aplicar antes del desmoldante un sellante o barniz, con el objeto de dejar la superficie de la madera lo más lisa posible.

5.2.1.1. Aplicación de el Alcohol Polivinílico (Desmoldante)

El siguiente paso consiste en aplicar sobre la superficie del molde en el lugar donde va la probeta el Alcohol Polivinílico con ayuda de una brocha.

Dentro de diez a quince minutos el alcohol polivinílico se habrá secado formando una película que a la postre nos va a servir de separador.

Figura 5.7: Fotografía del molde con el desmoldante



Fuente: Propia

5.3. EQUIPOS

- Lámpara de secado

5.3.1. HERRAMIENTAS

- Mesa de trabajo
- Brochas
- Cuchillas
- Tijeras
- Mascarilla
- Guantes
- Reglas de ingeniero
- Pie de rey
- Lentes de seguridad
- Recipientes para preparación
- Jeringas graduadas

5.4. PROCESO DE FABRICACIÓN

El método de manufactura que se seleccionó para la construcción de las probetas, es la técnica de moldeo por contacto a mano, ya que se ajusta a las condiciones locales y tradicionales de tecnología, manipulación y operación de materiales, lo cuál permite optimizar tiempo y dinero.

Una vez que se preparo el molde como se explicó en el apartado anterior, el siguiente paso consiste en realizar el laminado o conformado de capas de fibra de vidrio nacional y resina poliéster sobre el molde.

5.4.1. PROCEDIMIENTO

Una vez que se tienen todos los materiales, herramientas y moldes preparados, y dispuestos correctamente sobre la mesa de trabajo, además de los accesorios de seguridad personal como guantes y gafas, se procede a seguir el siguiente método operativo, el cuál consta de las siguientes fases:

5.4.1.1. Trazado y corte de la fibra de vidrio

Esta primera fase consiste en cortar pedazos de fibra de vidrio que sean un 10% mayor en cada medida que tiene la probeta.

Comercialmente la fibra de vidrio viene en rollos de las siguientes dimensiones:

Rollo de 59 Kg

$$a_f = 1.4 \text{ m} = 55.12''$$

$$e_f = 1 \text{ mm} = 0.039''$$

Donde:

a_f = ancho del rollo

e_f = espesor del rollo

Se lo puede conseguir según los metros de largo que el cliente necesite.

Por lo tanto por metro de longitud tenemos la siguiente área de fibra de vidrio:

$$\begin{aligned} \text{(Ec. 5.1)} \quad A_f &= a_f * l_f \\ A_f &= 1.4 \text{ m} * 1 \text{ m} = 1.4 \text{ m}^2 = 1.4 \times 10^6 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Donde:

l_f = longitud de fibra de vidrio por metro

A_f = área de fibra de vidrio por metro

Sabiendo esto se puede calcular el área que se va a utilizar en la fabricación de las probetas:

Para probetas de compresión las medidas son:

$$l_{pc} = 24\text{mm}$$

$$a_{pc} = 21\text{mm}$$

$$e_{pc} = 1.5\text{mm}$$

$$\begin{aligned} \text{(Ec. 5.2)} \quad A_{pc} &= a_{pc} * l_{pc} \\ A_{pc} &= 24\text{mm} * 21\text{mm} = 504\text{mm}^2 \end{aligned}$$

Donde:

l_{pc} = longitud de la probeta de compresión

a_{pc} = ancho de la probeta de compresión

e_{pc} = espesor de la probeta de compresión

A_{pc} = Área de la probeta a compresión de una capa

Para el número de áreas o capas se divide el espesor de la probeta de compresión (e_{pc}) para el espesor de la fibra de vidrio (e_f).

$$\begin{aligned} \text{(Ec. 5.3)} \quad N_{pc} &= \frac{e_{pc}}{e_f} \\ N_{pc} &= \frac{1.5}{1} = 1.5 = 2 \end{aligned}$$

Donde:

N_{pc} = Número de capas de fibra de vidrio para compresión

Por último se necesita el área total de fibra para las cuatro probetas a compresión.

$$\begin{aligned} \text{(Ec. 5.4)} \quad A_{t_c} &= 4 * (A_{pc} * N_{pc}) \\ A_{t_c} &= 4 * (504\text{mm}^2 * 2) = 4032\text{mm}^2 \end{aligned}$$

Donde:

A_{t_c} = Área total de fibra de vidrio a compresión de todas las capas y de todas las probetas.

Para probetas de tracción las medidas son:

$$l_{pt} = 250\text{mm}$$

$$a_{pt} = 25\text{mm}$$

$$e_{pt} = 2.5\text{mm}$$

$$(Ec. 5.5) \quad A_{pt} = a_{pt} * l_{pt}$$

$$A_{pt} = 25mm * 250mm = 6250mm^2$$

Donde:

l_{pt} = longitud de la probeta de tracción

a_{pt} = ancho de la probeta de tracción

e_{pt} = espesor de la probeta de tracción

Para el número de áreas o capas se divide el espesor de la probeta de tracción (e_{pt}) para el espesor de la fibra de vidrio (e_f).

$$(Ec. 5.6) \quad N_{pt} = \frac{e_{pt}}{e_f}$$

$$N_{pt} = \frac{2.5}{1} = 2.5 = 3$$

Donde:

N_{pt} = Número de capas de fibra de vidrio para tracción

Por último se necesita el área total de fibra para las cuatro probetas a tracción.

$$(Ec. 5.7) \quad A_{t-t} = 4 * (A_{pt} * N_{pt})$$

$$A_{t-t} = 4 * (6250mm^2 * 3) = 75000mm^2$$

Donde:

A_{t-c} = Área total de fibra de vidrio a tracción de todas las capas y de todas las probetas.

Para probetas de flexión las medidas son:

$l_{pf} = 320mm$

$a_{pf} = 49mm$

$e_{pf} = 5.2mm$

$$(Ec. 5.8) \quad A_{pf} = a_{pf} * l_{pf}$$

$$A_{pf} = 49mm * 320mm = 15680mm^2$$

Donde:

l_{pf} = longitud de la probeta de flexión

a_{pf} = ancho de la probeta de flexión

e_{pf} = espesor de la probeta de flexión

Para el número de áreas o capas se divide el espesor de la probeta de flexión (e_{pf}) para el espesor de la fibra de vidrio (e_f).

$$(Ec. 5.9) \quad N_{pf} = \frac{e_{pf}}{e_f}$$

$$N_{pf} = \frac{5.2}{1} = 5.2 = 5$$

Donde:

N_{pf} = Número de capas de fibra de vidrio para flexión

Por último se necesita el área total de fibra para las tres probetas a flexión.

$$(Ec. 5.10) \quad A_{t_f} = 3 * (A_{pf} * N_{pf})$$

$$A_{t_f} = 3 * (15680mm^2 * 5) = 235200mm^2$$

Donde:

A_{t_f} = Área total de fibra de vidrio a flexión de todas las capas y de todas las probetas.

Para el elemento estructural las medidas son:

$l_e = 320mm$

$a_e = 49mm$

$e_e = 5mm$

$$(Ec. 5.11) \quad A_e = a_e * l_e$$

$$A_e = 49mm * 320mm = 15680mm^2$$

Donde:

l_e = longitud de el elemento estructural

a_e = ancho de el elemento estructural

e_e = espesor de el elemento estructural

Para el número de áreas o capas se divide el espesor del elemento estructural (e_e) para el espesor de la fibra de vidrio (e_f).

$$(Ec. 5.12) \quad N_e = \frac{e_e}{e_f}$$

$$N_e = \frac{5}{1} = 5$$

Donde:

N_e = Número de capas de fibra de vidrio para el elemento estructural

Por último se necesita el área total de fibra para el elemento estructural.

$$(Ec. 5.13) \quad A_{t_e} = A_e * N_e$$

$$A_{t_e} = 15680mm^2 * 5 = 78400mm^2$$

Donde:

A_{t_e} = Área total de fibra de vidrio para el elemento estructural para de todas las capas.

Sumando todas las áreas totales tenemos un área total final de fibra de vidrio de:

$$\begin{aligned} \text{(Ec. 5.14)} \quad A_T &= A_{r_c} + A_{r_t} + A_{r_f} + A_{t_e} \\ A_T &= 392632 \text{mm}^2 \end{aligned}$$

Por lo que se necesita 1 metro de fibra de vidrio.

Figura 5.8: Corte de fibra de vidrio para la probetas



Fuente: Propia

5.4.1.2. Conformado de las capas

Esta fase consiste en colocar sobre el molde las capas trazadas y cortadas con las dimensiones establecidas, esta es una pre-etapa antes del proceso de laminado.

5.4.1.3. Laminado

Para comenzar con esta fase, lo primero que se debe hacer es preparar la resina poliéster, por lo tanto se necesita conocer el volumen de ésta, que representa un 60% del volumen total de la probeta para procesos de laminado y conformado de capas.

El fabricante dice que por cada capa, un metro de fibra de vidrio es capaz de empapar 600 gramos de resina de poliéster.

A este valor de masa de resina le añadiremos un excedente de 400 gramos por efecto de que siempre existe un volumen de resina que al final se endurece y no se ocupa. Con un volumen de 1Kg (1Lt) de resina poliéster, (no en grandes cantidades, pues puede tardar la aplicación con lo que se catalizará la misma antes de terminar).

La segunda fase es añadir el Mekp (catalizador), el volumen que vamos a mezclar de mekp es de 12ml (1.2% del Volumen total de resina poliéster), con ayuda de una jeringa graduada, este proceso de mezcla debe ser corto de aproximadamente dos minutos.

