

308917



**UNIVERSIDAD PANAMERICANA**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

62

Con Estudios Incorporados a la  
Universidad Nacional Autónoma de México

2ij

**ANALISIS DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA DE  
MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**AREA: INGENIERIA MECANICA**

**P R E S E N T A**

**RAFAEL VILLAUURUTIA ARENAS**

Director de Tesis

**FIS. MARIANO ROMERO VALENZUELA**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre: Beatriz Arenas de Villaurrutia, por todos sus cuidados y cariños, silenciosos pero cercanos. ¡ Gracias mamá !

A mi padre: Rafael Villaurrutia Ricárdez, por el gran apoyo que me ha brindado siempre, mi agradecimiento más profundo con respeto y admiración, pero sobre todo con amor.

A mis hermanas: Norma e Iliana, con cariño.

A mi amigo y abuelo: Jesús Arenas Rubio, de quien aprendí que la juventud es un estado del corazón.

A mis queridas abuelas: Vitos y Bela, quienes me enseñaron a dividir y no preguntar.

A Edgar Puga y Javier Téllez, como un homenaje a todos los años, y porque sé que mis triunfos son sus triunfos.

A los miembros honorarios de la asociación de "Exagerados de Verdad": Walter Nava, Luis Becerril y Edgar Lozada por ser y estar para mí, hoy que hace sol y ayer que llovía. ¡ Gracias amigos !

A mis queridos Amigos: Lourdes Pastor, Juancho, Claudia, Daniel y la Kuma, por recibirme siempre con los brazos abiertos en ese oasis de comprensión, cultura, exparcimiento, alegría y amor, que existe en Olmo 104.

A mi querido amigo Juan Carlos Barrón, por que en él me aprendo más que en mí mismo, y porque sé que sabe que en nuestra amistad no existe la entropía.

A mis amigos y primos: Enrique y Raúl Barrientos, porque este trabajo tiene mucho de ellos, y porque sé que cuento con ellos tanto, como ellos conmigo.

Al Dr. Gabriel Torres Villaseñor, por haberne inducido y fomentado el amor al maravilloso mundo de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Al Ing. Ubaldo Márquez Amador, quien fue el director de esta tesis, por su amor a la cátedra, que ha sido fuente de inspiración para muchos de sus alumnos.

A mi mejor amigo y compañero incondicional, que me enseña a vivir todos los días; y no pierde la calma, no alza la voz, sólo sonrío.....¡ Dios !

**Bendita curiosidad, entre sublime y grosera,  
o nos hace escuchar detrás de las puertas,  
o descubrimos América.....de pura casualidad.**

**Y.M.**

## INDICE GENERAL

<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1 GENERALIDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.</b>	
1.1 Antecedentes de los materiales compuestos.	5
1.2 Definición de los materiales compuestos.	9
1.3 Clasificación de los materiales compuestos.	11
1.3.1 Materiales compuestos reforzados con partículas.	11
1.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras.	12
1.3.2.1 Influencia de la longitud de las fibras.	14
1.3.2.2 Las fibras.	17
1.3.2.3 Matrices.	18
1.3.3 Materiales compuestos laminares.	19
1.4 Materiales compuestos de matriz polimérica.	21
1.5 Materiales compuestos de matriz metálica.	22
1.6 Estructuras tipo " sandwich ".	23
1.7 Materiales compuestos híbridos.	26
1.8 Aplicaciones y potenciales de los materiales compuestos.	27

## **CAPITULO 2    MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA.**

<b>2.1 Generalidades de los materiales compuestos de matriz polimérica.</b>	<b>32</b>
2.1.1 Estructura de los polímeros.	32
2.1.2 Plásticos termoplásticos.	32
2.1.3 Plásticos termofijos.	33
2.1.4 Elastómeros.	34
<b>2.2 Matrices plásticas.</b>	<b>35</b>
2.2.1 Matrices plásticas termoestables.	35
2.2.2 Matrices plásticas termoplásticas.	36
<b>2.3 Materiales de reforzamiento.</b>	<b>37</b>
<b>2.4 Selección de materiales para compuestos de matriz polimérica.</b>	<b>42</b>
2.4.1 Materiales de construcción.	45
<b>2.5 Elaboración.</b>	<b>46</b>
2.5.1 Procesos de manufactura para compuestos termofijos.	48
2.5.1.1 Moldeado por contacto ( hand lay-up ).	49
2.5.1.1.1 Metodo de preimpregnado.	51
2.5.1.2 Moldeado por proyección ( spray-up ).	53
2.5.1.3 Moldeado en saco de vacío.	54
2.5.1.4 Moldeado en autoclave.	57
2.5.1.5 Arrollamiento de filamentos.	59
2.5.1.6 Moldeado por centrifugación.	62

2.5.2	Procesos en molde cerrado.	62
2.5.2.1	Moldeado por compresión.	62
2.5.2.1.1	Moldeado de preformas.	63
2.5.2.1.2	Compuestos moldeados en hojas (SMC).	65
2.5.2.2	Moldeado por inyección de resinas.	67
2.5.2.3	Pultrusión.	71
2.5.3	Procesos de manufactura para materiales termoplásticos.	76
2.5.3.1	Arrollamiento de filamentos para termoplásticos.	78
2.5.3.2	Pultrusión de termoplásticos.	79
2.5.3.3	Moldeado por compresión de termoplásticos.	79
2.5.3.3.1	Hidroformado.	80
2.5.3.3.2	Termoformado de termoplásticos reforzados.	81
2.5.3.4	Moldeado por transferencia de resina.	82
2.5.3.5	Moldeado por inyección de termoplásticos.	82
2.5.3.6	Extrusión de termoplásticos reforzados.	85
2.5.3.7	Fornado por diafragma.	86



**CAPITULO 3    VARIABLES QUE DETERMINAN LAS  
CARACTERISTICAS MECANICAS  
DURANTE EL PROCESO DE FABRICACION.**

3.1 Arrollamiento de filamentos.	88
3.1.1 Materiales.	91
3.1.1.1 Fibras para el arrollamiento de filamentos.	92
3.1.1.2 Resinas para el arrollamiento de filamentos.	94
3.1.2 Patrones de arrollamiento.	97
3.1.3 Diseño y análisis.	101
3.1.4 Análisis finales.	102
3.1.5 Cálculo del espesor de la fibra.	105
3.1.5.1 Factor de masa y volumen.	105
3.1.6 Máquinas de arrollamiento.	107
3.1.6.1 Mandriles.	109
3.1.7 El manejo de los materiales y los procesos de control.	112
3.1.8 Propiedades Mecánicas.	116
3.1.8.1 Métodos analíticos.	119
3.1.8.2 Soluciones analíticas.	124
3.1.8.3 Resultados empíricos.	127
3.2 Pultrusión.	132
3.2.1 Descripción del proceso.	137
3.2.2 Desarrollo del modelo matemático.	140
3.2.2.1 Ecuaciones de balance de energía y continuidad.	141

3.2.2.2 Reacción de curado.	145
3.2.2.3 Sistema de ecuaciones.	147
3.2.3 Determinación experimental de los parámetros cinéticos del curado.	148
3.2.3.1 Materiales.	148
3.2.3.2 Determinación de los parámetros cinéticos para las reacciones de curado.	149
3.2.4 Resultados y discusión.	154
3.2.5 Conclusiones.	164

#### **CAPITULO 4 APLICACIONES.**

4.1 Introducción	167
4.2 Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz polimérica procesados por arrollamiento de filamentos.	169
4.2.1 Aplicaciones aeroespaciales y de defensa.	169
4.2.2 Aplicaciones industriales.	173
4.2.3 Aplicaciones en flechas de motores.	174
4.3 Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz polimérica procesados por pultrusión.	176

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>182</b>
---------------------	------------

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>185</b>
---------------------	------------

**TESIS**

**COMPLETA**

## INTRODUCCION

En un principio el hombre adaptó los materiales naturales tales como la madera, arcilla, fibras vegetales y tejido animal, a sus necesidades básicas, asentando con esto las raíces de los materiales compuestos. Cuando las piedras se sujetaron a vástagos de madera con la ayuda de fibras naturales, el hombre primitivo creó los materiales compuestos, que son fundamentalmente, combinaciones de materiales de diferente naturaleza unidos para lograr propiedades específicas.

Los materiales compuestos han proliferado en múltiples direcciones en los últimos años, y todo indica que continuarán en el siglo veintiuno.

El estudio y utilización de los materiales compuestos se ha convertido en un esfuerzo verdaderamente interdisciplinario, que se ha enriquecido gracias a las aportaciones de los químicos, físicos, ingenieros mecánicos, e ingenieros en materiales.

Muchos de los materiales plásticos comerciales contienen aditivos y filamentos para modificar una gran variedad de propiedades ( coeficiente de expansión, conductividad eléctrica y térmica, flujo en estado líquido, coeficiente de fricción, estabilidad química, y resistencia a la fractura ). Sin embargo, en este trabajo, trataremos principalmente con materiales cuyas propiedades físicas se han visto alteradas por la adición de reforzamientos.

La producción de fibras de vidrio fue patentada por Slayter y Thomas en la década de 1930. Estas fibras fueron utilizadas para reforzar la resina de poliéster no saturada, la cual fue patentada en la misma década. El reforzamiento con fibra de vidrio para el poliéster se utilizó en un principio en

aviones en 1938. Esta fibra, de la cual se utilizan anualmente 400,000 toneladas en E.U.A., es el reforzamiento más utilizado para polímeros.

Las fibras de carbono son también muy utilizadas en polímeros; hoy en día, más de 2000 toneladas de fibras de carbono o grafito se utilizan anualmente en los E.U.A. Los transbordadores espaciales, los cuales están basados en reforzamientos de grafito en una resina epóxica, son un claro ejemplo del papel que juegan los materiales compuestos de matriz polimérica.

En los materiales compuestos, donde las propiedades dependen casi únicamente de la orientación de las fibras, los procesos de manufactura como el arrollamiento de filamentos y la pultrusión, tienen la ventaja adicional de proveer una orientación de los filamentos. La combinación de éstos y otros procesos de manufactura, dan como resultado un producto más económico y de mayor calidad.

Pero el problema surge cuando no hay un control exacto de estos procesos de manufactura y las piezas obtenidas no tienen la calidad necesaria o simplemente se salen de especificación. El arrollamiento de filamentos y la pultrusión, son los procesos de manufactura más utilizados en la industria de los materiales compuestos de matriz polimérica actualmente, por lo que se requiere un estudio detallado de los factores que intervienen en los procesos, así como de las variables que determinan las características físicas de las piezas en los procesos de manufactura.

Es importante destacar que gran parte del análisis del que se tiene conocimiento hasta ahora, tanto del arrollamiento de filamentos, como del proceso de pultrusión, hace referencia sólo a algunos aspectos de los procesos y de los productos obtenidos en los procesos desde el punto de vista

del monitoreo de la calidad del producto, y de la ingeniería del proceso. Sin embargo, existe muy poca información acerca de aquellos aspectos fundamentales del proceso que nos ayudan a controlarlo, teniendo como principal objetivo la calidad del producto.

Estos procesos de manufactura son difíciles de dominar hasta que se logra controlar las variables principales de los fenómenos que tienen lugar durante los procesos.

El presente trabajo tiene como objetivo el análisis de las variables que determinan las propiedades y características físicas de las estructuras, de materiales compuestos de matriz polimérica, obtenidas mediante los procesos de arrollamiento de filamentos y pultrusión.

En el primer capítulo, se describen las características de los materiales compuestos, su clasificación, las propiedades que tienen según sea su composición, y sus potenciales. En este capítulo se pretende dar una pequeña introducción al mundo de los materiales compuestos, y sobre todo señalar la relevancia tan grande que han tenido en la ciencia e ingeniería de materiales al ser la cuarta familia de materiales de ingeniería.

En el segundo capítulo, se da una introducción a los materiales compuestos de matriz polimérica, mencionando los procesos de manufactura más comunes en la industria de los plásticos reforzados y las diferencias entre materiales compuestos de matriz polimérica, metálica y cerámica. Este capítulo nos permite tener una visión más amplia de los materiales compuestos y sus procesos de manufactura, a la vez de que permite hacer conciencia de la importancia del arrollamiento de filamentos y la pultrusión.

En el tercer capítulo, se explican los procesos de arrollamiento de filamentos, y el proceso de la pultrusión. Se hace una descripción detallada de estos procesos, y después se analiza cada uno para determinar las variables que influyen en cada uno de los procesos. En este capítulo se pretende definir las variables que determinan las características mecánicas de las estructuras de materiales compuestos de matriz polimérica, con el fin de que se pueda tener una mayor información sobre los procesos, y por lo tanto, un mayor control de los mismos.

En el cuarto capítulo se dan ejemplos de las aplicaciones que hoy en día se pueden dar a estos materiales en las distintas ramas de la industria. Este capítulo nos muestra de forma definitiva la gran importancia que tienen para el hombre y su medio, los materiales compuestos de matriz polimérica y sus procesos de manufactura.

## **CAPITULO I**

### **GENERALIDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS**

#### **1.1 ANTECEDENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS**

Desde una era muy temprana de la historia de la humanidad, se llevaba a cabo la adición de paja y otras fibras vegetales a las construcciones de paredes y muros. Estas fibras auxiliaban la evaporación de la mezcla desde el interior, y ayudaba a que se distribuyeran las grietas más uniformemente. De esta forma la resistencia de la pared se incrementaba. Como un ejemplo, la paja fue utilizada por los Israelitas en la fabricación de ladrillos en el año 800 A.C. Estos ladrillos tenían una resistencia a la compresión de 1000 p.s.i. (cerca de la cuarta parte de la resistencia que ofrecen los ladrillos modernos).

En la construcción de armas, los materiales compuestos han sido utilizados a partir de tiempos más recientes. Los arcos de los Mongoles fueron contruidos a partir de un compuesto basado en los tendones de los animales, ramas de bosque, y huesos de animales, todo unido con un adhesivo. Tanto las espadas de Damasco como las espadas ceremoniales de los japoneses, son estructuras laminadas. En tiempos más recientes el linoleum, las tuberías de asbesto-cemento, las mezclas de asfalto y algunos agregados y el concreto oxigenado pueden contarse como ejemplos de materiales compuestos.

Aunque con frecuencia se considera que muchos compuestos son materiales modernos, estaríamos en un error si no destacamos que los egipcios reconocieron los conceptos fundamentales de los materiales



compuestos desde el año 1500 a.c. Los antiguos artesanos utilizaron los principios de refuerzo con fibras y laminación en aplicaciones tan antiguas como la fabricación de ladrillos, arcos largos, armaduras y espadas de Samurai.

Se ha estimado que en 1979 la industria de los materiales compuestos utilizó una gran cantidad de resinas, agentes reforzantes, y rellenos para producir 8 billones de libras de compuestos; De este total, aproximadamente 2 billones de libras fueron de refuerzos de asbesto, 2 billones de libras más fueron de refuerzos de fibra de vidrio, y 4 billones de libras fueron de otros reforzamientos como fibra celulosa, algodón y nylon.