La tercera fase es añadir el Cobalto (acelerante), el volumen de éste es de 2ml (0.2% del Volumen total de resina poliéster), así mismo con ayuda de una jeringa graduada, es muy importante realizar la mezcla en muy corto tiempo, ya que el cobalto con el mekp tienen una reacción violenta y se empieza a calentar la resina.

La cuarta fase es colocar la fibra sobre el molde y empapar de resina con una brocha limpia, y seguir añadiendo las capas requeridas para cada probeta.

Asegurarse que no exista presencia de burbujas e inclusiones de aire.

5.4.1.4. Curado

Una vez que ha concluido el proceso de laminado, el siguiente paso es colocar una lámpara de secado por diez minutos esto ayudará a un mejor secado posterior.

Tabla 5.1 Tiempo de trabajo y secado de diferentes materiales.

	RESINA POLIESTER	RESINA EPOXI	SILICONA MOLDES	ESPUMA POLIURET.
Tiempo Trabajo	15 min.	2 horas	4-6 horas	Instantáneo
Secado Total	2 horas	24-36 horas	24 horas	2-3 minutos

Fuente: GLASPOL COMPOSITE

Luego se deja secar a temperatura ambiente: aproximadamente a uno 20°C la probeta. Se debe anotar que las materias primas utilizadas para el laminado de las capas son adecuadas para secar y desmoldar la probeta en un tiempo corto, pero es recomendable dejar solidificar bien la pieza para asegurarse que las capas estén unidas perfectamente, por esta razón se dejó por 24 horas curar el elemento antes de proceder a su desmolde.

5.4.1.5. Mecanizado

Esta fase empieza por un pre-control de calidad, con lo cual se observan algunos defectos provocadas en las anteriores etapas en las cuales no se pueden corregir.

El mecanizado de las probetas se lo efectúa con la ayuda de cuchillas bien afiladas, para cortar los bordes sobrantes en todos los lados del molde. El mecanizado se realiza antes de proceder al desmolde.

5.4.1.6. Desmolde

En esta etapa la técnica de moldeo por contacto a mano, consiste en desmontar la probeta laminada, curada y mecanizada del molde.

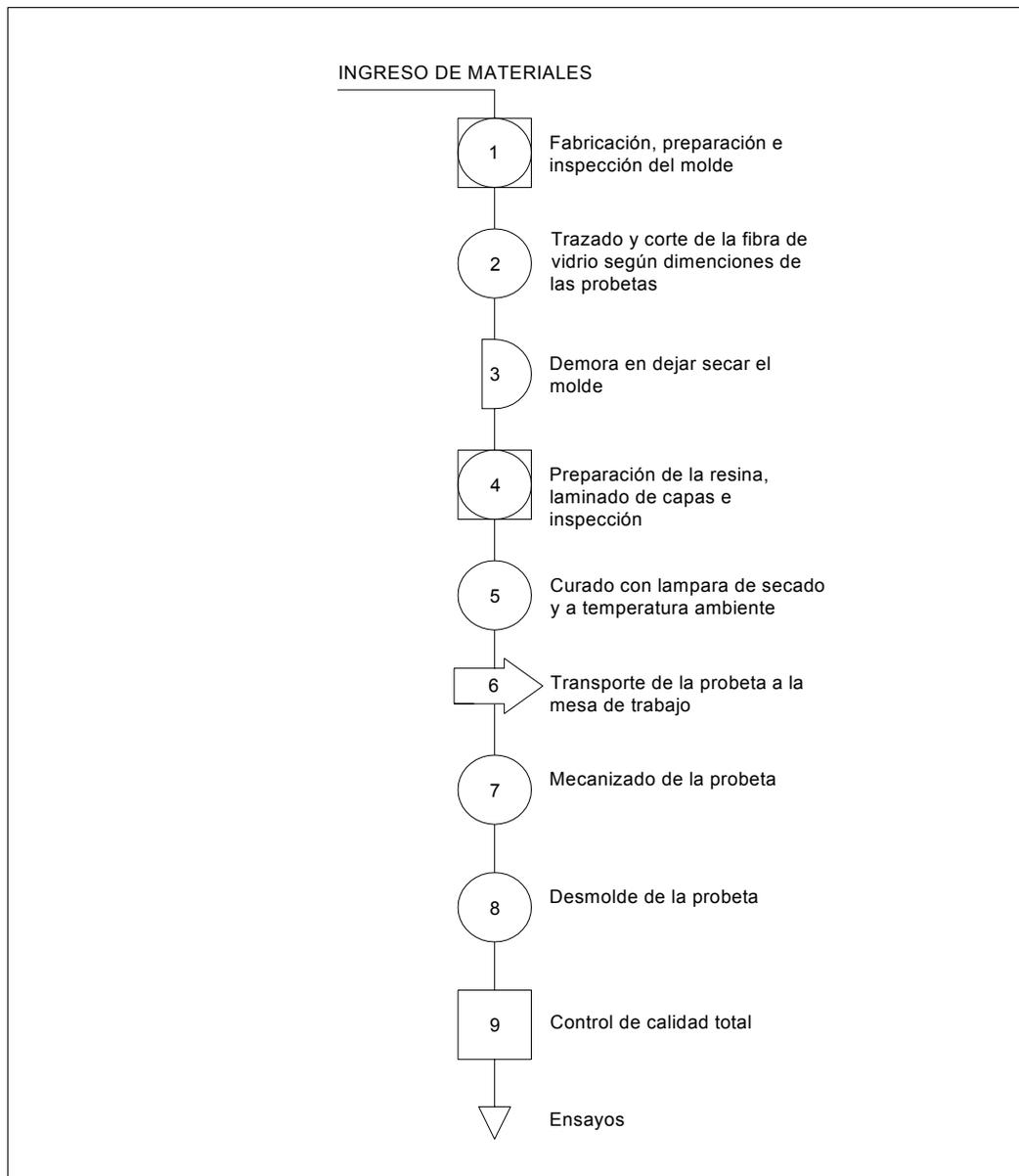
Para esta operación se debe tener cuidado en no dañar al elemento y al molde, para lo cuál se debe golpear suavemente en los extremos de todas las superficies del elemento con un martillo de goma y cuñas.

5.4.1.7. Control de Calidad

El control de calidad constituye la última etapa de todo el proceso de fabricación. Esta fase consiste en observar detenidamente la probeta fabricada, a fin de encontrar las posibles fallas que existen. En caso de encontrarlas, se debe volver a la etapa de mecanizado para solucionar los problemas existentes.

Si la probeta aprueba el control de calidad se procede a realizar sobre ella los ensayos establecidos.

5.5. DIAGRAMA DE PROCESOS



CAPÍTULO 6

6. ENSAYOS MECÁNICOS

6.1 CARGAS

6.1.1 CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES AMSLER

Para tomar todo tipo de datos por medio de equipos es necesario calibrarlos antes del ensayo para tener la certeza de que los datos proporcionados por un equipo o máquina son verdaderos y evitar cualquier tipo de error. Es por esto que se procedió a calibrar la máquina de ensayos universales de marca AMSLER mediante una celda de carga conectada a un medidor electrónico de desplazamiento.

Figura 6.1: Celda de carga CDC 20000



Figura 6.2: DIGITALER DEHNUNGSMESSER

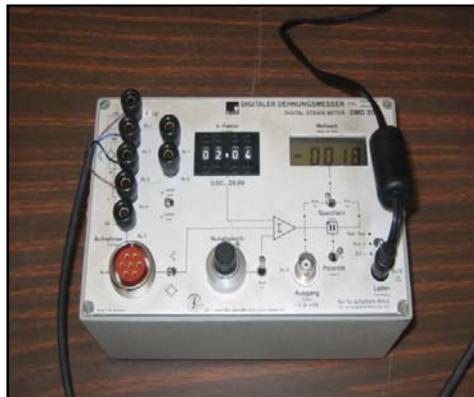


Tabla 6.1 Carta de calibración de la Máquina AMSLER.

CARGA	DEFORMACIÓN UNITARIA	PRUEBA	ERROR
Kgf	E*10 ⁻⁶	E*10-6	%
0	0	0	0
100	3	3	0
200	6	6	0
300	9	9	0
400	12	12	0
500	15	15	0
600	18	18	0
700	21	21	0
800	24	24	0
900	27	27	0
1000	30	30	0
1100	33	33	0
1200	37	36	2,7
1300	40	39	2,5
1400	43	43	0
1500	46	46	0
1600	49	49	0
1700	52	52	0
1800	55	55	0
1900	59	58	1,7
2000	62	61	1,6
2100	65	65	0
2200	68	68	0
2300	71	71	0
2400	74	74	0
2500	77	77	0
2600	80	80	0
2700	83	83	0
2800	86	86	0
2900	89	89	0
3000	93	92	1,1

Fuente: Tesis de los Ingenieros Caicedo - Acosta

6.2 ENSAYO DE TRACCIÓN

Para la realización de este ensayo se rigió en la norma ASTM D3039 (Método de la prueba normal para las propiedades tensores de matriz del polímero de materiales compuestos), la cuál indicó la geometría de la probeta a ensayar como ya se mencionó en el capítulo cuatro.

Para este ensayo se utilizó un número de cuatro probetas según la norma.

Para obtener el esfuerzo último de tracción real de la fibra de vidrio nacional, se procede a realizar un ensayo de tracción en la máquina de ensayos universales AMSLER, con una probeta de medidas especificadas según la norma ASTM D 3039.

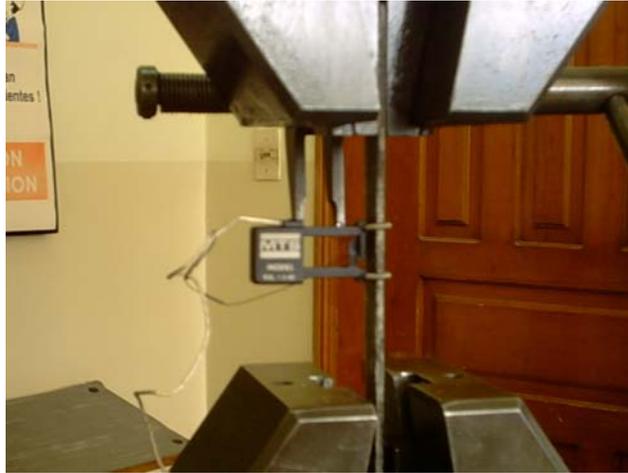
Figura 6.3 Máquina de ensayos universales AMSLER RM29



Con las probetas construidas se procedió a realizar el ensayo colocándolas en las mordazas de la máquina de ensayos universales AMSLER RM29.

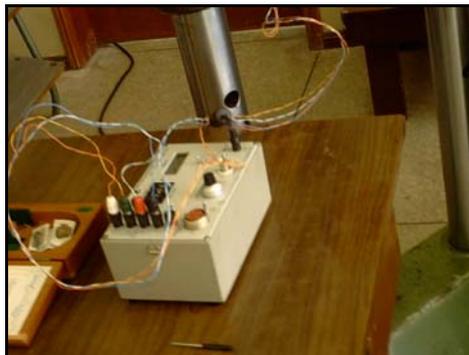
Es importante señalar que la longitud de contacto entre la probeta y las mordazas fue de 30mm. En la zona de tracción se colocó un extensómetro para medir las deformaciones unitarias en el sentido longitudinal de las fibras como podemos apreciar en la figura 6.4.

Figura 6.4 Extensómetro sobre la zona de tracción



Hay que recalcar que antes de empezar con el ensayo se encendió el medidor de deformaciones Digitaler Dehnungsmesser.

Figura 6.5 Medidor de deformaciones



Los resultados obtenidos por la máquina de ensayos universales AMSLER, se los puede visualizar en la figura 6.6.

Figura 6.6 Fuerza vs. Desplazamiento

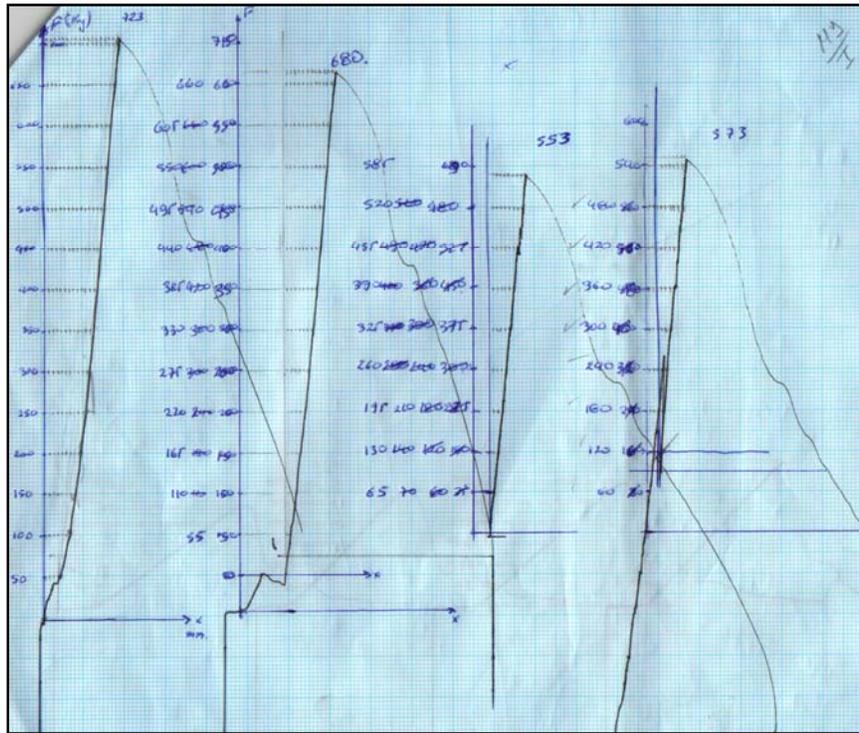
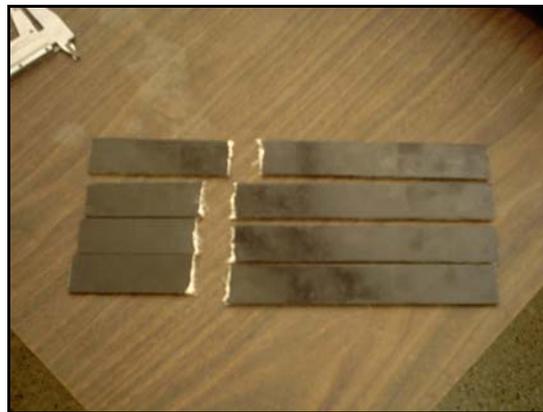


Figura 6.7 Probetas posterior al ensayo



6.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN

Para la realización de este ensayo se rigió en la norma ASTM D3410 (El Método de la Prueba normal para las Propiedades de Compresión de Compuesto de Matriz de Polímero), la cuál indicó la geometría de la probeta a ensayar como ya se mencionó en el capítulo cuatro.

Es necesario aclarar que el área de la sección transversal no fue constante en todas las probetas, esto se debe a que por operación propia de la maquina solo se tomo el área de compresión, la cual se la obtuvo mediante un proceso de corte de la pieza original.

Para este ensayo se utilizó un número de cuatro probetas según la norma.

Figura 6.8 Alineamiento de la probeta sobre la Máquina

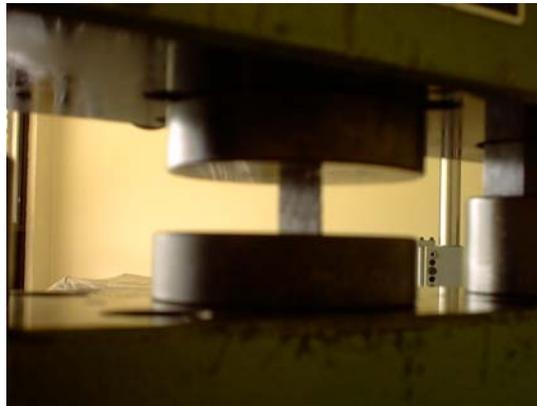


Figura 6.9 Fuerza vs. Desplazamiento

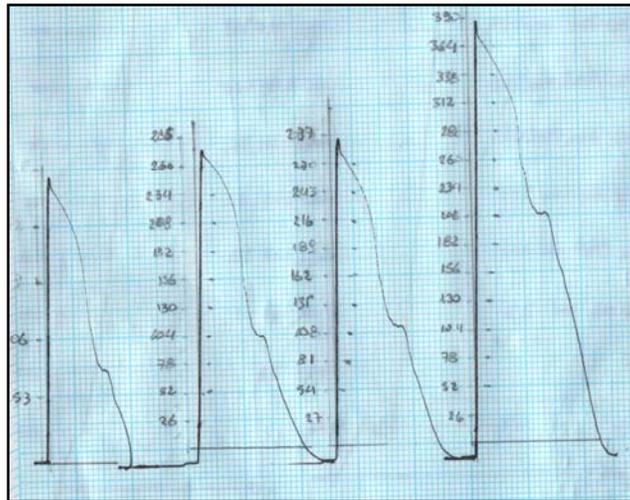
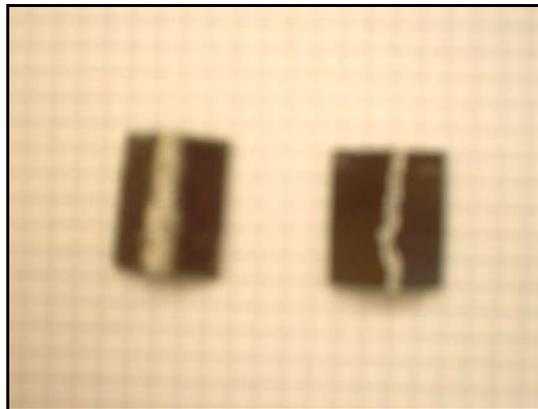


Figura 6.10 Probetas posterior al ensayo



6.4 ENSAYO DE FLEXIÓN

Para la realización de este ensayo se rigió en la norma ASTM D790 (Métodos de Pruebas normales para las Propiedades de Flexión en materiales compuestos), la cuál indicó la geometría de la probeta a ensayar como ya se mencionó en el capítulo cuatro.

Para este ensayo se utilizó un número de tres probetas según la norma.