El costo total de estos compuestos para la industria fue de 6 billones de dólares.

El dramático y significativo progreso en la tecnología de los materiales compuestos (especialmente de los plásticos reforzados- RP) fue puesto a prueba a principios de 1940, año en el cual se desarrolló la alta resistencia estructural de los plásticos reforzados.

Los elementos básicos de los plásticos reforzados fueron comprendidos por la ciencia y la tecnología de materiales desde antes de 1940, debido a la gran necesidad que generó la segunda guerra mundial, de encontrar un material con grandes propiedades estructurales, y como en la gran mayoría de los avances tecnológicos, la segunda guerra mundial impulsó los últimos desarrollos de los plásticos reforzados como materiales compuestos.

Para 1941, el gobierno de los Estados Unidos, auspició la fabricación de partes semiestructurales utilizando como base materiales tales como fibras de algodón impregnadas con resinas fenólicas curadas a 2000 psi.

En 1942, fueron desarrollados los sistemas de curado a baja presión de resinas de poliéster; Y para finales de la guerra, el reforzamiento de fibra de vidrio para el plástico fue utilizado con éxito en aplicaciones estructurales.

A partir de estos interesantes éxitos, los plásticos reforzados basados en una gran variedad de agentes reforzantes, fueron entrando gradualmente a la vida civil como un material utilizado en la construcción de barcos deportivos, autos, artículos para el hogar, bandejas, y otras aplicaciones.

Las propiedades obtenidas al combinar los reforzamientos de fibra con una matriz de resina en un compuesto homogéneo, probaron ser superiores a las propiedades encontradas en los materiales tradicionales; aunque inicialmente fueron obstaculizados por el alto costo de la materia prima, y los lentos y costosos métodos de procesamiento para la obtención de partes sofisticadas, la industria de los plásticos reforzados fue tan impactante y ha tenido un progreso tan firme, que hoy en día su crecimiento lo podemos medir en billones de dólares por año.

Los materiales compuestos fueron desarrollados por la necesidad de encontrar un material estructural homogéneo, que cumpliera con los atributos necesarios para aplicaciones especiales. Los compuestos con reforzamiento de fibras, fueron desarrollados como respuesta a las demandas de la industria aeroespacial. Las aleaciones de aluminio, que poseen características de alta resistencia, rigidez y bajo peso, se habían utilizado por mucho tiempo en la industria aeroespacial. Sin embargo, la corrosión era un problema primordial en estas aleaciones. Como ya habíamos mencionado, la segunda guerra mundial trajo la necesidad de materiales que tuvieran propiedades estructurales mejoradas. En respuesta a esta necesidad, se desarrollaron los compuestos reforzados con fibras, y para finales de la guerra, los plásticos

reforzados con fibra de vidrio habían sido utilizados con éxito en filamentos para motores de cohetes y en muchas otras aplicaciones estructurales.

Estos materiales fueron ampliamente utilizados a partir de la década de 1950, e inicialmente parecían ser la única aproximación viable a la eliminación de la corrosión y las grietas en las estructuras.

Es claro que los materiales compuestos pueden abarcar una categoría muy amplia de materiales. De hecho, se podría preguntar ¿Qué constituye en realidad a un material compuesto?. Desde el punto de vista de la ingeniería, se pueden considerar los materiales compuestos como combinaciones íntimas de materiales que difieren en composición o en forma, en donde los constituyentes diferentes retienen sus identidades separadas, pero obran en concierto para producir propiedades en los compuestos que no se pueden obtener con los constituyentes individuales.

Debido a sus propiedades únicas y al hecho de que estas propiedades se pueden ajustar para satisfacer un conjunto específico de necesidades, los compuestos se están convirtiendo rápidamente en una clase importante de materiales tecnológicos. Por lo general se toma en cuenta a estos materiales en situaciones en donde es insuficiente una categoría específica del material tecnológico.

Sobre todo, las propiedades que exhiben los materiales compuestos están influidos muy fuertemente por las propiedades de los constituyentes individuales.

Aunque el comportamiento resultante del compuesto se relaciona por necesidad con las propiedades individuales de cada uno de sus componentes,

el compuesto puede ser muy superior a los constituyentes individuales en algunas aplicaciones.

Pero la principal importancia de los materiales compuestos en la ciencia e ingeniería de materiales, es que han hecho un parteaguas histórico, a tal grado que podríamos llamar a esta era, la era de los materiales compuestos; ya que antes, las necesidades del hombre se ajustaban a las características de los materiales existentes, y ahora son los materiales los que se ajustan a las necesidades del hombre. Es por eso que a los materiales compuestos se les denomina como la cuarta familia de materiales de ingeniería o bien la nueva familia de materiales de ingeniería.

## **1.2 DEFINICION DE LOS MATERIALES COMPUESTOS**

Los materiales compuestos son materiales creados para obtener características de alta rigidez, ligereza, resistencia a altas temperaturas, bajo peso, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad; que no son encontradas en los materiales originales (Metales, Cerámicos, Plásticos).

Estos materiales consisten en una matriz, que lo mismo puede ser una resina orgánica o un metal, y fibras ( u otro material ) de alta resistencia que se embeben en la matriz.

La fibra de vidrio es uno de los mejores ejemplos; Este compuesto de fibras de vidrio embebidas en una matriz polimérica, es una invención relativamente nueva, aunque en pocos años se ha convertido en un material importantísimo para la ingeniería de materiales.

La fibra de vidrio envuelve lo mejor de los "dos mundos", este material se basa en las propiedades de cada componente, produciendo un producto que

es superior a cualquiera de los componentes por separado. La alta resistencia de las fibras de vidrio se combina con la ductilidad de la matriz polimérica para producir un material fuerte, capaz de soportar las cargas que se generan en un material estructural.

Debido a la matriz, es posible diseñar el material para que tenga propiedades tales como las ya mencionadas.

Los compuestos pueden ser Metal-Metal, Cerámico-Cerámico, Plástico-Plástico, Metal-Cerámico, Metal-Plástico, Plástico-Cerámico.

Un material compuesto puede definirse también como una combinación macroscópica de dos o más materiales distintos, teniendo una interfase entre ellos. Sin embargo, como los componentes son utilizados normalmente por sus propiedades estructurales, la definición puede ser restringida a únicamente aquellos materiales que contienen un reforzamiento (como fibras o partículas), soportado por un material blindado (matriz).

Los materiales compuestos se caracterizan por tener una fase discontinua de fibras o partículas que es más dura y más resistente que la matriz de fase continua.

Para proveer el reforzamiento debe de haber un cierto porcentaje de fracción volumétrica (10% o más) de fase discontinua. Hay, sin embargo, excepciones que pueden ser consideradas como compuestos, un ejemplo de esto es el caso de los polímeros modificados con caucho, donde la fase discontinua es más dúctil que el polímero, resultando en un aumento de tenacidad.

### **1.3 CLASIFICACION DE LOS MATERIALES COMPUESTOS**

Los materiales compuestos pueden ser divididos de dos formas principales:

- Por el tipo de reforzamiento ( Partículas, Fibras, Laminares).
- Por el tipo de material de la matriz ( Polímero, Metal, Cerámica).

#### **1.3.1 Materiales compuestos reforzados con partículas**

Un reforzamiento es considerado de partícula si todas sus dimensiones son iguales. De esta manera, los compuestos reforzados con partículas incluyen los reforzados con esferas, varillas y hojuelas.

En los compuestos reforzados con partículas, las partículas de un material duro y frágil dispersas de una manera discreta y uniforme se rodean por una matriz más blanda y dúctil; si las partículas se distribuyen uniformemente, estos compuestos tienen propiedades isotrópicas.

El proceso utilizado para introducir las partículas dispersas es un proceso mecánico.

Se pueden dividir los materiales compuestos por partículas en dos categorías generales basadas en el tamaño y la sustancia de las partículas que influyen en las propiedades del compuesto. Estas categorías son:

- a) Materiales compuestos endurecidos por dispersión.
- b) Materiales compuestos verdaderos.

a) Los materiales compuestos endurecidos por dispersión tienen como característica principal, que el tamaño de la partícula es muy pequeño (aproximadamente tienen un diámetro de 100 Å a 2500 Å). Debido a que las partículas pequeñas obstaculizan el paso de las dislocaciones, producen un efecto grande de endurecimiento. Sólo se requieren pequeñas cantidades del material disperso. Conforme se incrementa la temperatura la resistencia del compuesto decrece.

b) Los materiales compuestos verdaderos contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no obstaculizan el deslizamiento, por lo cual no presentan un endurecimiento tan grande como en el caso de los compuestos endurecidos por dispersión.

El objeto de los compuestos verdaderos es crear combinaciones poco frecuentes de propiedades y no para mejorar la resistencia.

### **1.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras.**

Tecnológicamente, los compuestos más importantes son aquellos en los cuales la fase dispersa está en forma de fibra. El propósito del diseño de un material compuesto reforzado con fibra, incluye frecuentemente una alta resistencia y/o una alta dureza en una base de bajo peso. Estas características son expresadas en términos de resistencia específica y módulo específico, los cuales corresponden, respectivamente, a las relaciones entre resistencia a la tensión-gravedad específica y módulo de elasticidad-gravedad específica. Los compuestos reforzados con fibras que tienen una gran resistencia específica y

un alto módulo específico, han sido producidos mediante el uso de materiales de baja densidad para las fibras y para la matriz.

Estos compuestos mejoran la resistencia al esfuerzo, la resistencia a la fatiga, la rigidez y la relación resistencia-peso, a través de la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles dentro de una matriz más blanda y dúctil.

El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras y proporciona tenacidad y ductilidad, mientras que las fibras soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. A diferencia de los compuestos endurecidos por dispersión, la resistencia del compuesto se incrementa tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, y pueden presentar un comportamiento tanto isotrópico, como anisotrópico.

Los materiales reforzantes se ordenan en una variedad de orientaciones, como se muestra en la figura 1.

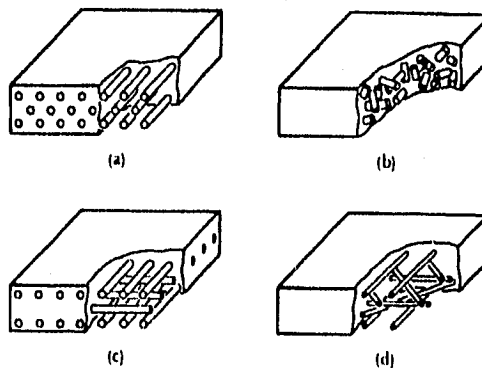


Figura 1.1 a) Fibras continuas unidireccionales. b) Fibras discontinuas al azar. c) Fibras ortogonales. d) Fibras en capas múltiples.



Algunas de las características de los compuestos reforzados con fibras son:

- Relación de aspecto.- Las fibras continuas proporcionan una mayor resistencia que las fibras discontinuas, esto se debe principalmente a que en las fibras discontinuas, los extremos de cada fibra soportan menos carga que el resto de la fibra.
- Fracción volumétrica de fibras.- Una mayor fracción volumétrica de fibras incrementa la resistencia y rigidez del compuesto.
- Orientación de las fibras.- Las fibras unidireccionales tienen rigidez y resistencia óptimas cuando la carga aplicada es paralela a las fibras. Sin embargo, las propiedades son muy anisotrópicas.

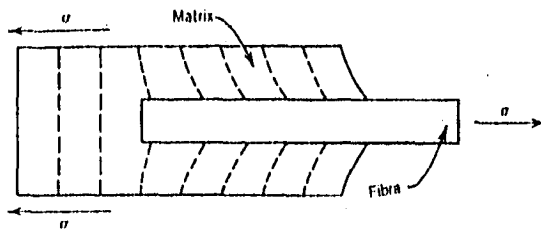


Figura 1.2

### 1.3.2.1 Influencia de la longitud de las fibras.

Las características mecánicas de un compuesto reforzado con fibras dependen no sólo de las propiedades de las fibras, sino también del grado en

que se transmite la carga a las fibras por la matriz. Es muy importante para una buena transmisión de carga, la magnitud de la fuerza de unión interfásica entre la fibra y la matriz. En una aplicación de esfuerzos, la acción de esta fuerza de unión se detiene al final de la fibra. Para cuando el esfuerzo está concentrado en la fibra, ya ha habido una deformación plástica de la matriz, tal y como se muestra en la figura 1.2; en otras palabras, no hay una transmisión de carga, por parte de la matriz, a cada extremo de la fibra.

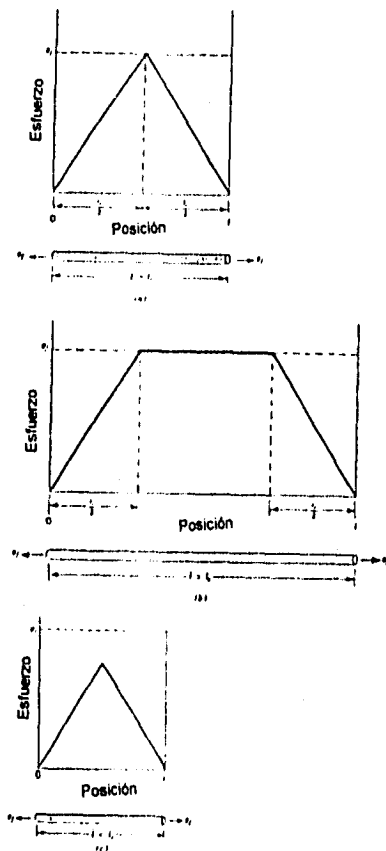
Es necesaria siempre una longitud crítica de la fibra para respaldar las propiedades de dureza y resistencia del compuesto. Esta longitud crítica  $l_c$  depende del diámetro  $d$  de la fibra y su esfuerzo último a tensión  $\sigma_f$ , y a la fuerza de unión entre la fibra y la matriz  $\tau_c$ , de acuerdo a la siguiente relación:

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

Para un número de combinaciones entre fibra de vidrio y carbón, la longitud crítica es del orden de 1 mm, y estará en un rango entre 20 y 150 veces el diámetro de la fibra.

Cuando un esfuerzo iguala a  $\sigma_f$  y es aplicado a una fibra que tiene la longitud crítica, el esfuerzo describe el comportamiento que se muestra en la figura 1.3a. Conforme aumenta la longitud de la fibra, el reforzamiento de la fibra es más efectivo; esto se demuestra en la figura 1.3b, donde un esfuerzo axial se lleva a cabo por  $l > l_c$  cuando el esfuerzo aplicado es igual a la longitud de la fibra. La figura 1.3c, muestra la posición de los esfuerzos para  $l < l_c$ .

Las fibras que tienen una longitud  $l \gg l_c$  ( normalmente  $l > 15 l_c$  ) son denominadas continuas; las fibras discontinuas o fibras cortas tienen una longitud más corta que ésta. Para las fibras discontinuas de longitud significativamente menor a  $l_c$ , la matriz se deforma alrededor de la fibra tanto que no hay transferencia de esfuerzo ni un reforzamiento por parte de la fibra. Estos son esencialmente los compuestos reforzados con partículas. Para afectar significativamente en la resistencia del compuesto, las fibras deben de ser continuas.