Figura 6.11 Medición de distancia entre apoyos



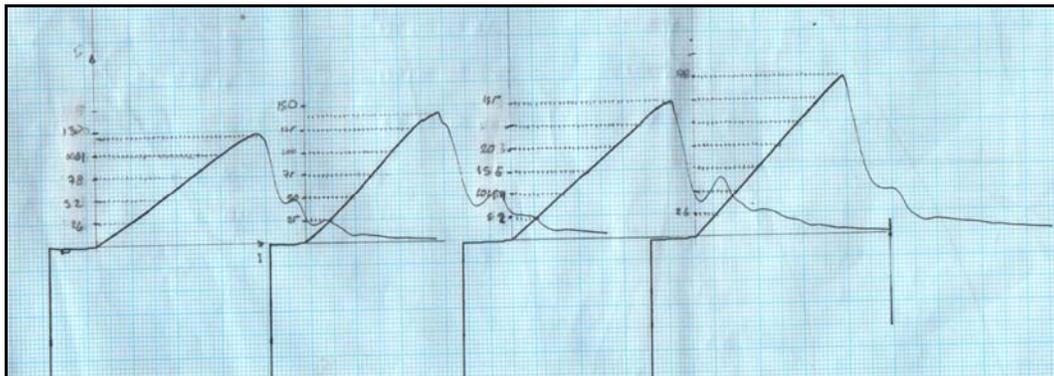
Figura 6.12 Aplicación de carga a la probeta



Figura 6.13 Fractura de la probeta



Figura 6.14 Fuerza vs. Desplazamiento



6.5 ENSAYO DE FATIGA

El ensayo de fatiga debería ser realizado con la probeta de Moor, pero debido a que la maquina existente en el laboratorio de resistencia de materiales únicamente permite utilizar materiales dúctiles como es el caso del acero.

La fibra de vidrio se comporta como material frágil, por lo cual al momento de ensamblar la probeta a los mandriles de la maquina, esta se fracturo, debido a que el peso de los mandriles es demasiado alto, por lo cual la probeta de fibra de vidrio no pudo soportar.

En vista de que esta maquina es la única existente en el Ecuador, no se logro realizar dicho ensayo.

6.6 ENSAYO SOBRE PIEZA ESTRUCTURAL

Debido a limitaciones propias del laboratorio de resistencia de materiales, se tomo la decisión de tomar una probeta prismática, la cual tiene la misma configuración que las probetas utilizadas en el ensayo de flexión.

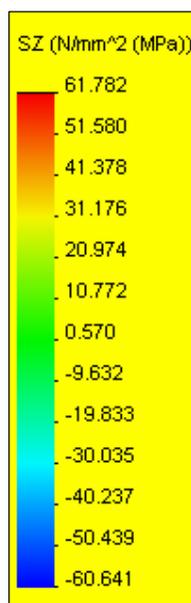
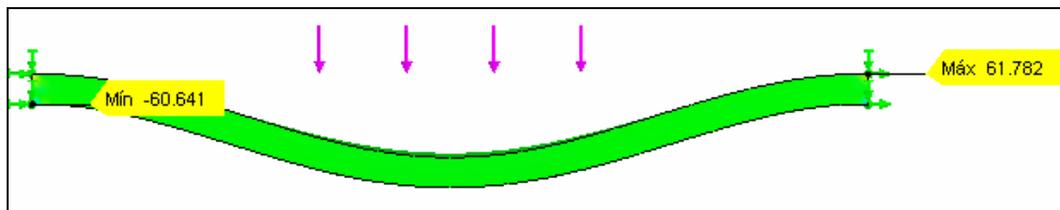
A continuación procedemos a realizar es respectivo análisis de resultados.

6.6.1 RESULTADOS EN COSMOS WORKS

Es importante aclarar que cosmos Works es un software que utiliza elementos finitos para realizar análisis estáticos, además este programa no permite realizar un análisis de elementos simplemente apoyados, por lo cual se tomo la decisión de utilizar la función de empotramiento.

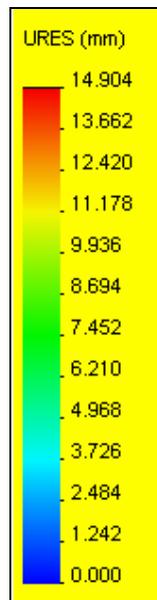
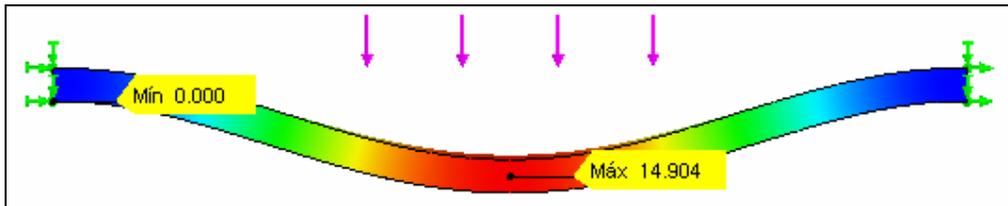
6.6.1.1 Esfuerzos

Figura 6.15 Esfuerzos para pieza estructural



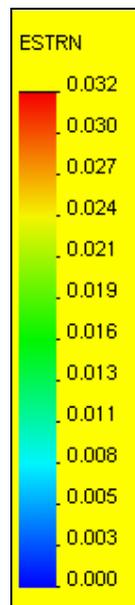
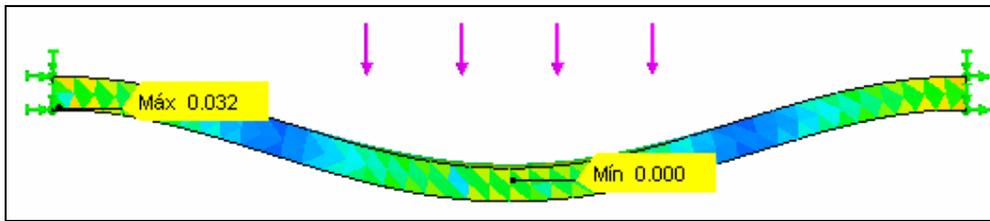
6.6.1.2 Desplazamiento

Figura 6.16 Desplazamiento para pieza estructural



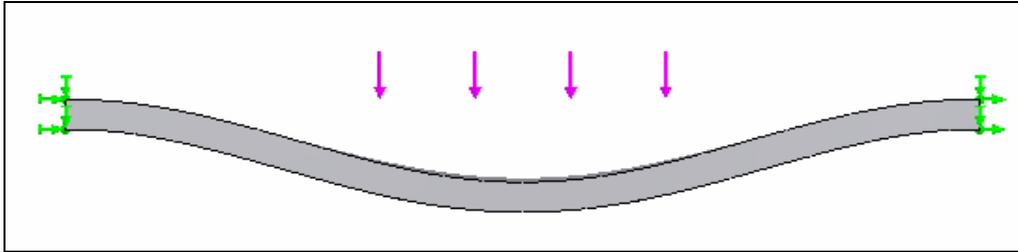
6.6.1.3 Tensión

Figura 6.17 Tensión para pieza estructural



6.6.1.4 Deformación

Figura 6.18 Deformación para pieza estructural



6.6.1.5 Análisis de resultados

Tabla 6.2 Análisis de resultados para la pieza estructural.

Fuerza	Cabezal	Fuerza real	Fuerza Mpa	M	I	Esfuerzo	Esfuerzo Teor	Error %
335	172	81,5	798,7	57506,4	574,149	260,4142	61,782	321,505

Tabla 6.3 Factores de corrección pieza estructural

Factor de corrección	
Esfuerzo Teórico	61,782
Esfuerzo Practico	260,4142
K	0,237245127

Como podemos observar, tenemos un error porcentual de 321.505, el cual se debe principalmente a que el cosmos no nos permite realizar un análisis real con elementos simplemente apoyados.

Por este motivo fue necesario obtener el factor de corrección para diseño.

6.7 ANALISIS DE RESULTADOS

6.7.1 ENSAYO DE TRACCION.

Tabla 6.4 Análisis de resultados para la primera probeta.

Fuerza	Fuerza N	Desplaz mm	e1	e2	Esf	Esf teor	% Error	K
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	490	2,5	2,5	0,01	7,84	8,196	4,3435822	1,045
100	980	6	2,5	0,01	15,68	16,391	4,3377463	1,045
150	1470	7,5	4	0,016	23,52	24,587	4,3396917	1,045
200	1960	9	5,5	0,022	31,36	32,783	4,3406644	1,045
250	2450	9,5	6	0,024	39,2	40,978	4,3389136	1,045
300	2940	10,75	7,25	0,029	47,04	49,174	4,3396917	1,045
350	3430	11,75	8,25	0,033	54,88	57,37	4,3402475	1,045
400	3920	12,5	9	0,036	62,72	65,566	4,3406644	1,045
450	4410	13,5	10	0,04	70,56	73,761	4,3396917	1,045
500	4900	14,5	11	0,044	78,4	81,957	4,3400808	1,045
550	5390	15,5	12	0,048	86,24	90,153	4,3403991	1,045
600	5880	16,25	12,8	0,051	94,08	98,348	4,3396917	1,045
650	6370	17,25	13,8	0,055	101,92	106,544	4,339991	1,045
700	6860	18	14,5	0,058	109,76	114,74	4,3402475	1,045
723	7085,4	18,5	15	0,06	113,3664	122,935	7,7834628	1,084

Figura 6.19 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la primera probeta

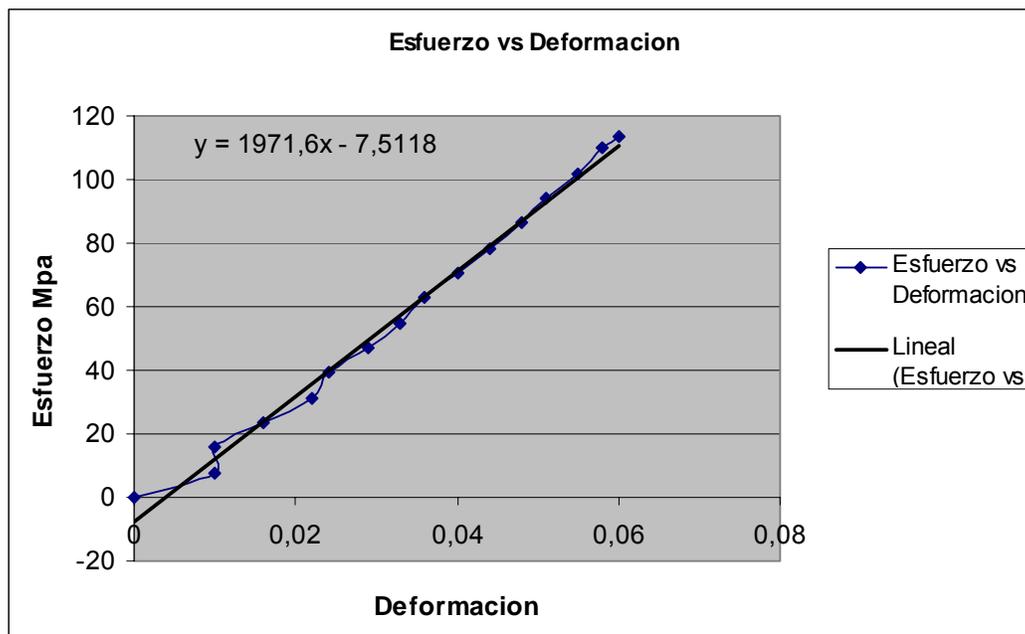


Tabla 6.5 Análisis de resultados para la segunda probeta.

Fuerza	Fuerza N	Desplazamiento mm	e1	e2	Esfuerzo	Esf Teor	% Error	k
0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	539	1	1	0,004	8,624	9,457	8,8082902	1,097
110	1078	3	1,5	0,006	17,248	18,913	8,8034685	1,097
165	1617	4	2,5	0,01	25,872	28,37	8,8050758	1,097
220	2156	5,25	3,75	0,015	34,496	37,826	8,8034685	1,097
275	2695	6	4,5	0,018	43,12	47,283	8,8044329	1,097
330	3234	7,25	5,75	0,023	51,744	56,739	8,8034685	1,097
385	3773	8,25	6,75	0,027	60,368	66,196	8,8041574	1,097
440	4312	9	7,5	0,03	68,992	75,653	8,804674	1,097
495	4851	9,5	8	0,032	77,616	85,109	8,8040043	1,097
550	5390	10,5	9	0,036	86,24	94,566	8,8044329	1,097
605	5929	11,5	10	0,04	94,864	104,022	8,8039069	1,097
660	6468	12,5	11	0,044	103,488	113,479	8,8042722	1,097
680	6664	13	11,5	0,046	106,624	122,935	13,267987	1,153

Figura 6.20 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la segunda probeta

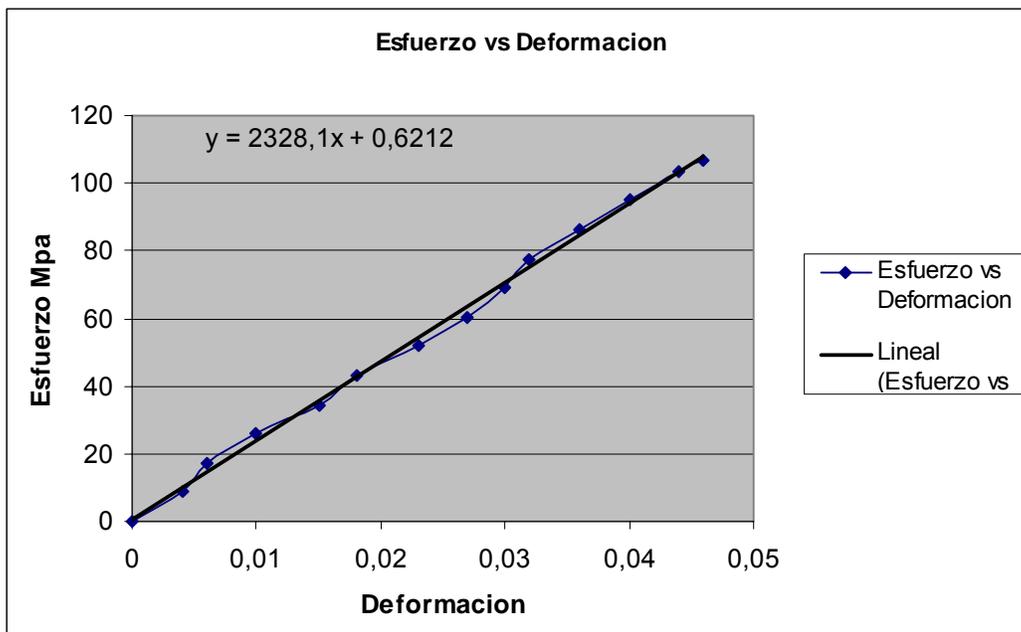


Tabla 6.6 Análisis de resultados para la tercera probeta.

Fuerza	Fuerza N	Desplazamiento mm	E1	e2	Esfuer	Esf Teor	% Error	k
0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	637	0,5	0,5	0,002	10,192	13,659	25,382532	1,34
130	1274	2,25	1	0,004	20,384	27,319	25,385263	1,34
195	1911	3,25	2	0,008	30,576	40,978	25,384353	1,34
260	2548	4,25	3	0,012	40,768	54,638	25,385263	1,34
325	3185	5,25	4	0,016	50,96	68,297	25,384717	1,34
390	3822	6	4,75	0,019	61,152	81,957	25,385263	1,34
455	4459	7,25	6	0,024	71,344	95,616	25,384873	1,34
520	5096	8,5	7,25	0,029	81,536	109,276	25,385263	1,34
553	5419,4	9	7,75	0,031	86,7104	122,935	29,466466	1,418

Figura 6.21 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la tercera probeta

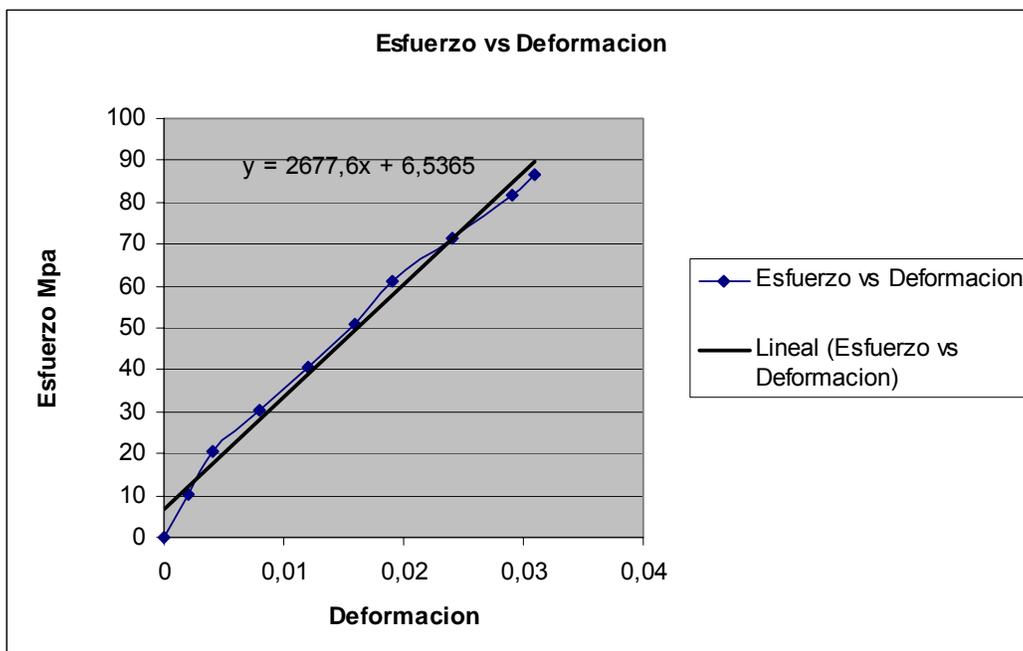


Tabla 6.7 Análisis de resultados para la cuarta probeta.

Fuerza	Fuerza N	Desp mm	e1	e2	Esfuerzo	Esf Teor	% Error	k
0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	588	1,5	1,5	0,006	9,408	12,294	23,474866	1,307
120	1176	2	1	0,004	18,816	24,587	23,471753	1,307
180	1764	2,5	1,5	0,006	28,224	36,881	23,472791	1,307
240	2352	2,5	1,5	0,006	37,632	49,174	23,471753	1,307
300	2940	3	2	0,008	47,04	61,468	23,472376	1,307
360	3528	4,25	3,25	0,013	56,448	73,761	23,471753	1,307
420	4116	5	4	0,016	65,856	86,055	23,472198	1,307
480	4704	6	5	0,02	75,264	98,348	23,471753	1,307
540	5292	6,5	5,5	0,022	84,672	110,642	23,472099	1,307
573	5615,4	7	6	0,024	89,8464	122,935	26,915524	1,368

Figura 6.22 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la cuarta probeta