**Figura 1.3** Posición de los perfiles en condiciones de carga.

### 1.3.2.2 Las fibras.

Una importante característica de muchos de los materiales, especialmente los materiales frágiles, es que una fibra de diámetro pequeño es más resistente que su matriz.

En base a sus diámetros y características, las fibras se agrupan en 3 diferentes clasificaciones: whiskers, fibras, e hilos .

Los **whiskers** son cristales muy delgados que tienen una relación longitud-diámetro muy grande. Como consecuencia de su tamaño tan pequeño, tienen un alto grado de perfección cristalina y están libres de imperfecciones, lo que da lugar a su excepcional resistencia; y son el material más resistente conocido actualmente. No obstante de su alta resistencia y magníficas propiedades, los whiskers no son muy utilizados como medios reforzantes debido a su alto costo. Además, es difícil ( y muchas veces impráctico ) incorporar a una matriz a los whiskers.

Los whiskers incluyen materiales tales como el grafito, carburo de silicio, nitruro de silicio, y óxido de aluminio.

Los materiales clasificados como **fibras** son materiales policristalinos o amorfos y tienen un diámetro muy pequeño; los materiales para fibras son generalmente polímeros o cerámicos, e incluyen materiales tales como: vidrio, carbón, boro, óxido de aluminio, carburo de silicio y el polímero aramids.

Los materiales clasificados como **hilos**, tienen un diámetro relativamente grande; los materiales típicos utilizados aquí incluyen al acero, el molibdeno, y el tungsteno. Los hilos son utilizados como un reforzamiento radial de acero en las llantas del automóvil, en filamentos de refuerzo para mangueras de alta presión.

### 1.3.2.3 Matrices.

Como ya se mencionó, las principales tareas de la matriz en un compuesto es la de mantener juntas las fibras en virtud de sus características de cohesión y adhesión, transferir las cargas a las fibras y protegerlas del medio ambiente. La matriz es una "frontera frágil" en el compuesto, especialmente porque no hay todavía resinas que sean capaces de soportar los esfuerzos que soportan las fibras. De esta manera, cuando un compuesto es sometido a la acción de cargas, existe la posibilidad de que las resinas se fracturen originando unas grietas microscópicas dentro de la matriz, estas grietas pueden crecer por mecanismos de unión entre grietas y formar fisuras muy grandes en el material. Sin embargo, la matriz de resina tiene muchas funciones esenciales; aparte de las ya mencionadas, la matriz mantiene a las fibras reforzantes con una apropiada orientación y una posición adecuada de manera tal que las fibras puedan soportar las cargas, también distribuye las cargas más o menos uniformemente entre las fibras, y protege de daños a las fibras; la matriz separa a las fibras y, gracias a su plasticidad, previene la propagación de las grietas de fibra a fibra, las cuales pueden dar como resultado una falla catastrófica. En otras palabras, la matriz actúa como una barrera contra la propagación de grietas. Y aunque algunas de las fibras individuales fallen, la fractura total del compuesto no ocurrirá hasta que varias fibras adyacentes ( una vez que hayan fallado ), formen un grupo de tamaño considerable.

Es muy importante que las fuerzas de adhesión entre las fibras y la matriz sean altas para poder minimizar la tendencia de las fibras a salir de la

matriz. De hecho, estas fuerzas de ligadura son una importante consideración en la elección de una combinación matriz-fibra. El esfuerzo último de los compuestos depende de que estas fuerzas de unión sean bastante grandes; una adecuada unión entre fibras y matriz es indispensable para que se pueda maximizar la transmisión de esfuerzos de la matriz a las fibras.

Aparte de todas estas funciones, generalmente es la matriz la que determina los límites de temperatura de los compuestos en muchas pruebas, y es la que controla su resistencia al medio ambiente.

Por lo general, sólo se utilizan metales y polímeros como materiales para las matrices, ya que la ductilidad es una característica importante en la matriz. Los metales que frecuentemente se refuerzan con fibras incluyen al aluminio y al cobre. De cualquier modo, los polímeros son utilizados como materiales para matriz en una gran diversidad de aplicaciones de materiales compuestos. Las matrices poliméricas más comunes incluyen todos los termoplásticos comerciales y los polímeros termoestables.

### **1.3.3 Materiales compuestos laminares.**

Los compuestos laminares incluyen recubrimientos muy delgados, superficies protectoras muy gruesas, revestimientos, elementos bimetalicos o bimetales, laminados y muchos otros.

Muchos compuestos laminares son diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión mientras se mantiene un bajo costo, alta resistencia o bajo peso. Otras aplicaciones importantes incluyen una superior resistencia al desgaste o abrasión, una mejor apariencia y características poco usuales de expansión térmica. Para producir estos compuestos se usa una gran variedad de

procesos de manufactura, como el laminado, la soldadura por explosión, la extrusión, la compresión y la soldadura.

Los **laminares** (o laminados) son capas de materiales unidos por un adhesivo orgánico. Un compuesto laminar muy conocido es la madera contrachapada o triplay, en el cual un número impar de chapas u hojas de madera vetada se apila de modo que la veta quede en ángulo recto en cada capa alternada.

Los laminares se utilizan como aislantes en motores, para hacer tablillas de circuitos impresos, en muebles de formaica, etc.

Los laminares combinan características poco comunes, incluyendo poco peso, inactivación a la flama, resistencia al impacto, resistencia a la corrosión, fácil conformabilidad y maquinabilidad, y características útiles de aislamiento.

Los **Recubrimientos duros** se conforman de capas superficiales duras resistentes al desgaste que son depositadas sobre materiales más suaves y dúctiles mediante técnicas de soldadura por fusión denominadas de recubrimiento protector.

Los **Metales de revestimiento** son compuestos metal-metal, un ejemplo de esto es la plata de acuñación de Estados Unidos. Una aleación Cu-80% Ni se une por ambos lados a una aleación Cu-20% Ni. La aleación de alto níquel da un color plata, mientras que el corazón predominantemente de cobre da un bajo costo.

Los **Bimetales** son 2 metales en un compuesto laminar que son utilizados principalmente como indicadores y controladores de temperatura, utilizando los coeficientes de dilatación térmica de cada metal.

Si dos tiras de metal están rígidamente unidas, la diferencia entre sus coeficientes de dilatación térmica provoca que en el elemento bimetálico se produzca una curvatura.

#### **1.4 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA**

Los plásticos impregnados con fibras de otros materiales ( siendo el carbón el más común ) también forman compuestos. La fibra de carbón tiene un módulo específico mucho más grande que el del vidrio. Tiene también una mejor resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión química, pero es más costoso y tiene una limitada utilización.

La industria aeroespacial utiliza ( y experimenta ) frecuentemente con compuestos reforzados con fibras de carbón, como componentes estructurales de sus aeronaves, aprovechando las propiedades de bajo peso que tienen estos compuestos. Todas las pruebas que se llevan a cabo en torno a estos materiales, tienen como objetivo producir nuevas estructuras que serán 20 ó 30% más ligeras que aquellas fabricadas con hojas metálicas.

Varios plásticos reforzados con fibras de boro han sido utilizados en varias aplicaciones; por ejemplo, algunas hojas del rotor de helicópteros son construidas usando fibras de boro en una matriz epóxica.

Una nueva generación de fibras poliméricas aramids de alta resistencia, se está empezando a utilizar para los compuestos usados en componentes



estructurales de bajo peso, teniendo su principal aplicación en la industria aeroespacial, marítima, y equipo deportivo.

Se han realizado muchas investigaciones alrededor de estos compuestos para estudiar la posibilidad de utilizar otros materiales para fibras; materiales tales como carburo de silicio y nitruro de silicio en matrices plásticas.

También incluidos en esta gama de materiales avanzados se encuentran los compuestos carbón-carbón, los cuales son compuestos de fibras de carbón embebidas en una matriz carburizada; estos materiales son diseñados principalmente para aplicaciones aeroespaciales donde se requiere una alta resistencia a la temperatura.

## **1.5 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METALICA .**

Debido a que los metales son muy dúctiles, han sido utilizados como materiales para matriz en muchos materiales compuestos; en la práctica, de cualquier modo, sus aplicaciones son algo limitadas. Recientemente, un número grande de compuestos reforzados con fibras continuas, han sido desarrollados a partir de materiales como aluminio, magnesio, cobre, y titanio; estos materiales se han utilizado como matriz y se han reforzado con carbón, carburo de silicio y boro. Las concentraciones de fibra normalmente fluctúan entre 20 y 50% del volumen total del compuesto. Probablemente el metal reforzado más común sea el compuesto borsic-aluminio. Las fibras continuas del borsic se preparan por el vapor depositado de una lámina de boro en unos delgados filamentos de tungsteno. Subsecuentemente se le da a esta fibra un recubrimiento delgado de carburo de silicio con el objeto de retardar las reacciones indeseables entre el boro y el aluminio.

Los compuestos con matriz metálica son más utilizados que los compuestos con matriz polimérica en aplicaciones de altas temperaturas; además, la alta resistencia y el alto módulo específico de los compuestos con matriz metálica, son posibles gracias a su relativamente baja densidad. Esta combinación de propiedades crea en estos materiales, un especial atractivo para ser usados en aplicaciones aeroespaciales, y en nuevas aplicaciones de ingeniería.

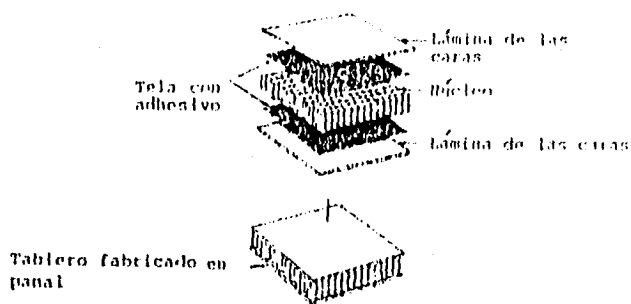
Las propiedades de resistencia a altas temperaturas y resistencia a la ruptura de algunas de las super aleaciones ( aleaciones base Ni y Co ), pueden aumentar con el reforzamiento por fibras usando metales refractarios tales como el tungsteno; conservando propiedades como la excelente resistencia a la oxidación por altas temperaturas y su resistencia al impacto. Los diseños que incorporan a estos compuestos, permiten la operación a altas temperaturas y aumentos en la eficiencia de las turbinas.

## **1.6 ESTRUCTURAS TIPO EMPAREDADO O SANDWICH**

Los materiales estructurales sandwich son una forma de laminado que se utiliza con frecuencia en la construcción de edificios y en aplicaciones aeroespaciales, la ventaja obvia es la combinación de un material externo que tiene alta resistencia, dureza, resistencia a la corrosión y resistencia a las altas temperaturas, con un núcleo que posee otras características: Baja densidad, baja conductividad térmica y baja transmisión acústica.

Usualmente este tipo de estructuras se encuentra en formada de tres elementos que se muestran en la figura 1.4, los cuales son:

- Un par de capas delgadas y resistentes.
- Un centro ligero y sólido empleado para separar las caras y transmitir cargas de una cara a otra.
- Un enlace, el cual es capaz de transmitir cargas cortantes y axiales entre el centro y las caras.



**Figura 1.4** Componentes de un emparedado de panel.

*Materiales de las caras.* - Estos materiales representan el reforzamiento del compuesto y tienen como función principal la disminución de esfuerzos a cortante, a tracción o a compresión que se presentan en el plano. Generalmente para formar las caras, se emplean los paños de fibra de vidrio impregnadas con resina ( comúnmente pretratadas ), grafito pretratado, aleaciones de aluminio, titanio, o acero inoxidable. Para llevar acabo la selección del material de las caras ( así como del centro, pegamentos u otros

materiales ) para alguna aplicación específica, es conveniente examinar las características de los materiales, tales como la flexibilidad, fragilidad, modo de fractura, durabilidad, permeabilidad, compatibilidad con remaches o pernos aún cuando no se vean involucrados directamente en el análisis de esfuerzo.

**Materiales del centro.** - Estos materiales tienen la función de una matriz, con la cual se busca estabilizar las caras y transmitir las cargas cortantes a través de su espesor y pueden ser tan rígidas y ligeras como sea posible, proporcionando propiedades uniformes en el medio ambiente.

Existen diversos tipos de materiales para el centro, entre los más conocidos se encuentran, la madera, espumas de polietileno, poliestireno, vinílicas, policarbonato, espumas epóxicas y fenólicas, también son utilizados como materiales los panales que generalmente se elaboran de: Papel "kraft", aleaciones de aluminio, papel de aramid, plástico reforzado con fibra de vidrio, titanio y acero inoxidable unidos por adhesivos de material delgado.

**Materiales adhesivos.** - Los adhesivos aplicados en estructuras sandwich constituyen una familia diferente de materiales, que aquellos que no requieren unir celdas abiertas con una lámina rígida y continua. Aún cuando estas diferencias son menos importantes con los nuevos materiales epóxicos modificados, algunos adhesivos producen vapores durante el curado provocando el rompimiento de las estructuras, debido a que el gas se abre camino en áreas de baja presión creando uniones pobres. Existen diversos tipos de adhesivos entre los cuales podemos mencionar:

- Fenólicas combinadas con vinilos, goma o epoxi. Empleadas donde se requiere alta resistencia, durabilidad y resistencia a altas temperaturas.
- Epóxicas modificadas con Nylon u otro polímero poliamídico. Provee excelente adherencia.
- Epóxicas modificadas con nitrilo: Proveen resistencia a la humedad.

El objetivo principal del diseño de las estructuras sandwich es reducir peso, incrementar dureza y utilizar menos material. Algunas veces se persiguen otros objetivos, tales como la reducción del maquinado, obtener una baja resistencia aerodinámica, reducción en el reflejo del ruido, etc.

## **1.7 MATERIALES COMPUESTOS HIBRIDOS**

Un compuesto reforzado con fibras, relativamente nuevo, es el compuesto híbrido, el cual se obtiene utilizando dos o más diferentes tipos de fibras en una matriz; los compuestos híbridos tienen una mejor combinación de propiedades a su alrededor, que los compuestos formados con un solo tipo de fibras. Una gran combinación de materiales son utilizados para fibras y matrices, pero en los sistemas más comunes, tanto el carbón como la fibra de vidrio son incorporados en una matriz polimérica. Las fibras de carbón son fuertes y relativamente duras, y proveen un reforzamiento de baja densidad; de cualquier modo, son muy costosos. Las fibras de vidrio no son tan costosas, pero no tienen la dureza del carbón. El compuesto híbrido de fibra de vidrio-carbón, es más fuerte y más duro, tiene una alta resistencia al

impacto, y puede producirse a un costo más bajo que cualquiera de los plásticos reforzados con carbón o con fibra de vidrio.