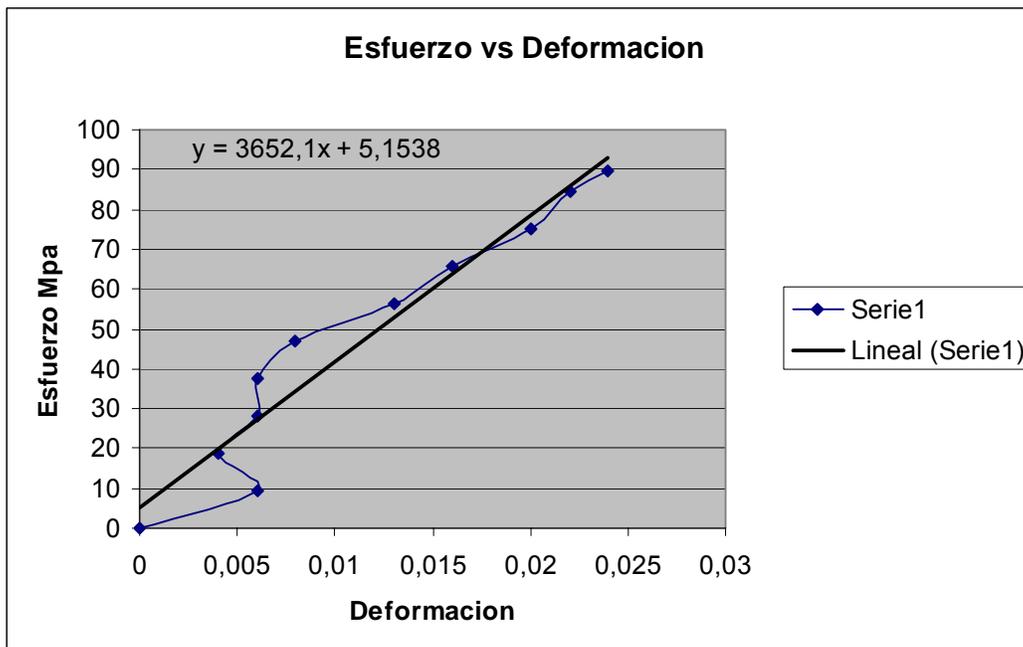


Tabla 6.8 Análisis de errores.

% error		
4,2840479		
8,4944028	Promedio	14,4
23,254399		
21,651533		

Tabla 6.9 Análisis entre Módulos de Elasticidad Real y Teórico.

Modulo de Elasticidad Real	Modulo de Elasticidad Teórico	% Error
1971600000	2,065E+11	99,04523
2328100000	2,065E+11	98,8725908
2677600000	2,065E+11	98,7033414
3652100000	2,065E+11	98,2314286

6.7.2 ENSAYO DE COMPRESION.

Tabla 6.10 Análisis de resultados para la primera probeta.

FUERZA	FUERZA N	Desp mm	e1	e2	Esf Mpa	Esf Teor	Esf Teor R	Error %	k
0	0	0	0	0	0	146,49	0	0	
53	519,4	-0,1	-0,1	-0,0046	14,861	134,6	11,886	25,031	0,7998
106	1038,8	-0,5	-0,6	-0,0276	29,722	122,72	23,772	25,031	0,7998
159	1558,2	-0,75	-	-0,0576	44,584	110,83	35,658	25,031	0,7998
212	2077,6	-1,1	-	-0,0853	59,445	98,945	47,544	25,031	0,7998
265	2597	-1,2	-2,3	-0,106	74,306	87,059	59,43	25,031	0,7998

Figura 6.23 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la primera probeta

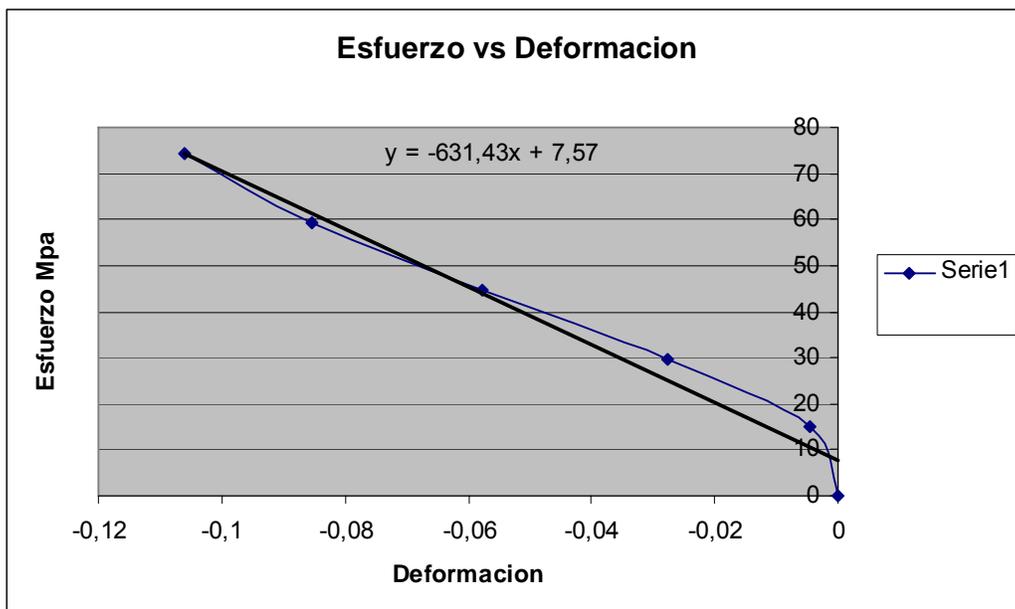


Tabla 6.11 Análisis de resultados para la segunda probeta.

FUERZA	FUERZA N	Desp mm	e1	e2	Esf Mpa	Esf Teor	Esf Teor R	Error %	k
0	0	0	0	0	0,000	146,49	0	0	
26	254,8	-0,1	-0,1	-0,0048	7,259	141,54	4,953	46,563	0,6823
52	509,6	-0,15	0,25	-0,0119	14,519	135,68	10,806	34,356	0,7443
78	764,4	-0,2	0,35	-0,0167	21,778	130,28	16,208	34,364	0,7442
104	1019,2	-0,5	-0,7	-0,0333	29,037	124,88	21,611	34,362	0,7443
130	1274	-0,75	1,25	-0,0595	36,296	119,48	27,014	34,361	0,7443
156	1528,8	-1	1,75	-0,0833	43,556	114,07	32,417	34,36	0,7443
182	1783,6	-1,1	-2,1	-0,1	50,815	108,67	37,819	34,363	0,7443
208	2038,4	-1,15	2,25	-0,1071	58,074	103,27	43,222	34,362	0,7443
234	2293,2	-1,2	2,35	-0,1119	65,333	97,864	48,625	34,362	0,7443
260	2548	-1,25	2,45	-0,1167	72,593	92,462	54,027	34,364	0,7442
283	2773,4	-1,5	2,75	-0,131	79,014	87,059	59,43	32,953	0,7521

Figura 6.24 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la segunda probeta

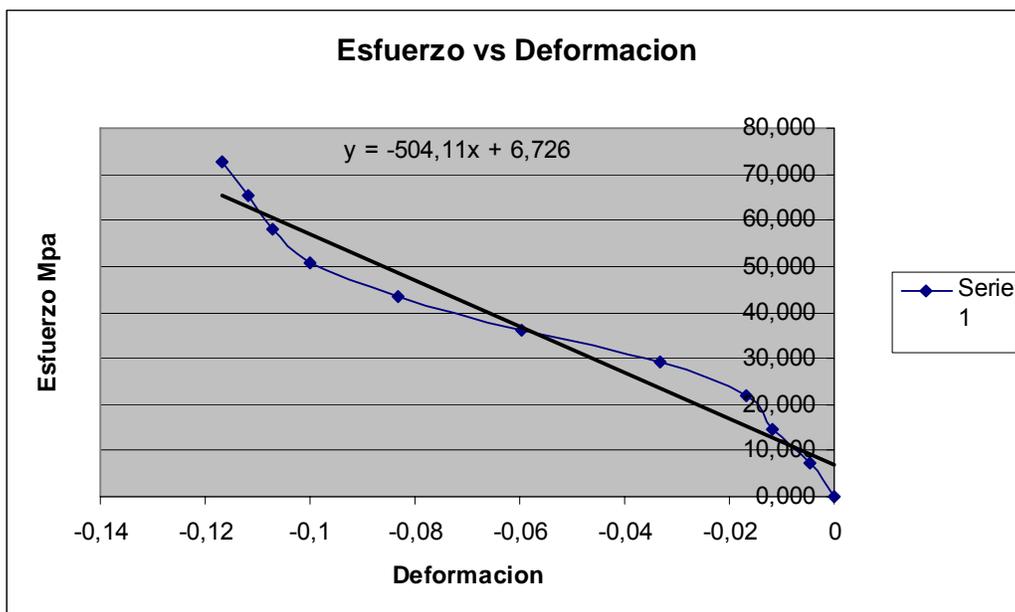


Tabla 6.12 Análisis de resultados para la tercera probeta.

FUERZA	FUERZA N	Desp mm	e1	e2	Esf Mpa	Esf Teor	Esf Teor R	Error %	K
0	0	0	0	0	0	146,49	0	0	
27	264,6	-0,1	-0,1	-0,0046	7,443	141,54	4,953	50,273	0,6655
54	529,2	-0,2	-0,3	-0,0139	14,886	135,68	10,806	37,758	0,7259
81	793,8	-0,6	-0,8	-0,0371	22,329	130,28	16,208	37,766	0,7259
108	1058,4	-0,75	-	-0,0626	29,772	124,88	21,611	37,764	0,7259
135	1323	-1	-	-0,0812	37,215	119,48	27,014	37,763	0,7259
162	1587,6	-1,1	-2,1	-0,0974	44,658	114,07	32,417	37,762	0,7259
189	1852,2	-1,2	-2,3	-0,1067	52,101	108,67	37,819	37,765	0,7259
216	2116,8	-1,25	-	-0,1137	59,544	103,27	43,222	37,764	0,7259
243	2381,4	-1,3	-	-0,1183	66,987	97,864	48,625	37,763	0,7259
270	2646	-1,4	-2,7	-0,1253	74,43	92,462	54,027	37,765	0,7259
290	2842	-1,5	-2,9	-0,1346	79,944	87,059	59,43	34,517	0,7434

Figura 6.25 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la tercera probeta

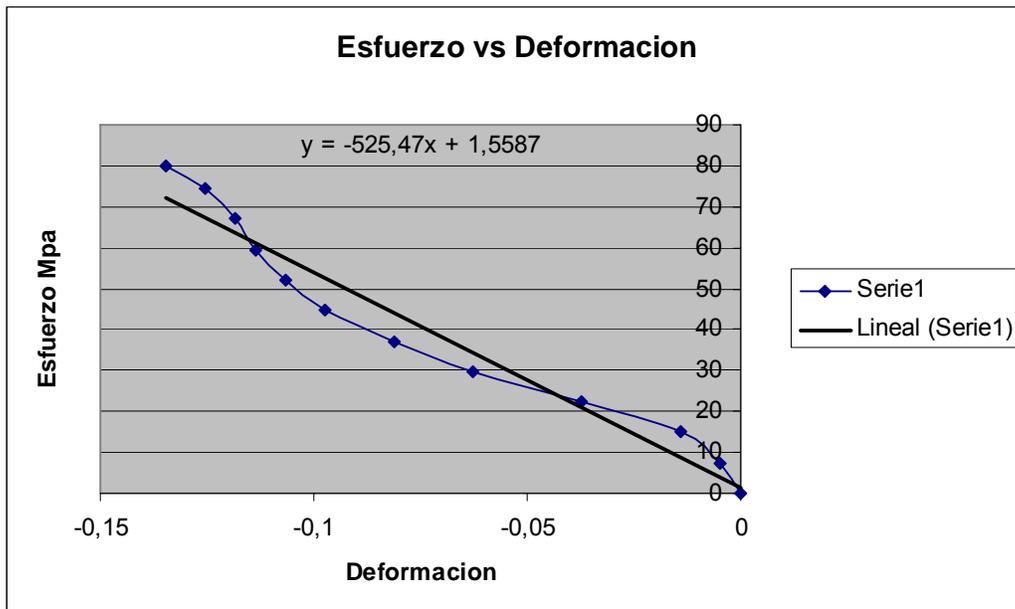


Tabla 6.13 Análisis de resultados para la cuarta probeta.

FUERZA	FUERZA N	Desp mm	e1	e2	Esf Mpa	Esf Teor	Esf Teor R	Error %	k
0	0	0	0	0	0	146,49	0	0	
27	264,6	-0,1	-0,1	-0,0046	7,56	141,54	4,953	52,635	0,6552
54	529,2	-0,2	-0,3	-0,0139	15,12	135,68	10,806	39,922	0,7147
81	793,8	-0,6	-0,8	-0,0371	22,68	130,28	16,208	39,931	0,7146
108	1058,4	-0,75	-	-0,0626	30,24	124,88	21,611	39,929	0,7146
135	1323	-1	-	-0,0812	37,8	119,48	27,014	39,927	0,7147
162	1587,6	-1,1	-2,1	-0,0974	45,36	114,07	32,417	39,927	0,7147
189	1852,2	-1,2	-2,3	-0,1067	52,92	108,67	37,819	39,93	0,7146
216	2116,8	-1,25	-	-0,1137	60,48	103,27	43,222	39,929	0,7146
243	2381,4	-1,3	-	-0,1183	68,04	97,864	48,625	39,928	0,7147
270	2646	-1,4	-2,7	-0,1253	75,6	92,462	54,027	39,93	0,7146
290	2842	-1,5	-2,9	-0,1346	81,2	87,059	59,43	36,631	0,7319

Figura 6.26 Curva Esfuerzo vs. Deformación para la cuarta probeta

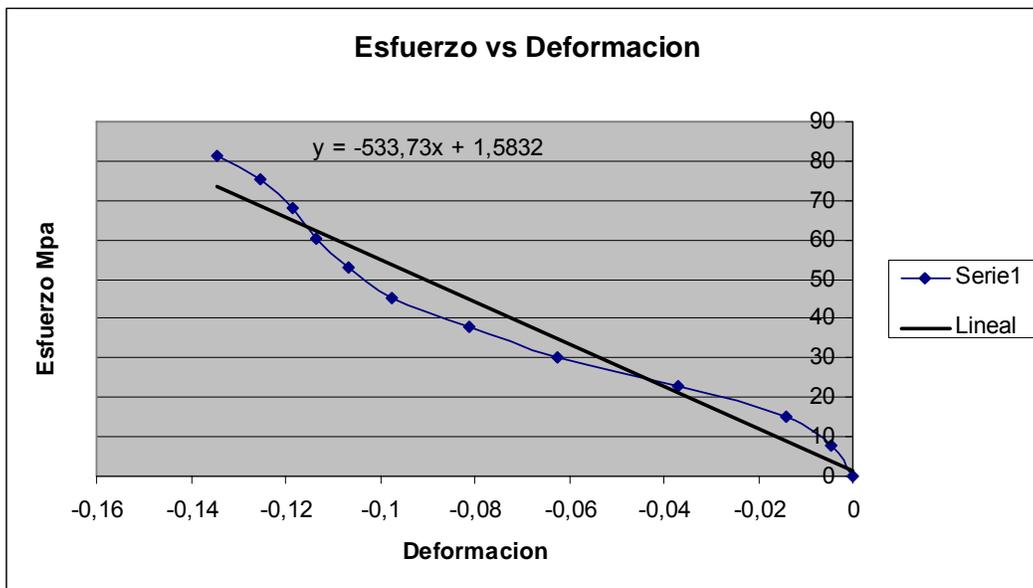


Tabla 6.14 Promedio de % de error.

% error		
20,8595		
32,3976	Promedio	31,50756
35,3883		
37,3849		

6.7.3 ENSAYO DE FLEXION.

Tabla 6.15 Análisis de resultados para la primera probeta.

Fuerza	Cabezal	Fuerza real	Fuerza Mpa	M	I	Esfuerzo	Esf Teor	% Error
297	172	62,5	612,5	44100	574,149	199,70414	51,294	289,332
305	172	66,5	651,7	46922,4	574,149	212,48521	51,294	314,25
320	172	74	725,2	52214,4	574,149	236,4497	51,294	360,97

Tabla 6.16 Análisis de errores.

% Error		
289,332		
314,25	Promedio	321,520667
360,98		

Tabla 6.17 Factores de corrección

Factor de corrección	
Esfuerzo Teórico	51,294
Esfuerzo Practico	216,2132
K	0,23723806

6.7.4 FACTORES DE CORRECCION.

Como se puede observar en la parte superior, cada análisis de resultados viene acompañado por su respectivo factor K, el cual significa un factor de corrección entre la resistencia a la rotura teórica y la resistencia obtenida en el laboratorio.

Es necesario obtener un procedimiento que nos permita hallar los valores de resistencia a la rotura tanto a flexión como a compresión, esto se puede obtener a partir de los valores de los esfuerzos a tracción.

$$(Ec. 6.1) \quad \sigma_{ut} = K * \sigma_{uc}$$

$$(Ec. 6.2) \quad \sigma_{ut} = K * \sigma_{uf}$$

6.7.4.1 Esfuerzo de Tracción vs. Esfuerzo de Compresión.

Tabla 6.18 Esfuerzo de Tracción vs. Esfuerzo de Compresión.

Esfuerzo Tracción	Esfuerzo Compresión	K
58,5354	37,15307582	1,575519623
55,664	39,85612536	1,396623468
45,36224	40,77590248	1,112476665
46,65512727	41,41666667	1,126481946
Promedio		1,302775425

Tabla 6.19 Esfuerzo de Tracción vs. Esfuerzo de Flexión.

Esfuerzo tracción	Esfuerzo Flexión	K
58,5354	199,704142	0,293110596
55,664	212,4852071	0,261966472
45,36224	236,4497041	0,191847311
Promedio		0,248974793

CAPÍTULO 7

7. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y FINANCIERA

INTRODUCCIÓN

Para conocer si un bien y/o servicio que produce o realiza una empresa u organización será aceptado por el mercado, es necesario analizar y predecir los factores económicos, razón por la cuál es muy importante determinar un estudio económico y financiero.

A continuación se detallan los diferentes costos que deben tomarse en cuenta para analizar el proyecto:

7.1. EVALUACIÓN ECONÓMICA

7.1.1. COSTOS DIRECTOS DE INVERSIÓN

7.1.1.1. Materiales

7.1.1.1.1. Fibra de Vidrio tipo malla.

En el siguiente cuadro se detalla los valores de venta:

Tabla 7.1 Valores de fibra de vidrio tipo malla.

Cantidad	Descripción	Valor (USD)
1Kg	Fibra de Vidrio tipo malla	2,57
1m ²	Fibra de Vidrio tipo malla	1,45
1 Rollo	Fibra de Vidrio de 59 Kg de 1,4 m de ancho	151,65

Fuente: Propia

7.1.1.1.2. Sistema de resina epoxi

Tabla 7.2 Valor de resina epoxi (cantidad mínima).

Cantidad	Descripción	Valor (USD)
1Kg	Resina epoxi	3,32

Fuente: Propia

7.1.1.1.3. Sistema de agentes adicionales

7.1.1.1.3.1. Cobalto

Tabla 7.3 Valor de cobalto (cantidad mínima).