Existen numerosos procedimientos por medio de los cuales los diferentes tipos de fibras pueden combinarse, los cuales pueden afectar las diferentes propiedades. Por ejemplo, las fibras pueden ser alineadas e íntimamente mezcladas unas con otras; también pueden construirse compuestos consistentes de láminas, cada uno de los cuales están formados de un tipo de fibra, alternando las láminas unas con otras. Virtualmente todos los híbridos tienen propiedades anisotrópicas.

Cuando los compuestos híbridos son sometidos a esfuerzos de tensión, la falla que se presenta es usualmente no-catastrófica (no ocurre repentinamente). Las fibras de carbón son las primeras en fallar al tiempo en que la carga es transferida a las fibras de vidrio. Sobre la falla de las fibras de vidrio, la matriz debe sustentar las cargas aplicadas. Por lo tanto, la falla del compuesto, ocurrirá al tiempo que ocurra la falla de la matriz.

Las principales aplicaciones de los compuestos híbridos son en componentes de bajo peso para transporte terrestre, marítimo, y aéreo, en artículos deportivos, y componentes ortopédicos de bajo peso.

## **1.8 APLICACIONES Y POTENCIALES DE LOS COMPUESTOS**

Compuestos de fibra de vidrio muy baratos, son utilizados hoy en día en una gran variedad de aplicaciones, tales como las lanchas de fibra de vidrio, en aplicaciones aeroespaciales, etc. Sin embargo, muchos compuestos avanzados con reforzamiento de fibra de vidrio, habían tenido que ser

limitados en su uso comercial debido a su alto costo, que era consecuencia directa de la ausencia de técnicas avanzadas de manufactura.

Los compuestos reforzados con fibras, encontraron una rápida aceptación en la industria aeroespacial ya que satisfacían los requerimientos de esta industria y reducían los costos de mantenimiento. En los aviones comerciales encontraron aplicación por su bajo peso, y la imperiosa necesidad de ahorrar energía en los vuelos comerciales.

El alto rendimiento y las específicas aplicaciones que tienen los materiales compuestos, se han puesto a prueba numerosas ocasiones y han demostrado sus numerosas ventajas.

En algunos casos, las ventajas y los beneficios de los compuestos, no se deben a un tipo determinado de fibra; mejor dicho, se debe a la combinación de distintas fibras, o híbridos, que pueden ser necesarios para que el compuesto posea las propiedades que se requieren para algún diseño en particular.

Las ventajas de los materiales compuestos para aplicaciones específicas, abarcan un rango muy amplio.

\* Las propiedades de alta resistencia y rigidez de los polímeros reforzados con fibras incorporan componentes rotacionales, tales como dispositivos de almacenamiento de energía mecánica, que funcionan significativamente más rápido que aquellos hechos con aleaciones metálicas.

\* Las propiedades de resistencia al impacto, incluyendo la resistencia a la fractura y a esfuerzos residuales, son propiedades excelentes que se pueden obtener mediante la fibra aramid. Además, las fibras aramid pueden

convinarse con carbón o con fibras de vidrio para optimizar las propiedades de absorción de energía y otras propiedades, incluyendo el costo.

\* Reducen la disipación de energía y mejoran las propiedades de dureza y resistencia al desgaste, que se consiguen, por ejemplo, incluyendo fibras de carbón en una matriz polimérica. La aplicación más directa de esto es en las raquetas de tenis, para dar a la pelota una mayor velocidad.

\* Resistencia a la corrosión. Para llevar acabo diseños que involucren esta propiedad, es necesario tener en ciertas condiciones especiales al material; por ejemplo, a algunos metales ( como el acero al carbono ) frecuentemente requieren un recubrimiento polimérico con un pretratamiento especial y procesos de adhesión. Con los materiales compuestos, este problema puede ser resuelto fácilmente para muchas aplicaciones.

\* La permeabilidad de los materiales compuestos, ha sido comprobada en experimentos navales, y ha resultado ser tan buena como la resistencia a la corrosión y su durabilidad, reduciendo la frecuencia del mantenimiento a la cuarta parte que en estructuras metálicas.

\* La estabilidad dimensional de los compuestos, es importantísima en aplicaciones estructurales tales como equipo para rayos-x, elementos de máquinas-herramientas, micrómetros, calibradores y brazos mecánicos ( mejorando la exactitud de posicionamiento ).



\* **Excelentes propiedades de amortiguamiento pueden ser encontradas en los materiales compuestos. Las vibraciones acústicas y mecánicas pueden ser absorbidas en un tiempo 10% menor que en los metales convencionales.**

\* **Las propiedades mejoradas contra la fricción de los polímeros reforzados con fibras de carbón son sobresalientes. Los cojinetes representan una importante aplicación, ya que el coeficiente de fricción de los compuestos con carbón es aproximadamente 40% del coeficiente de fricción de los aceros lubricados.**

\* **La propiedad de absorber el calor de los compuestos carbón-carbón se utiliza en los sistemas de frenos, combinadas con bajo peso y resistencia a la fricción, tienen buena aceptación en aplicaciones aeroespaciales y en autos de carreras.**

\* **Expansión Térmica. Los materiales compuestos pueden elaborarse para cumplir con requerimientos de expansión térmica y para minimizar los esfuerzos térmicos. El compuesto aramid tiene un coeficiente de expansión térmica único ( negativo ) que debe ser reconocido.**

\* **La transparencia electrónica de los polímeros reforzados con fibra de vidrio, combinada con su bajo peso y su habilidad para formar compuestos, tienen una gran aplicación en sistemas de radar ultraligeros.**

\* **Guías de ondas. Por su capacidad de minimizar las pérdidas y estabilizar las fases altas, los plásticos reforzados con fibras de carbón son utilizados en conductores eléctricos para transmisiones por microondas en satélites.**

\* Las partes prototipo hechas de materiales compuestos, pueden producirse más rápidamente y más económicamente que con metales u otras formas de metal.

## CAPITULO 2

### **MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA**

#### **2.1 GENERALIDADES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA**

##### **2.1.1 Estructura de los polímeros.**

Los plásticos son materia prima de alto peso molecular (polímeros) que hoy en día se fabrican sintéticamente, regularmente no se encuentran en la naturaleza. Plásticos es un nombre acuñado o es un sobrenombre para:

- Termoplásticos
- Plásticos termofijos
- Elastómeros

##### **II.1.2 Plásticos termoplásticos.**

Se integran de macromoléculas lineales o ramificadas que por medio de calor hasta una temperatura determinada son fluibles y por enfriamiento son sólidos. Es posible reelaborarlos repitiendo el procedimiento. La elaboración de residuos puede ser regenerada y reciclada siempre y cuando no se dañe por una excesiva carga termo-química de temperatura. Los termoplásticos son soldables y su forma puede transformarse por calor.

Regularmente los polímeros son solubles en solventes específicos orgánicos. En la Figura 2.1 se muestra la agrupación de las cadenas moleculares en los termoplásticos.



**Figura 2.1** Agrupación de las cadenas moleculares en termoplásticos.

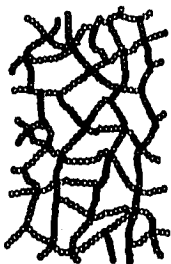
### **2.1.3 Plásticos termofijos.**

Los plásticos termofijos reaccionan en su elaboración formando redes de cadenas macromoleculares química y fuertemente reticuladas. La dureza de los plásticos termofijos es poco dependiente de la temperatura hasta un límite, en el que se descomponen termo-químicamente.

Los residuos de la elaboración no se pueden reelaborar, pero en algunos casos es posible usarlos como carga.

Los plásticos termofijos no son soldables, indisolubles en solventes orgánicos, y algunos expandibles.

En la Figura 2.2 se presenta la reticulación de los plásticos termofijos.



**Figura 2.2** Reticulación de los plásticos termofijos.

#### **2.1.4 Elastómeros.**

Los elastómeros se comportan elásticamente en un intervalo de temperatura de uso suficientemente amplio. Pocas tensiones afectan considerablemente su deformación y después de eliminar las tensiones casi alcanzan su tamaño original. Los elastómeros contienen polímeros con redes débilmente reticuladas.

La estructura de los elastómeros se presenta en la Figura 2.3.

La elaboración de los elastómeros se obtiene mediante "vulcanización" del caucho. Con la vulcanización se logra una reticulación de las macromoléculas. Los elastómeros se presentan en la mayoría de los casos en redes de cadenas moleculares débilmente reticuladas, las cuales se forman durante la elaboración. Con el incremento de la temperatura se comportan como elastómeros hasta la temperatura en que la descomposición química empieza.

La descomposición química es irreversible.



Figura 2.3 Redes moleculares de elastómeros.

## 2.2 MATRICES PLÁSTICAS.

Los factores de diseño que se pueden utilizar para la elaboración de matrices de plástico para una aplicación específica, se observan influenciados por condiciones de: Costo de material, elaboración y condiciones ambientales ( humedad y temperatura ) en las que finalmente se van a utilizar.

### 2.2.1 Matrices plásticas termoestables.

Este grupo de polímeros se caracteriza por sus entramados tridimensionales, los cuales se producen cuando hay más de dos sitios reactivos por monómero y cuando tiene lugar un eslabonamiento cruzado entre las cadenas lineales. De hecho este tipo de polímero se cura o endurece inicialmente con la aplicación de calor, de aquí el término termoestable.

Estos materiales generalmente se utilizan en estado líquido, de modo que se pueden moldear en cualquier forma. Además de su facilidad para

moldearse, la forma inicial líquida facilita la infiltración de la fase de refuerzo y mejora el mojado de la fibra.

Un beneficio importante de los aspectos de curado de las resinas termoestables es que estos materiales se pueden almacenar en estado semicurado. Por lo tanto estas resinas y las fibras de refuerzo se pueden preformar en los volúmenes fraccionarios apropiados como láminas, cintas, filamentos, mantas y otras formas. En esta etapa, se conoce al material compuesto como preimpregnado o prefijado.

Los polímeros termoestables fueron los primeros materiales matriciales que se utilizaron con refuerzo de fibra de vidrio. Las resinas termoestables que se usan comúnmente como materiales matriciales incluyen epóxicos, poliésteres, fenólicos y melaninas.

### **2.2.2 Matrices plásticas termoplásticas.**

Este tipo de polímeros están constituidos por cadenas moleculares lineales que no tienen eslabones cruzados. En lugar de esto las fuerzas de enlace secundario más débiles, esto es, las fuerzas de Van der Waals, por este motivo no son tan rígidas como las termoestables y muestran ablandamiento al calentarse. Esencialmente, las resinas termoplásticas se calientan hasta que se ablandan y fluyen, después se les moldea en la forma que se desee y se les permite enfriar.

Los termoplásticos que se usan más como matrices para plásticos reforzados con fibras incluyen los policarbonatos, poliamidas ( Nylon 66 ), poliestireno, polipropileno, polietileno.

En general los materiales poliméricos presentan resistencias bajas de tensión, en comparación con los metales y las cerámicas. Sin embargo como grupo también exhiben una gravedad específica relativamente baja, lo que los hace atractivos candidatos para aplicaciones de matrices de bajo peso.

Orgánicos naturales	Orgánicos sintéticos
Celulosa Algodón Yute Henequén Pulpa	Aramid Poliacrilonitrilo Poliamida Poliéster Rayón
Inorgánicos naturales	Inorgánicos sintéticos
Asbestos	Metálico (acero, aluminio) Boro Carbón, grafito Cerámica Vidrio

**Tabla 2.1** Rellenos y / o aditivos utilizados en compuestos

## 2.3 MATERIALES DE REFORZAMIENTO

Los reforzamientos utilizados con mayor frecuencia son: Fibra de vidrio, grafito, carbón y aramid ( tablas 2.1 y 2.2 ). Otros incluyen fibras termoplásticas ( poliéster, poliamidas, polietileno, polipropileno, rayón, etc. ),



whiskers ( de tipo cerámico ), algodón, pulpa de madera y henequén. Formas no fibrosas ( polvos de carbonato de calcio, mica, aserrín, minerales, etc. ) así como hojuelas y canicas de vidrio, cerámica, mica, etc. Con hojuelas o formas similares la razón de aspecto ( razón de largo contra ancho ) puede ser de diez a uno obteniendo elevadas propiedades mecánicas.

Tipo de fibra de reforzamiento.	Gravedad específica	Densidad	Esfuerzo de tensión MPa.	Esfuerzo específico ( x 10 cm )	Módulo elástico GPa.
Vidrio					
E	2.54	2.54	3448	13.79	72.4
Monofilamento	2.54	2.54	2565	10.28	72.4
S	2.48	2.49	3792	15.65	65.5
Boro	2.63	2.63	3103	12.04	400
Grafito					
De alto esfuerzo	1.8	1.6	2758	15.62	262
De alto módulo	1.94	1.96	2069	10.9	379
Intermedio	1.74	1.74	2482	14.5	166
Orgánico: Aramid	1.44	1.43	2758	19.58	124

**Tabla 2.2** Propiedades de las fibras de reforzamiento más convencionales

Los reforzamientos fibrosos pueden ser en forma de fibra cortada, mata porosa, tela tejida ( fig. 2.4 ) o fibras / filamentos continuos. Aparte de la estructura de los plásticos, la mayoría de los compuestos contienen muchos reforzamientos diferentes incluyendo combinaciones con aditivos y/o rellenos que tienen efectos significativos en las propiedades, elaboración y costos. Con los diferentes tipos de reforzamiento, es posible tener una considerable libertad en la selección de un tipo particular de reforzamiento o la

combinación de ellos a fin de obtener las propiedades específicas requeridas en un compuesto.

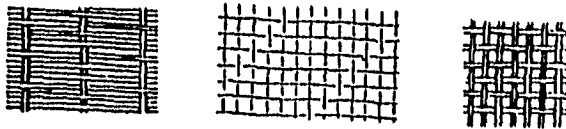


Figura 2.4 Representación esquemática de fibras tejidas.

La relación del reforzamiento con el plástico puede ser en muchas proporciones para impartirle diferentes propiedades; esta relación puede ser identificada como porcentaje en peso o porcentaje en volumen (fig. 2.5, 2.6 y 2.7, tabla 2.3). Puesto que la viscosidad de los reforzamientos, aditivos y rellenos plásticos son usualmente diferentes, esto es importante para especificar el porcentaje tanto en peso como en volumen.

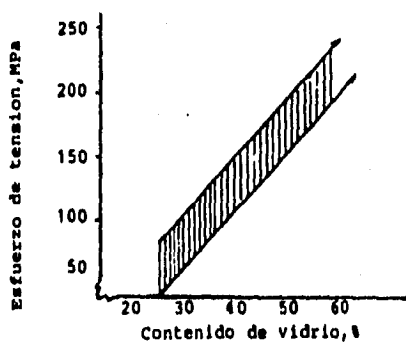


Figura 2.5 Efecto en el esfuerzo vs. contenido de vidrio para compuestos de

resina poliéster - fibra de vidrio.



**Figura 2.6** Efecto del empaquetado de fibras: (a) Empaquetado hexagonal compacto con 90.8% de vidrio en volumen y 95.6% de fibra en peso; (b) El empaquetado cuadrado tiene arriba del 78.5% de vidrio en volumen y 88.8% en peso.

Propiedad	Fibra de vidrio ( % en peso )			
	0	20	40	60
Gravedad específica	1.14	1.28	1.46	1.7
Esfuerzo de tensión MPa.	12	19	31	33
Elongación a la tensión (%)	60	3.5	2.5	1.5
Esfuerzo flexionante MPa.	15	29	42	50
Módulo flexionante GPa.	4	9	16	26
Esfuerzo de compresión MPa.	4.9	23	28	30
Contracción del molde	15	5	3.5	2

**Tabla 2.3** Ejemplo del efecto en las propiedades de diferentes concentraciones de fibra de vidrio sobre un compuesto plástico.

Los aditivos o rellenos normalmente son incluidos en compuestos por razones tales como la reducción de los costos. El carbonato de calcio puede proveerle facilidad al compuesto para fluir durante su elaboración mejorando sus propiedades. La adición de pequeños porcentajes de piedra caliza puede incrementar el módulo de elasticidad y la dureza de las paredes. Las reacciones sinérgicas son extremadamente benéficas tanto en propiedades

como en costos, tanto como para plásticos reforzados termoestables como termoplásticos.

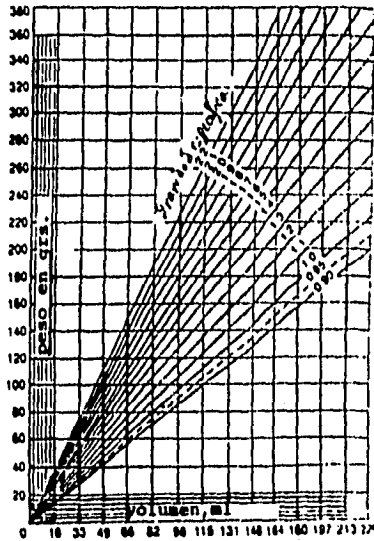


Figura 2.7 Gravedad específica contra mililitros/gramos

Los aditivos o rellenos pueden proporcionar ventajas, pero desafortunadamente ellos pueden impedir el flujo o tener otros efectos en el proceso. Ellos frecuentemente contribuyen al calentamiento por fricción y en la conducción térmica durante los ciclos de calentado y enfriado con la cohesión de plastificación en el modelado por compresión o inyección. El resultado es la aceleración del ciclo del modelado, un efecto particularmente notorio con polvos de hierro y carbón, siempre que se dificulta la realización de la pieza en el molde, el ciclo de modelado es incrementado. Este problema es comúnmente relacionado con el uso de lubricantes.

La presencia de rellenos puede tener un fuerte efecto sobre las propiedades del flujo, por ejemplo, cargando rellenos de 20 / 40%, en volumen, la viscosidad es incrementada significativamente. Agentes acopladores que son utilizados con rellenos pueden modificar el funcionamiento de los compuestos rellenos, por ejemplo, utilizando titanio como agente acoplador sobre el comportamiento del polipropileno relleno con carbonato de calcio (50% en peso) provocando una reducción dramática en la viscosidad reduciendo las propiedades mecánicas. Rellenos particulados y especialmente reforzados fibrosos generalmente incrementan su viscosidad e impiden el flujo. Este efecto se incrementa con fibras largas y normalmente requiere de elevadas temperaturas y/o presiones para permitir el modelado en forma satisfactoria. Otro aditivo que puede impedir el flujo es del tipo, y más comúnmente utilizado, de eslabonamiento cruzado y puede ser un catalizador o endurecedor de termofijos.

## **2.4 SELECCION DE MATERIALES PARA COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA.**

Con los materiales compuestos poliméricos se tiene una gran ventaja para optimizar los diseños tomando en consideración la composición de los materiales, orientación estructural (Fig.2.8) y consideraciones de modelado (Fig.2.9). Básicamente un compuesto es una matriz (de material polimérico) y reforzamiento que generalmente se encuentran en interfase (Fig.2.10). Esto es un acercamiento práctico en la selección de los materiales la cual no difiere

de la forma de seleccionar cualquier otro material - metal, cerámica, madera, etc.

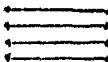
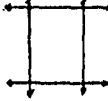
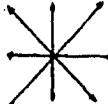
Orientación unidireccional de las fibras	el porcentaje de fibra incrementa el esfuerzo en dirección de la orientación de la fibra		<i>Tipos de reforzamiento:</i> Filamentos <i>Procesos:</i> Pultrusión, arrollamiento de filamentos, moldeado por transferencia e inyección de resina
Orientación bidireccional de las fibras			<i>Tipos de reforzamiento:</i> Filamentos, tejidos, entretejidos, telas. <i>Procesos:</i> Arrollamiento de filamentos, moldeado por contacto, compresión inyección, saco de vacío, estampado, pultrusión.
Orientación multidireccional de las fibras			<i>Tipos de reforzamiento:</i> Hebra cortada, fibra molida, mata de fibra. <i>Procesos:</i> Moldeado por contacto, compresión, inyección, proyección, saco de vacío, autoclave, moldeado por transferencia e inyección de resina

Figura 2.8 Relación entre orientación de las fibras y el proceso.

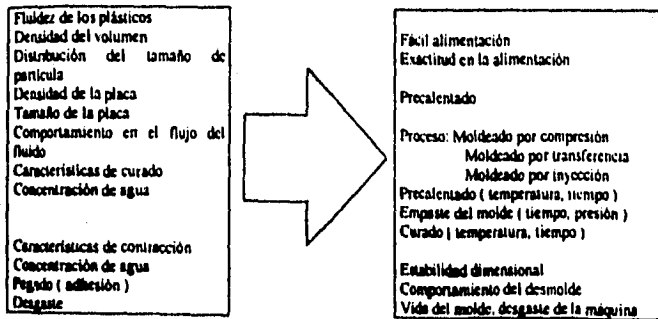


Figura 2.9 Correlación de la elaboración del compuesto con el comportamiento de las propiedades del producto.

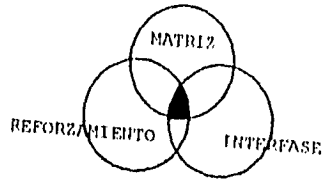


Figura 2.10 Interrelación entre los constituyentes de un material compuesto.

Los compuestos han sido diseñados en muchos productos diferentes por más de un siglo, pero mejores materiales compuestos aparecieron a partir de 1940, estos materiales proporcionan un gran rango de propiedades para condiciones ambientales de todo tipo, cada uno de ellos con un amplio rango de propiedades para los diferentes compuestos. Estas propiedades incluyen, altos módulos, resistencia a la humedad, resistencia a la fatiga (Fig.2.11), resistencia al impacto, resistencia química, resistencia al deslizamiento, compatibilidad de la matriz con el reforzamiento (expansión térmica y contracción durante el proceso y durante el servicio) y acústicas. La selección de las propiedades del compuesto es un "elemento" importante en el funcionamiento de los productos a bajo costo.

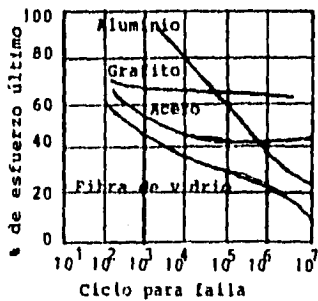


Figura 2.11 Propiedades de fatiga en compuestos de poliéster grafito, fibra de vidrio, acero y aluminio.

Los plásticos sin reforzamiento generalmente tienen propiedades moderadas en los esfuerzos y poca rigidez como medida para el módulo elástico. Para productos de tipo estructural, ellos son frecuentemente combinados con otros materiales de reforzamiento para desarrollar mejores propiedades.

En la selección de un compuesto, para suministrar requerimientos de funcionamiento a bajo costo, es importante relacionar el funcionamiento para procesarlo lo cual incluye factores como:

Condiciones de modelado y requerimientos de forma, que son críticos en la definición de las propiedades de las piezas.

#### **2.4.1 Materiales de construcción.**

En la definición un producto que combina más de dos materiales es un compuesto. Los materiales incluyen plásticos, metales o concreto con la matriz, este capítulo comprende sólo materiales plásticos utilizados como matriz. Desde 1940 se han desarrollado programas (con uso limitado a la producción) que incluyen el modelado por compresión e inyección de reforzamientos metálicos pulverizados así como vidrio como matriz, los cuales utilizan pequeños montones de plástico como ligamento para permitir el flujo y compactación de los compuestos. Los reforzamientos incluyen acero inoxidable en forma de alambre y otros.

Los compuestos plásticos utilizados y discutidos a través del mundo son



identificados con diferentes términos, dependiendo del mercado pasado y presente de la industria como plásticos reforzados, reforzamiento termoestable, reforzamiento termoplástico, plásticos laminados, plásticos reforzados con fibras cortas, plásticos reforzados con relleno, plásticos reforzados de ingeniería, compuestos plásticos reforzados y compuestos estructurales. Todos ellos identifican o denotan la combinación de materiales plásticos y materiales de reforzamiento. La combinación produce materiales únicos que pueden ser tiesos, resistentes, duros, elásticos, rígidos, opacos, conductores de la electricidad, reductores de costos o cualquier otra característica que se desee. Desafortunadamente no se pueden obtener todas estas características en un compuesto; utilizando combinaciones es posible obtener algunas (tenacidad, rigidez, fuerza, resistencia química, etc.).

Los plásticos reforzados normalmente contienen aditivos o rellenos, observe que algunas veces los reforzamientos son llamados aditivos o rellenos y también a la inversa. Los reforzamientos normalmente representan fibras, filamentos, whiskers y hojuelas de alto funcionamiento. Estos diferentes tipos de reforzamiento han dado beneficios a la industria por más de un siglo.

## **2.5 ELABORACION.**

El moldeado es el proceso de formado más importante para materiales compuestos. En diversas aplicaciones la forma básica del compuesto es producida por moldeado, sin embargo debido a que estos materiales están

formados por más de un material, el proceso puede ser complicado. Esto es especialmente cierto para compuestos reforzados con fibras, debido a que son rectas y rígidas que inherentemente resisten el formado en nuevas figuras, esto es, por consiguiente, la función del material de la matriz que es darles nueva forma y mantenerlas en la nueva figura.

El material de la matriz determina la moldeabilidad del compuesto que por la contribución de las fibras es frecuentemente constante y siempre resistiendo el moldeo. Por ejemplo las matrices poliméricas (también llamadas plásticas y de resina) son relativamente fáciles de moldear en comparación con las matrices metálicas y cerámicas. Esta facilidad ha conducido a una posición dominante a las matrices poliméricas en compuestos avanzados ya que son fáciles de moldear debido a su forma líquida o porque pueden ser moldeadas relativamente a bajas temperaturas, generalmente por debajo de los 250°C, mientras que los metales son moldeados a temperaturas alrededor de los 700°C y los cerámicos a 1000°C o más. Por lo tanto el estudio del moldeo de compuestos es casi exclusivamente el estudio de matrices poliméricas reforzadas.

Las matrices poliméricas pueden ser divididas en dos categorías: las termofijas y las termoplásticas. Las termofijas son las más comunes en compuestos y son caracterizadas por su eslabonamiento cruzado en la parte final del curado, sin embargo ellas son puestas sobre el molde sin curar o parcialmente curadas y pueden variar en su consistencia de líquido a viscoso sólido. El molde y el material son entonces calentados para efectuar el

curado, después del cual el material toma el eslabonamiento cruzado y la forma del molde. Una vez efectuado el eslabonamiento no es posible volver a moldear el material. Los polímeros termoplásticos comúnmente son menos utilizados en compuestos y son caracterizados por no tener eslabonamientos cruzados, por tal motivo estos materiales pueden calentarse repetidamente y volverse a formar por moldeo. Los métodos más comunes para el moldeo de termoplásticos involucra el forzado de resina fundida (ésta es normalmente sólida a temperatura ambiente) en el molde y enfriándola en éste para solidificar la resina en la forma deseada. Debido a este proceso de enfriado toma poco tiempo el curado. Con la introducción de los termoplásticos, que pueden ser utilizados a temperaturas relativamente altas (sobre los 300°C) y que tienen, en varios casos, propiedades superiores a los termofijos, su uso está creciendo rápidamente en materiales compuestos.

Debido a las grandes diferencias entre termofijos y termoestables, los métodos de moldeo son usualmente divididos en dos grupos; unos apropiados para termofijos y otros para termoplásticos.

### **2.5.1 Procesos de manufactura para compuestos termofijos.**

- 1.- Procesos en molde abierto.
  - a.- Moldeo por contacto.
  - b.- Moldeo por proyección.
  - c.- Moldeo por saco de vacío.
  - d.- Moldeo por autoclave.

- e.- Arrollamiento de filamentos.
- f.- Moldeado por centrifugación.

---2.- Procesos en molde cerrado.

- a.- Moldeado por compresión.
- b.- Moldeado por inyección de resina.
- C.- Pultrusión.

Algunos de los métodos utilizados por termofijos y termoplásticos, no son utilizados con reforzamiento de fibras pero son aceptables para reforzamientos con whisker y partículas.

Diversos métodos de colocación de fibras son comunes para muchas de las técnicas de moldeado. El método de colocación de fibras en el molde es importante para la determinación de las propiedades físicas de la pieza y tiene alguna importancia en la determinación del método de moldeado.

#### **2.5.1.1 Moldeado por contacto (hand lay-up).**

Una técnica simple y probablemente la primeramente usada para fabricar un material compuesto, utiliza la colocación manual, sobre el molde, de fieltros de fibra entretejida o cortada, impregnada a brocha con resina líquida y pasando un rodillo se van colocando capas hasta obtener el espesor deseado, el moldeado cura sin presión ni calor, ver figura 2.12. Este método

es usualmente utilizado en la fabricación de compuestos en base a poliéster - fibra de vidrio.

Ventajas y desventajas del moldeado por contacto.

Ventajas: La herramienta puede ser cualquier material que tome la forma bajo presiones mínimas.

El curado no necesita horno.

El trabajador puede ser adiestrado fácilmente.

La inversión necesaria en equipo es mínima.

Cualquiera de los materiales que son formados pueden ser utilizados como molde.

Es fácil efectuar cambios de diseño.

Pueden ser fabricados artículos grandes y complejos.

Desventajas: El proceso requiere trabajo intenso.

Solamente una superficie es tersa.

La calidad está sujeta a la pericia del trabajador.

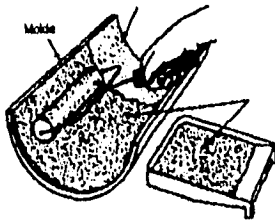
Requiere largos periodos de curado.

Es un proceso de bajos volúmenes de producción.

Es difícil lograr uniformidad en todas las partes del producto.

El factor de sobranes es alto.

Las propiedades físicas son bajas comparadas con otros procesos.



**Figura 2.12** Moldeo por contacto.

#### **2.5.1.1.1 Método de preimpregnado.**

El método de preimpregnado puede, en referencia, considerarse como una extensión del moldeo por contacto. En el preimpregnado, las fibras son inicialmente arregladas en cintas unidireccionales o en tejidos, las cuales son impregnadas con resina, parcialmente curadas y enrolladas, ver figura 2.13.