Cantidad	Descripción	Valor (USD)
60cm ³	Cobalto	1,41

Fuente: Propia

7.1.1.1.3.2. MECK Peróxido

Tabla 7.4 Valor de MECK Peróxido (cantidad mínima).

Cantidad	Descripción	Valor (USD)
60cm ³	MECK Peróxido	0,44

Fuente: Propia

7.1.1.1.3.3. Tintes adicionales

En el siguiente cuadro mostramos tres de los muchos tintes principales para fibra de vidrio.

Tabla 7.5 Valores de Tintes (cantidades mínimas).

Cantidad	Descripción	Valor (USD)
1Kg	Tinte negro	7,77
1Kg	Tinte azul	13,17
1Kg	Tinte rojo	18,49

Fuente: Propia

Existen más variedad en gamas de tintes en donde varía el precio por kilo de acuerdo el color.

7.1.1.1.4. Desmoldantes

Es una de las materias primas fundamentales en la construcción de materiales compuestos, ya que nos facilita el desprendimiento de la pieza fabricada del molde. A continuación tenemos dos tipos de desmoldantes que se utilizó en la fabricación de las probetas.

7.1.1.1.4.1. Alcohol Polivinílico

Tabla 7.6 Valor de Alcohol Polivinílico (cantidad mínima).

Cantidad	Descripción	Valor (USD)
1Kg	Alcohol Polivinílico	2,95

Fuente: Propia

7.1.1.1.4.2. Cera desmoldante

Tabla 7.7 Valor de Cera desmoldante (cantidad mínima).

Cantidad	Descripción	Valor (USD)
1Lt	Cera desmoldante	6,84

Fuente: Propia

7.1.1.2. Fabricación de Probetas

7.1.1.2.1. Probetas

Con los materiales y sus costos expuestos anteriormente, a continuación se va a describir que cantidad se utilizó para la fabricación de las probetas.

Tabla 7.8 Costo de las probetas.

Cantidad	Descripción	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
2Kg	Fibra de Vidrio tipo malla	2,57	5,14
2Kg	Resina epoxi	3,32	6,64
120cm ³	Cobalto	1,41	2,82
120cm ³	MECK Peróxido	0,44	0,88
1Kg	Tinte negro	7,77	7,77
1Kg	Alcohol Polivinílico	2,95	2,95
TOTAL 1			26,20

Fuente: Propia

7.1.1.2.2. Moldes

Se utilizó moldes hechos en vidrio para lo cuál el molde estaba a la medida de la probeta.

Tabla 7.9 Costo de moldes para las probetas.

Cantidad	Descripción	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
12	Moldes de vidrio	1,00	12,00
<i>TOTAL 2</i>			12,00

Fuente: Propia

7.1.1.2.3. Accesorios y partes

Tabla 7.10 Costo de accesorios utilizados.

Cantidad	Descripción	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
5	Brochas de 1 ½ plg.	0,74	3,70
12	Lijas	0,42	5,04
2	Cuchillas	1,00	2,00
2	Recipientes para preparación	1,50	3,00
1	Mesa de preparación	50,00	50,00
1	Otros	20,00	20,00
<i>TOTAL 3</i>			83,74

Fuente: Propia

7.1.1.3. Remuneración a profesionales

Tabla 7.11 Remuneración a profesionales.

Cant.	Posición	título	horas	USD/hora	Valor Total USD
1	Director del Proyecto	Ing. Mecánico	30,00	20,00	600,00
1	Codirector del Proyecto	Ing. Mecánico	20,00	20,00	400,00
<i>TOTAL 4</i>					1000,00

Fuente: Propia

7.1.1.4. Costo de diseño

Para la fabricación de las probetas de fibra de vidrio se utilizó los servicios de un fibrero especializado en piezas hechas a base de fibra de vidrio.

Tabla 7.12 Costos de diseño.

Cant.	Posición	horas	USD/hora	Valor Total USD
2	Estudiantes	150,00	4,00	600,00
1	Fibrero especializado	4,00	10,00	40,00
<i>TOTAL 5</i>				640,00

Fuente: Propia

7.1.1.5. Otros costos directos

Tabla 7.13 Otros costos directos.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (USD)	Valor Total USD
4	Ensayos de tracción	15,00	60,00
4	Ensayo de flexión	15,00	60,00
4	Ensayos de compresión	15,00	60,00
1	Norma ASTM D3039	39,00	39,00
1	Norma ASTM D3410	48,00	48,00
1	Norma ASTM D 790	39,00	39,00
TOTAL 6			306,00

Fuente: Propia

Tabla 7.14 Total costos directos.

SUBTOTAL A = TOTAL1 + TOTAL2 + TOTAL3 + TOTAL4 + TOTAL5 + TOTAL6	2067,94 (USD)
---	--------------------------

7.1.2. COSTOS INDIRECTOS

7.1.2.1. Misceláneos

Tabla 7.15 Misceláneos.

Ítem	USD
Útiles de Oficina, Internet	80,00
Utilización de computadores	30,00
Servicios básicos	40,00
Logística y transporte de materiales	80,00
Otros gastos de funcionamiento	30,00
TOTAL 7	260,00

Fuente: Propia

Tabla 7.16 Total costos indirectos.

SUBTOTAL B = TOTAL7	260,00 (USD)
----------------------------	-------------------------

Fuente: Propia

7.1.3. TOTAL GENERAL DE COSTOS DEL PROYECTO

Tabla 7.17 Total general de costos del proyecto.

TOTAL COSTOS PROYECTO = SUBTOTAL A + SUBTOTAL B	2327,94 (USD)
--	--------------------------

Fuente: Propia

El costo de de esta metodología es igual al total general menos los costos indirectos y los costos de diseño, esto da un total de: 1427,94 USD.

7.2. EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera trata acerca de los entes de financiamiento y de la forma que se propone recuperar la inversión.

7.2.1. EL CRITERIO DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)

Este criterio plantea que el proyecto debe aceptarse si su valor actual neto (VAN) es igual o superior a cero, donde el VAN es la diferencia entre todos sus ingresos y egresos expresados en moneda actual.

$$(Ec. 7.1) \quad VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0$$

Donde:

BN_t : Beneficio neto del flujo del período t

I_0 : Inversión Inicial

n : Número de años

i : Tasa de descuento

El método del VAN nos permite conocer la rentabilidad del proyecto, interpretando el resultado obtenido.

Tabla 7.18 Costo de los ensayos.

TIPO DE ENSAYO	COSTO (USD)
Tracción	15,00
Compresión	15,00
Flexión	15,00

Fuente: Propia

Se estima que se realizarán 4 ensayos de Tracción, 4 ensayos de Compresión y 3 ensayos de Flexión por mes.

El Laboratorio de Resistencia de Materiales realiza estos ensayos mensuales, lo que representaría \$165 dólares mensuales y por lo tanto \$1980 dólares anuales.

La proyección se realizará a cinco años. El costo de realizar los ensayos de tracción, compresión y flexión aumenta cada año de acuerdo a la inflación por lo que se tomó un incremento para cada año del 10%.

Tabla 7.19 Cálculo del Valor Agregado Neto.

Cálculo del VAN						
n	0	1	2	3	4	5
lo	1427,94					
BN		1980	2178	2376	2574	2772
i	20%	20%	20%	20%	20%	20%
(1+i)^n	1	1,2	1,44	1,728	2,0736	2,48832
Fcd		1650	1512,5	1375	1241,32	1114,00
VAN	\$ 5.464,88					

7.2.2. EL CRITERIO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

El criterio de la tasa interna de retorno (TIR) evalúa el proyecto en función de una única tasa de rendimiento por período con la cual la totalidad de los beneficios actualizados son exactamente iguales a los desembolsos expresados en moneda actual, en otras palabras es lo mismo que calcular el VAN del proyecto igual a cero.

La fórmula es la siguiente:

$$(Ec. 7.2) \quad \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 = 0$$

La tasa así calculada se compara con la tasa de descuento de la empresa. Si la TIR es igual o mayor que esta, el proyecto es rentable.

Tabla 7.20 Cálculo de la Tasa Interna de Retorno.

Cálculo de la TIR						
n	0	1	2	3	4	5
lo	1427,94					
BN	-1427,94	1980	2178	2376	2574	2772
TIR	146%					

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- ◆ Las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio nacional son muy inferiores a las estipuladas en las normas o libros, esto se debe a que nuestro proceso de producción no es selectivo.

- ◆ La fabricación de piezas con fibra de vidrio es un proceso manual, por lo cual es muy complicado obtener los mismos porcentajes de fibra y resina.
Esto implica que con piezas idénticas nosotros obtenemos distintos valores de resistencia.

- ◆ Los errores porcentuales son un poco altos debido a que el programa cosmos Works asume que las fibras son perfectamente alineadas unas con otras, lo cual en la realidad nunca se da.

- ◆ Los datos obtenidos luego de haber culminado el proyecto son perfectamente utilizables y fiables.

8.2. RECOMENDACIONES

- ◆ Antes de introducir el vidrio al proceso de fusión directa, es recomendable solo introducir vidrio tipo E o eléctrico.
- ◆ Se recomienda poner mas énfasis en el estudio de materiales compuestos, ya que esta es la única forma de poder desarrollar una tecnología apropiada que permita automatizar la producción de elementos estructurales.
- ◆ Recomendamos tratar de en lo posible realizar ensayos en el laboratorio de resistencia de materiales que se asemejen a la realidad, ya que de esta forma se reducen los márgenes de error en simulación con software.
- ◆ Recomendamos utilizar fibra de vidrio en la construcción de elementos estructurales que estén sometidos a tracción.