Los materiales preimpregnados son utilizados en métodos que requieren un control cuidadoso de la proporción en los contenidos de fibra y resina; así como en piezas donde el funcionamiento de las partes es crítica. El método de preimpregnado es mucho más preciso que el método de contacto.

Ventajas y desventajas del método de preimpregnado.

Ventajas: El curado (endurecimiento) de la resina es controlado durante el premezclado.

La distribución de la resina por unidad de área es estrictamente controlada durante la elaboración de la cinta. Esto favorece la distribución de la resina en la etapa final.

Los problemas asociados a la manipulación de la resina líquida son eliminados con la manufactura de preimpregnados.

El problema de baja productividad es reducido con el uso de maquinaria automatizada para algunas partes.

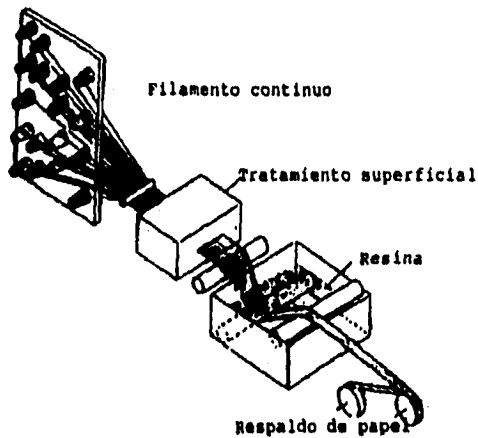
Desventajas: Es un proceso lento y de trabajo intenso comparado con métodos automatizados.

Es dificultoso para formas complejas.

La razón de rechazo es potencialmente alto.

El equipo de curado es caro (autoclave).

Son necesarios largos ciclos de curado.



**Figura 2.13** Manufactura de preimpregnados.

### **2.5.1.2 Moldeado por proyección (spray-up).**

Las fibras cortadas y la resina son simultáneamente depositados en un molde abierto, las fibras son alimentadas de un chorro de resina que es depositada en el molde por medio de dos sistemas de rociado: 1.- Una boquilla de rociado arroja resina premezclada con catalizador, o catalizador únicamente, mientras otra boquilla arroja resina premezclada con catalizador, ver figura 2.14, 2.- resina y catalizador son suministrados dentro de una pistola de mezclado mediante una boquilla de rociado.

El moldeado por proyección es realmente una extensión automatizada del moldeo por contacto. Las mismas consideraciones respecto al apropiado rolado del material, concentración del catalizador y tiempo de curado son aplicables.

Ventajas y desventajas del moldeado por proyección.

Ventajas: La herramienta puede ser cualquier material que tome la forma bajo presiones mínimas.

El curado no necesita horno.

El trabajador puede ser adiestrado fácilmente.

La inversión necesaria en equipo es mínima.

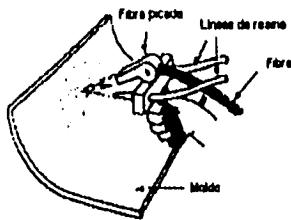
Cualquiera de los materiales que son formados pueden ser utilizados como molde.

Es fácil efectuar cambios de diseño.

Pueden ser fabricados artículos grandes y complejos.



Desventajas: El proceso requiere trabajo intenso.  
Solamente una superficie es tersa.  
La calidad está sujeta a la pericia del trabajador.  
Requiere largos periodos de curado.  
Es un proceso de bajos volúmenes de producción.  
Es difícil lograr uniformidad en todas las partes del producto.  
El factor de sobrantes es alto.  
Las propiedades físicas son bajas comparadas con otros procesos.



**Figura 2.14** Moldeo por proyección.

Los métodos de moldeos incluyen: el moldeo en saco de vacío (figura 2.15), moldeo en saco a presión y moldeo en autoclave (figura 2.16). En estos procesos se preimpregnan capas de fibras, normalmente capas unidireccionales, con resina y se curan parcialmente. Las hojas de preimpregnado se colocan en la superficie del molde en orientaciones determinadas.

### **2.5.1.3 Moldeo en saco de vacío.**

La unión por saco de vacío es mostrada en la figura 2.15, el procedimiento se describe a continuación:

- 1.- Se prepara el molde para recubrirlo adecuadamente con el saco.
- 2.- Se traslada el material preimpregnado al molde, abriendo el saco para prevenir contaminación por condensación de agua.
- 3.- Se forma las camas de material, una sobre otra hasta obtener el espesor prescrito sobre el molde.
- 4.- El material es frecuentemente poroso para permitir que la resina fluya a través de él.
- 5 - El contenido de resina de la parte final depende de las características del material para absorber resina.
- 6 - El exudado no ocasiona arrugas en el ensamble cuando es efectuado el vacío.
- 7.- El saco es una capa que controla el movimiento ascendente de la resina e impide que la resina del fondo obstaculice la línea de vacío. El saco, debe limitar el paso de resina y aire.
- 8.- El material de respiro actúa como un distribuidor de aire filtrando gases y actuando como un amortiguador entre las arrugas del saco y la superficie. La capa de respiro es altamente porosa, los materiales típicos son: Fibra de vidrio, poliéster y algodón.
- 9.- Sellando el saco de vacío con cinta alrededor del molde, este delicado material hace un sello suave con la película del saco.

10.- El saco de vacío detiene la unión en los materiales mediante la unión del saco a la base del molde y a través de una manguera el vacío suministra la fuerza de enlace.

El saco de vacío puede ser hecho de cualquier película de plástico que sea lo suficientemente dura para mantener el vacío y conformar la unión, además debe soportar la temperatura de curado sin degradarse. En la práctica el material más comúnmente utilizado es el nylon.

Ventajas y desventajas del moldeado en saco de vacío.

Ventajas: Los volátiles pueden ser removidos fácilmente.

El contenido de huecos es más bajo que en el proceso por contacto.

Desventajas: El saco para formas complejas se dificulta.

El interior de la superficie no es tan bueno como el obtenido con el proceso de moldeado por compresión.

El ciclo de curado es largo comparado con el del moldeado por compresión.

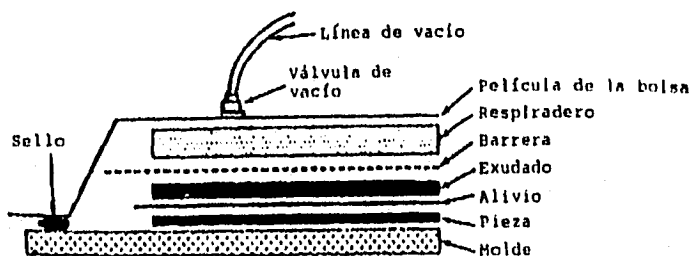


Figura 2.15 Moldeado en saco de vacío.

#### **2.1.4 Moldeado en autoclave.**

Una de las mayores desventajas y limitaciones del curado sin presión es el alto contenido de huecos en las piezas. En muchas aplicaciones, especialmente para la aerospacial, el contenido de huecos debe ser menor al 2% y en algunos casos inferior al 1%, este contenido de huecos puede ser obtenido mediante el presurizado de la pieza durante el curado. El método más común para presurizar piezas grandes, especialmente en aquellas donde un lado es expuesto a necesidades específicas, es un autoclave. Los autoclaves son recipientes a gran presión dentro del cual se coloca la pieza completa; el autoclave permite mediante aplicación de presión y calor calentar la pieza y el molde de esta manera la presión empuja las partes de la pieza hacia el molde cuando ésta es curada.

Los moldes utilizados en el autoclave son generalmente hechos de metal o de compuestos. Los moldes de metal son más permanentes que los moldes típicos de contacto y deben, desde luego, soportar las fuerzas del autoclave, el cual suministra presión más allá de la disponible sólo con vacío y por tanto dan gran compresión y eliminan los huecos.

Los autoclaves permiten la aplicación simultánea de calor y presión (y vacío si una línea de vacío es guiada directamente hacia la pieza). La mayor dificultad de los autoclaves es su alto costo de capitalización. Los autoclaves pueden ser de 10 metros de diámetro y 30 metros de largo, lo concerniente en la compra y operación de autoclaves es la uniformidad del flujo de calor (para

evitar esfuerzos térmicos) la integridad del cierre, asegurando que el aislamiento es bueno, obteniendo un adecuado control de operación y garantizando que no ocurrirá fuego como resultado de la alta temperatura y presión (un gas inerte es puesto dentro del autoclave para reducir el peligro de fuego). El calentamiento puede ser eléctrico, por gas, por circulación de un aceite caliente o por vapor (si los requerimientos de energía no son muy altos). El principal uso de la presión no es para disminuir volumen sino para asegurar que las partes sean mantenidas en contacto íntimo. El tipo, composición y tamaño del molde puede afectar el curado si la razón de calentamiento de este molde varía mucho. En algunos casos el molde es calentado independientemente lo cual puede reducir el problema del calentamiento variable pudiendo acelerar el curado y lograr una unión total con una mayor temperatura de curado.

Moldes especiales pueden ser requeridos en el curado en autoclave para prevenir fallas en las piezas, detalles en el aplastamiento del panel, en el autoclave se produce una pieza superior en comparación con la obtenida por el método de contacto. Por consiguiente los autoclaves son extensamente utilizados para piezas aerospaciales de alto funcionamiento; para piezas complejas de hecho, éste es el principal método empleado.

**Ventajas y desventajas del moldeo en autoclave.**

**Ventajas:** La cantidad de huecos puede ser muy baja.

La definición de las partes puede ser muy precisa aunque a menudo no tan buenas como en el moldeo por compresión.

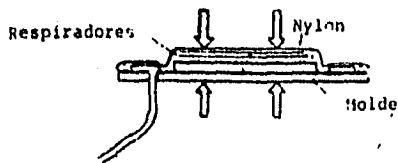
Piezas grandes pueden ser hechas si el autoclave es lo suficientemente grande.

El saco de vacío puede ser hecho en conjunción con el moldeado en autoclave.

Desventajas: Los costos del autoclave son altos.

Los ciclos de curado son a menudo muy largos.

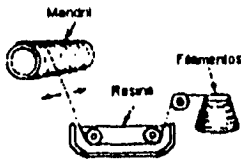
Piezas muy gruesas requieren múltiples ciclos de curado.



**Figura 2.16** Moldeado en autoclave.

### **2.5.1.5 Arrollamiento de filamentos.**

El arrollamiento de filamentos es una operación simple, en la cual reforzamientos continuos impregnados con resina son arrollados sobre un mandril giratorio, ver figura 2.17, el mandril puede ser cilíndrico, redondo o cualquier otra forma curva. El reforzamiento puede ser enrollado sobre la superficie del mandril en forma de cintas o filamentos en forma repetitiva.



**Figura 2.17** Arrollamiento de filamentos.

Las fibras más comúnmente utilizadas en el arrollamiento de filamentos son: La fibra de vidrio, por su bajo costo, estabilidad dimensional, sus esfuerzos y módulos moderados y su facilidad para manipularse; y las fibras de Aramid, que son utilizadas debido a que sus esfuerzos y módulos exhiben gran consistencia con un bajo coeficiente de variación, permitiendo con esto grandes diseños; fibras de grafito que permiten gran variedad de esfuerzos y módulos.

Las resinas utilizadas en el arrollamiento de filamentos son: Epoxis, poliésteres, fenólicos, silicones y poliámidos; que tienen la misma función en las piezas, que las hechas por cualquier otro método, permitiendo que las piezas se mantengan en su posición, es un auxiliar en la distribución de la carga, proteger al filamento de la abrasión (durante el arrollamiento y en el compuesto), controla las propiedades químicas y eléctricas del compuesto.

*Impregnación.*- La resina y el reforzamiento son unidos en el proceso de impregnación, los procesos más comúnmente utilizados son: Preimpregnado, arrollamiento húmedo y reenrollado húmedo.

*El proceso de enrollamiento.*- Los dos procesos básicos de arrollamiento son identificados como polar y helicoidal. Cada uno de los métodos produce un patrón distintivo, en el polar (también llamado planar) el mandril permanece estacionario mientras que la fibra es alimentada alrededor del eje longitudinal inclinado en el ángulo prescrito de arrollamiento. Este circuito es descrito como un circuito simple de envolver.

En el modo helicoidal el mandril gira continuamente mientras la fibra es alimentada de atrás hacia adelante. La velocidad del recorrido y la rotación del mandril son regulados por lo general por el ángulo de arrollamiento deseado. El patrón normal es un multicircuito helicoidal.

Ventajas y desventajas del arrollamiento de filamentos.

Ventajas: La alta repetitividad en la colocación de las fibras (capa sobre capa y pieza sobre pieza).

La capacidad para utilizar fibras continuas sobre un área sin empalme y para orientarlas fácilmente en dirección de la carga.

Eliminación de los costos del autoclave.

Pueden ser formadas piezas grandes.

Gran número de piezas a bajo costo.

Relativamente bajos costos en material (al poder utilizar la fibra y resina como preimpregnado).

Desventajas: La forma de las piezas es semejante al mandril.

Incapacidad para invertir la curvatura.

Incapacidad para cambiar fácilmente la trayectoria de las fibras.



Necesita mandril, el cual puede ser complejo y costoso.

### 2.5.1.6 Moldeado por centrifugación

Este es un proceso en el cual una forma laminada cilíndrica, cónica o parabólica puede ser compactada por la acción de las fuerzas centrífugas aplicadas por la rotación a lo largo de un eje longitudinal, ver figura 2.18.

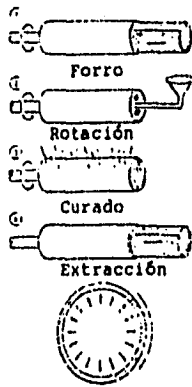


Figura 2.18 Moldeado por centrifugación.

## 2.5.2 PROCESOS EN MOLDE CERRADO

### 2.5.2.1 Moldeado por compresión.

Tres tipos de moldeo por compresión pueden ser discutidos, esto es: Moldeado de preformas, moldeo de compuestos en hojas (SMC) y moldeo de compuestos en bulto (BMC). Estos tres métodos utilizan el

mismo equipo de moldeado de alta presión pero difieren en la forma en la que se coloca el material en el molde para formar las piezas. Los materiales más comúnmente moldeados por esta técnica son, reforzamiento con fibra de vidrio y poliéster o epoxi como matriz. Las fibras cortas que son característica del moldeado por compresión generalmente excluye el uso de esta técnica para piezas de alto funcionamiento.

El equipo es una prensa (normalmente empujada hidráulicamente) que es adaptada con dados hembra y macho (de acero para herramientas) y debe ser altamente pulido y cromado para lograr un acabado fino. Las presiones desarrolladas por la prensa están en el rango de los megapascals, que es muy útil para obtener buena uniformidad en las piezas, ver figura 2.21.

El moldeado por compresión puede ser utilizado cuando la condensación de polímeros (tales como los fenólicos) son moldeados, el condensado (normalmente agua) debe ser admitido como filtro para evitar las bolsas de gas. Por lo tanto, después que el molde es cerrado, éste es abierto por escasos segundos para permitir la salida de los gases formados por el calentamiento del condensado. Este proceso es conocido como desgasificado del molde.

#### **II.5.2.1.1 Moldeado de preformas.**

En el moldeado de preformas, una maraña seca de material de reforzamiento es preformada en la forma aproximada de la pieza y colocada sobre el molde abierto.

La resina es agregada sobre la preforma y mediante los dados son entonces prensados juntos y calentados para curar la pieza. Durante el proceso la resina fluye impregnando la preforma haciéndose dura. La pieza es retirada después de abrir el molde ( a menudo con la ayuda de un pasador de manera violenta, el pasador es fabricado en el molde ). Una variación del método estándar, consiste en el soplado de fibras cortadas preimpregnadas sobre la preforma y entonces curadas.

Mediante altas presiones puede formarse el material sobre el molde, un elevado porcentaje de fibra puede ser utilizada en el proceso, resultando una pieza fortalecida ( asumiendo que la dimensión de la fibra es la misma ). El tiempo de curado en el molde depende de la temperatura, el tipo de resina, la geometría de la pieza y la eficiencia del molde para calentarse y enfriarse ( normalmente esto varía de 2 a 20 minutos ). El ciclo de curado puede ser muy corto y es posible obtener con esto una alta producción.

Existen diversos métodos disponibles para hacer preformas. En el método de fibras directas, los cortes de ésta y un adhesivo soluble al agua ( para sujetar las fibras en su sitio ), son sopladas frente al formado, el preformado es tamizado con ayuda de un plato giratorio para recibir la fibra uniformemente. Este método, ilustrado en la figura 2.19, emplea un preformado como tamiz, que es colocado dentro de una caja de vacío, las fibras cortadas y rociadas con adhesivo, que es chupado por el tamizado de la preforma por vaciado del aire.

Algunas preformas pueden ser hechas, simplemente, mediante el corte de la forma deseada sobre el tejido. Cuando se requieren hilados de vidrio, éstos pueden ser utilizados para dar puntadas y unir segmentos. Este método se

conoce como "patrón de corte", y es utilizado ante todo para piezas complejas que requieren variación de espesor o en piezas decorativas.

#### **2.5.2.1.2 Compuestos moldeados en hojas ( SMC ).**

El compuesto moldeado en hojas ( SMC ), es un material laminado, que es hecho por fibras cortas depositadas sobre una película plástica (normalmente polietileno), sobre la cual se deposita una mezcla de resina, como se muestra en la fig. 2.20. Otra película que también ha sido cubierta con una mezcla de resina es colocada sobre la otra a tope y entonces el sandwich de resina y fibra es pasado entre rodillos de compactación para mojar las fibras y efectuar la mezcla de los constituyentes. Este material es entonces curado suavemente ( también llamado estado B o madurado ) y embobinado para ser utilizado posteriormente.

Un moldeado típico de compuestos en hojas incorpora alrededor del 30 al 50% de fibras (generalmente poliéster ) y del 25 al 45% de relleno (generalmente arcilla, alúmina o carbonato de calcio). Algunos cuidados deben de tenerse en este material ya que tiene una vida limitada, por tal motivo requiere ser refrigerado antes de ser utilizado. El eslabonamiento cruzado del estireno es algo volátil, por lo cual se debe tener cuidado con las flamas.

Después de elaborado, el material SMC tiene una textura semejante a la del cuero, cuando va a ser moldeado es cortado de la bobina retirándosele

la película plástica y el material es cargado en la prensa de moldeo por compresión, ver fig. 2.19. Piezas tan grandes como carrocerías son hechas de esta manera. El proceso SMC utiliza presiones de 34 MPa aproximadamente, con temperaturas de 120 a 200 °C, con ciclos de curado de algunos minutos.

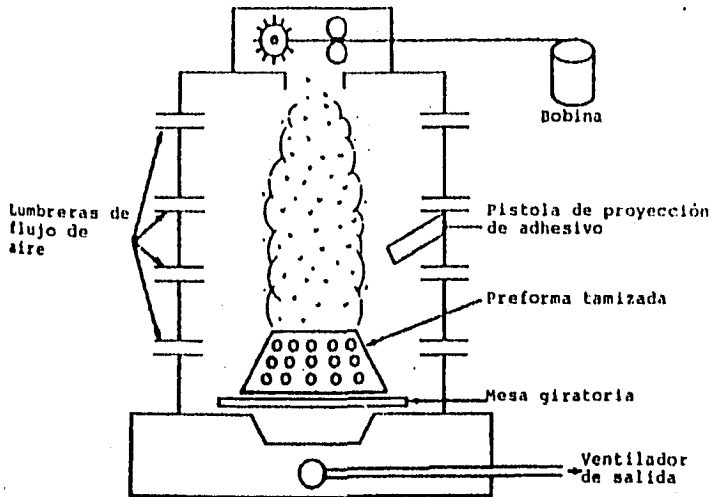


Fig. 2.19 Moldeado pleno para preformas.

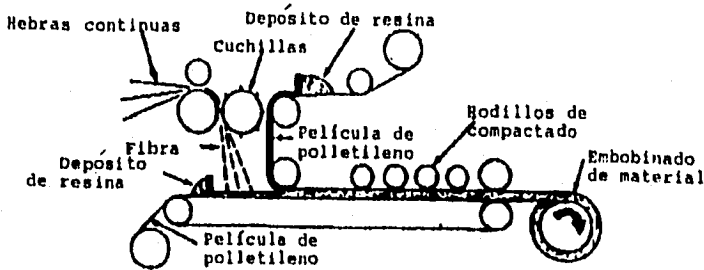


Figura 2.20 Máquina para compuestos moldeados en hojas.

### 2.5.2.2 Moldeado por inyección de resina.

En el moldeado por transferencia de resina (RIM) un molde es cargado con material de reforzamiento (a menudo como una preforma), el molde es cerrado, y la resina es entonces inyectada dentro de él. El molde es con frecuencia conectado a vacío para retirar el aire atrapado en el reforzamiento y acelerar el proceso de inyección, el reforzamiento es mojado por la acción de la presión de inyección y por la acción de mechudo de las fibras, ver figura 2.21.

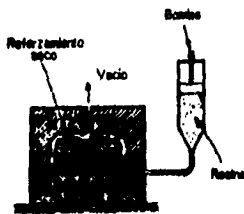


Figura 2.21 Moldeado por transferencia de resina.

Este método tiene algunas similitudes con otros métodos para compuestos y para plásticos sin reforzamiento. Por ejemplo, el modo de cargar el reforzamiento es similar al empleado en el moldeado de preformas, pero en este moldeado la resina es introducida encima de un molde abierto y las presiones son mucho más elevadas. El moldeado por transferencia tradicional, es un proceso en el cual una resina termofija es inyectada en un molde cerrado; sin embargo en el moldeado por transferencia tradicional el

reforzamiento no es incorporado. Una comparación mayor es con el moldeado por inyección a reacción (RIM), un proceso en el cual dos resinas reactivas son mezcladas e inyectadas en un molde cerrado. Piezas grandes sin reforzamiento son obtenidas mediante este proceso.

El proceso por inyección de resina es, por lo tanto, una extensión lógica de otros procesos para satisfacer una necesidad específica y es utilizado en la industria automotriz.

Los materiales más comúnmente utilizados como reforzamiento son: Fibras de vidrio, carbón y aramid. Un requerimiento sobre la forma de los reforzamientos, es que la carga es formada durante la fase de inyección. Dado que el reforzamiento es generalmente unido junto, insertos de diversos tipos, tales como receptáculos para hélices o costillas, pueden ser fácilmente arregladas en el molde al mismo tiempo que el reforzamiento con fibras. Volúmenes de fibras conteniendo el 60% son ahora llevadas a cabo con el moldeado por transferencia, abriendo así la posibilidad de emplear este proceso en la elaboración de piezas de alto rendimiento. La mayoría de las resinas para compuestos pueden ser utilizadas en el moldeado por transferencia, pero la viscosidad es disminuida para facilitar el mojado de las fibras. Las resinas poliéster y epoxi son las más comúnmente utilizadas.

El diseño de los moldes es el factor más crítico en este proceso, el cual es construido para que la resina alcance todas las áreas y que su concentración sea aproximadamente la misma en todas las partes de la pieza.

Este movimiento de resina puede ser acompañado del gelado. Adicionalmente el proceso de inyección de resina no ocasiona movimiento del reforzamiento y puede darse a bajas presiones, para que el reforzamiento pueda mantener la forma sin el apoyo de otros métodos.

Los diseñadores funden el molde para que pueda ser perforado y permitir que el aire, atrapado dentro, pueda ser expulsado de la resina, este orificio permite que la resina, que es muy densa, pueda fluir fuera del molde. Algunos moldes que son destinados para el curado de la resina a temperatura ambiente pueden aislarse para que las condiciones del medio ambiente no modifiquen el tiempo de gelado ni la viscosidad de la resina. Algunos moldes son diseñados para soportar altas temperaturas en el curado.

Los moldes para el moldeado por transferencia de resina son hechos de compuestos (poliéster/fibra de vidrio) o metal, pero también pueden ser hechos de otros materiales si las necesidades específicas así lo justifican. Las necesidades de presión generalmente son bajas, permitiendo así muchos más materiales para ser utilizados como moldes que en el moldeado por compresión. Aunque las técnicas para obtener altos contenidos de fibra incluyen presión adicional y por tanto, requieren de un molde más robusto (a menudo de metal), la elección entre moldes de metal y compuestos depende del volumen de producción, temperatura y de las necesidades de alta presión para altos volúmenes de fibra.



La fabricación de piezas grandes es el uso principal del moldeado por transferencia de resina. La razón de esto son los altos volúmenes de producción y eficiencia que se obtienen con este método en comparación con el método por contacto, el costo del equipo es inferior al del moldeado de hojas. Piezas típicas incluye gabinetes para máquina, colectores solares y carrocerías.

\* Ventajas y desventajas del moldeado por transferencia de resina.

Ventajas: Piezas grandes y complejas pueden ser hechas eficientemente y a bajo costo.

Los tiempos de producción son mucho más bajos que en el moldeado por contacto.

La presión de apriete es similar a la utilizada en el moldeo por compresión.

La definición de la superficie es mucho mejor que la obtenida en el moldeado por contacto.

Insertos y reforzamientos especiales pueden ser añadidos fácilmente.

La destreza requerida por el operador es mínima.

Muchos materiales pueden ser utilizados como moldes.

Se pueden lograr piezas más fácilmente reproducibles que con el moldeado por contacto.

El trabajador no es expuesto a químicos ni vapores como en el moldeado por contacto.

Desventajas: El diseño de los moldes es crítico y requiere gran destreza. Las propiedades son semejantes a las obtenidas con el moldeado por compresión (suponiendo que el mojado de las fibras es el adecuado), pero

generalmente no son tan buenas como las obtenidas en el moldeado en saco de vacío, arrollamiento de filamentos o pultrusión.

El control de la uniformidad de la resina no es difícil, radios y orillas tienden a tener demasiada resina.

El movimiento del reforzamiento durante la inyección de la resina es en algunos casos problemático.

### **2.5.2.3. Pultrusión.**

En el proceso de pultrusión, reforzamientos continuos de fibra son impregnados con resina, formando la pieza mediante un dado y entonces es curada, ver Figura 2.22. Este proceso es análogo al de extrusión del aluminio o termoplásticos (con la excepción obvia que la pultrusión incorpora fibras distribuidas en la resina termoestable en la mayoría de los casos). La pultrusión es un proceso continuo y por lo tanto tiene gran potencial para producciones altas. Su mayor limitación como en el proceso de extrusión, es que la sección transversal de la pieza es constante aunque pueden ser hechas piezas sólidas y huecas así como muchos perfiles. Los dados permiten un cambio en el espesor ya que son diseñados para aplicaciones especiales, esto permite algunas variaciones en la sección transversal. Dos tipos de dados son comúnmente utilizados en la pultrusión: Fijos (que no se mueven) y flotantes (donde una parte del dado flota y tiene aplicación de presión). La presión puede ser aplicada hidráulicamente, resorte u otro medio. La utilización de los dados fijos puede generar grandes fuerzas en la resina con el consecuente impregnado y mojado de las fibras. Los dados flotantes normalmente generan

más presión en la resina que la aplicada por el dado; múltiples dados son a menudo utilizados cuando son calentados para curar la pieza.

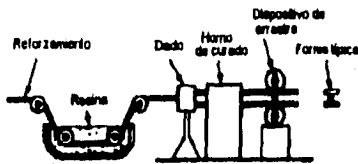


Figura 2.22 Pultrusión continua.

El proceso de pultrusión tiene un mayor rendimiento en el uso del material (95%) comparado con el moldeado por contacto (75%) y por lo tanto es considerado más productivo en tiempo y en material una característica en el diseño de los dados para pultrusión es que mantienen el exacto contenido de resina de la sección transversal mientras el volumen de fibra pasa a través del dado en forma continua, el exceso de resina es regresado al baño de resina.

*Selección de fibra y resina para la pultrusión.* La mayoría de los reforzamientos continuos para compuestos son hechos por pultrusión, en realidad la capacidad para utilizar una gran variedad de reforzamientos y formas en la ventaja de este método. Formas de reforzamientos utilizados comercialmente incluye fibra de vidrio, carbono y aramid.

La elección de la resina también es libre, pero existen algunas limitaciones. Todas las resinas necesitan rapidez para curar por la naturaleza

continua del proceso. El poliéster es la resina más comúnmente utilizada, pero debe tenerse mucho cuidado en el control del contenido de estireno. El poliéster es ideal por que se contrae muy poca en el curado y puede retirarse muy fácilmente, si el contenido de estireno es muy alto residuos de éste pueden quedarse en la pieza ocasionando áreas con huecos. Por el contrario si el contenido de estireno es muy bajo el eslabonamiento cruzado puede no efectuarse. Las resinas epóxicas tienen un problema inherente en la pultrusión ya que se pueden pegar al dado y a otras piezas del equipo de pultrusión causando problemas en el proceso y defectos superficiales en las piezas.

Resinas epóxicas modificadas son utilizadas en la manufactura de compuestos avanzados, para prevenir que la resina se pegue al dado se utiliza teflón revestido de tela que envuelve la superficie que está en contacto con el dado previniendo su contaminación y reduciendo la fricción en el paso del material a través de él.

La base del proceso de pultrusión es la impregnación de las fibras con la resina y el formado del material en la forma deseada. En la mayoría de los procesos la fibra seca es pasada en un baño de resina y mediante diversos rodillos y accesorios se asegura el mojado de las fibras las que son, entonces, pasadas a través de un dado.

Tres métodos de curado son tradicionalmente asociados con la pultrusión. El más común de éstos es llamado el método de horno túnel, en este método la pieza es normalmente gelada en el dado y finalmente curada al

pasar la pieza por el horno. El tamaño del horno está determinado por la velocidad de la línea, la dimensión de la pieza y las características de curado de la resina. El segundo método de curado es llamado método del dado dividido, en el cual dos moldes hembra son introducidos contra la pieza como si fuera un dado, la línea es parada mientras el curado tiene lugar y continúa cuando el curado es finalizado; este método es llamado pulformig. Con este sistema son posibles secciones transversales no uniformes. El tercer sistema es llamado curado en dado, el cual involucra el curado rápido de la pieza cuando ésta está aún en el dado, el curado en dado requiere de múltiples dados que en un principio tienen baja temperatura la cual se va incrementando paulatinamente al paso del material por ellos. Este método necesita el uso de microondas y radio frecuencia en el curado por lo que el largo del dado no es excesivo. El largo del dado en este método es de 15 a 60 cm., los dados son hechos de cerámica o compuestos para permitir que la energía de las microondas y radio frecuencia alcance la pieza. Los dados de cerámica son significativamente más costosos y tienen largos ciclos de fabricación en comparación con los de metal, los dados de materiales compuestos no son muy utilizados por ser menos duraderos y requerir ser cambiados frecuentemente, el sistema de curado en dado es comúnmente utilizado para piezas huecas las cuales son formadas sobre un mandril. El proceso de curado está determinado en razón del paso en el proceso, las velocidades típicas en la pultrusión son de 0.5 a 2 m./min. Para piezas que tienen de 1 a 65 mm. de espesor. El tamaño de la pieza puede variar de 2 cms. a 5 metros en diámetro.

Una gran variedad de estiradores son utilizados en la pultrusión, los más comunes son los de doble mordaza en el cual la pieza es mordida entre almohadillas y estirada hacia adelante, al finalizar éste otra mordaza estira la pieza, este tandem de estirado tiene la acción de estirado continuo.

Los cortadores son comúnmente sierras como las empleadas en la extrusión de plástico, como la dureza es mayor en compuestos reforzados las sierras son de diamante o carburo.

Ventajas y desventajas de la pultrusión.

Ventajas: El rendimiento en el uso del material es mucho mayor que en el moldeado por contacto.

El proceso puede dar grandes volúmenes de resina.

Desventajas: La sección transversal de la pieza generalmente es uniforme.

Pueden aparecer problemas con la acumulación de fibra o resina sobre la pieza y el dado.

Los huecos pueden ser un problema si los dados son removidos por el volumen de fibra.

Cuando los sistemas de curado rápido son utilizados, las propiedades mecánicas son entonces sacrificadas.

### **2.5.3 PROCESOS DE MANUFACTURA PARA MATERIALES TERMOPLASTICOS**

- a.- Arrollamiento de filamentos.
- b.- Pultrusión.
- c.- Moldeado por compresión.
- d.- Hidroformado.
- e.- Termoformado.
- f.- Moldeado por transferencia de resina.
- g.- Moldeado por inyección.
- h.- Extrusión de termoplásticos reforzados.
- i.- Formado por diafragma.

Los métodos de moldeado por contacto, en general, no son aplicables para resinas termoplásticas, sin embargo, preimpregnados termoplásticos son disponibles en la mayoría de los reforzamientos normales con fibras incluyendo fibras unidireccionales y tejidas, debido a que los termoplásticos son sólidos a temperatura ambiente los preimpregnados termoplásticos son tiesos y no son hilvanables, ellos por tanto deben ser ablandados para que el hilvanado y plegado pueda mejorarse. Este ablandamiento viene dado por calentamiento y puede efectuarse por medio de una pistola de aire caliente o por calentamiento directo por medio de una herramienta.

Aunque para algunas formas complejas una gran lámina de preimpregnado puede necesitar calentarse, normalmente sólo pequeñas áreas

es necesario ablandar, para formar el preimpregnado y poderse hilvanar. Para disminuir el problema de rigidez los preimpregnados termoplásticos son también disponibles en formas tejidas, en las que el material de la matriz es extruida en las fibras.

Otro método utilizado para eliminar la desunión de los preimpregnados termoplásticos, es revistiendo las fibras de reforzamiento con un espolvoreado de resina termoplástica. Esta forma tiene la dificultad obvia de provocar la desuniformidad de la resina (a menos que sea calentada suavemente a fin de que la resina se adhiera sobre las fibras) pero es aprobado para muchas aplicaciones.

Una ventaja de los preimpregnados termoplásticos sobre los termofijos es que los primeros tienen una vida infinita, no requieren refrigeración u otras precauciones para ser utilizados después de largos períodos de tiempo.

Termoplásticos moldeados en saco.- El moldeado en saco para materiales termoplásticos esencialmente es el mismo que es utilizado en termofijos salvo que el material del saco debe resistir la alta presión y temperatura necesarios en los termoplásticos. Por ejemplo, el típico material para el saco en termoplásticos es el Vacaloy o Kapton que puede resistir hasta 350 °C.

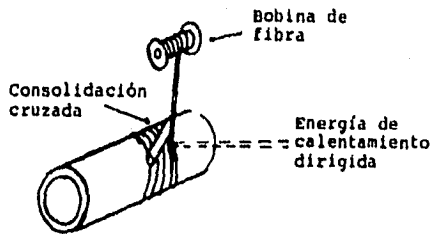
El moldeado de preimpregnados termoplásticos debe efectuarse considerando la alta temperatura requerida para obtener buenas



características de flujo y compactación. Casi todos los termoplásticos se ablandan entre los 200 y 350 °C, por lo tanto el material de los moldes y autoclaves es adaptado para soportar las altas temperaturas, la expansión térmica es lo más crítico en el diseño de los moldes debido a las elevadas temperaturas. La alta viscosidad de los termoplásticos dificulta el proceso de compactación, requiriendo grandes presiones para llevarla a efecto.

### 2.5.3.1 Arrollamiento de filamentos para termoplásticos.

La fibra preimpregnada es el material más comúnmente utilizado en termoplásticos en forma de filamentos, debido a la alta viscosidad de la resina y a la rigidez de las fibras es necesario precalentarlas a medida que son colocadas sobre el mandril, ver figura 2.23.



**Figura 2.23** Arrollamiento de filamentos para termoplásticos.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

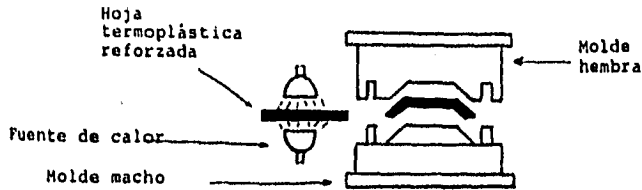
### **2.5.2.3 Pultrusión de termoplásticos.**

Diversas manufacturas de materiales termoplásticos resaltan la capacidad de los plásticos termoplásticos pultruidos, formas tales como canales y varillas han demostrado tener excelentes propiedades comparadas con piezas similares termofijas. Los fabricantes todavía no revelan los métodos exactos para piezas pultruidas.

### **2.5.3.3 Moldeado por compresión de termoplásticos.**

El tradicional moldeado por compresión ha sido combinado con un precalentado (similar al termoformado) a fin de acomodar los materiales termoplásticos, figura 2.24. En compuestos termoplásticos un laminado preimpregnado es colocado en un horno a fin de ablandar mediante temperatura el material el cual está, normalmente, sostenido por un bastidor. Cuando la hoja termoplástica tiende al punto de cedencia (cuando el material tiende a caer o ablandarse) ésta es colocada en el molde para posteriormente cerrarlo, el molde es mantenido a una temperatura por debajo del punto de cedencia del material por lo que el laminado puede ser simultáneamente formado y enfriado hasta convertirse en una pieza sólida, el molde puede, entonces, ser abierto retirando la pieza concluyendo el moldeado. Este método elimina la necesidad de utilizar un autoclave que es altamente costoso. Debido al poco tiempo en la consolidación, a causa de la alta viscosidad del termoplástico, se requiere más tiempo para que la resina penetre el paquete de fibras. Algunos preimpregnados termoplásticos son

adecuados para solventar este problema; los cuales son vendidos como preimpregnados preconsolidados en un autoclave.



**Figura 2.24** Moldeo de termoplásticos.

### 2.5.3.3.1 Hidroformado.

Algunos hidroformados pueden también ser formados cuando uno de los dados es flexible, el cual no necesariamente debe ser hermanado al dado opuesto para darle buena consolidación y forma al material; debido a que es aplicada presión hidrostática (la presión hidrostática es la presión por medio de la cual es presionado un material flexible o fluido; en este caso el dado flexible) para profundizar el contorno y grosor de los laminados. El dado flexible puede también ser hermanado al dado metálico a menudo el dado flexible es más pequeño que el metálico para permitir el espesor de la pieza, ver figura 2.25.

La temperatura de los moldes es típicamente de 150-180 °C, si éstos son enfriados la pieza puede solidificar prematuramente propiciando el movimiento de resina y fibra. La presión varía con el espesor del laminado y

el tipo de fibra pero presiones típicas de 689-1723 KPa. para espesores de 1.25 cm. de fibra de carbón.

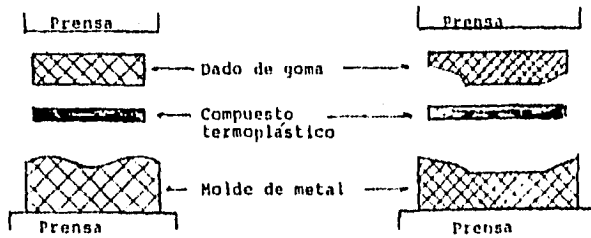


Figura 2.25 Hidroformado.

### 2.3.3.2 Termoformado de termoplásticos reforzados.

En el termoformado una hoja de material termoplástico es calentada hasta ceder por la fuerza de gravedad, entonces es retirada del horno o cualquier otro sistema de calentamiento y colocada sobre un molde. un vacío es aplicado a través del molde (pequeños hoyos son hechos en el molde para que esto ocurra) y la hoja de plástico toma la forma del molde por la acción del vacío. El molde puede ser hembra o macho. Un proceso de formado similar a este es el hidroformado el cual fue anteriormente descrito.

#### **2.5.3.4 Moldeo por transferencia de resina**

Debido a las altas temperaturas y viscosidades de funcionamiento de los termoplásticos, estas resinas no pueden ser utilizados en procesos análogos de transferencia de resina.

#### **2.5.3.5 Moldeado por inyección de termoplásticos.**

El más importante de los procesos para hacer materiales compuestos termoplásticos es el moldeado por inyección, en este proceso pellets de resina son fundidos (normalmente en una extruidora, la cual forma parte de la máquina de inyección) el cual es inyectado en un molde cerrado; el molde es enfriado para que el plástico inyectado solidifique y la pieza sea entonces retirada, figura 2.26.

El moldeado por inyección es ampliamente utilizado debido a la facilidad de automatización del proceso, alta productividad (debida a los cortos ciclos de moldeado) y a los excelentes detalles que pueden ser obtenidos con el proceso.

En una máquina típica de inyección la resina entra a la máquina por gravedad en una tolva. Un tornillo giratorio avanza el material hacia adelante (el tornillo tiene tramos profundos en la zona bajo la tolva, llamada zona de alimentación), el material es entonces trasladado a la zona de fundido la cual tiene calentadores eléctricos colocados alrededor de la zona, el calentamiento

del material viene dado desde la base del tornillo en forma mecánica. El plástico es entonces trasladado a la zona de medición en donde la base del tornillo es muy gruesa (el tramo de área es muy poco profundo). En el momento justo, en el ciclo de moldeado, el tornillo avanza girando inyectando el plástico mediante boquillas en el molde. Una válvula check colocada al fin del tornillo evita que el plástico fluya hacia atrás. El sistema de sprue y carrera conectan la boquilla con las entradas de las cavidades del molde. En moldes simples la sprue y carrera solidifican junto con la pieza y son cortadas como fragmentos. Algunos moldes tienen sistema de carrera caliente que no solidifica. El molde es abierto después de enfriada la pieza.

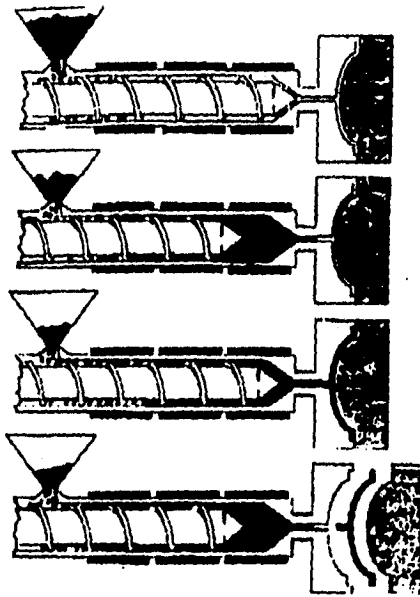
El molde puede ser de una o múltiple cavidad, si es multicavidad éstas pueden ser idénticas o diferentes, para que diversas piezas puedan ser hechas simultáneamente. Recientemente se les ha llamado moldeado en familia.

El tamaño de la máquina de inyección está determinado por el tamaño de la pieza o piezas que son hechas. Dos tamaños de máquinas son identificadas: La primera es la tamaño "balas", la cual es simplemente el volumen del material que va a ser inyectado, el rango de tamaños va de 0.03 a 1.4 Kgs. El segundo tamaño es la de "presión de apoyo", la cual es requerida para mantener el molde cerrado en el momento de la presión de inyección. El área de la pieza y las restricciones en la carrera y las cavidades son de mayor consideración en la determinación de la presión la cual varía de 100 a 400 MPa.

Diversos tipos de reforzamiento pueden ser usados en el moldeado por inyección tales como partículas, whiskers y fibras cortas.

La utilización de reforzamiento en el moldeado por inyección permite diversos aspectos importantes en la operación: Primero, el proceso de fundido e inyección puede dañar el reforzamiento disminuyendo en gran medida los aspectos positivos, por lo tanto, se puede tener un punto medio entre las propiedades físicas óptimas y el proceso. Generalmente la longitud del reforzamiento no es más grande que el tamaño de la cavidad del molde. La longitud para el tamaño de las fibras en este proceso son 0.76-25.4 mm. Otro problema es la restricción en el flujo del sistema de carrera y el excesivo calentamiento en la extrusión pueden elevarse con la concentración de fibras, que puede ser alta. Las típicas concentraciones son de 30-40% de fibra en peso.

Un inadecuado diseño del molde puede ocasionar serios problemas en los esfuerzos de la pieza, si existen múltiples entradas a una cavidad con flujos convergentes o divergentes o si el material puede fluir alrededor o al centro de la cavidad, dos o más flujos de material son creados los cuales pueden unir a la pieza pudiendo debilitarse en el punto de unión. La presencia de reforzamientos en los plásticos mas que agregar problemas y dificultades han producido un avance en los plásticos.



**Figura 2.26** Moldeado de termoplásticos por inyección.

### **2.5.3.6 Extrusión de termoplásticos reforzados.**

La extrusión es un proceso mediante el cual piezas de sección transversal uniforme son hechas en gran volumen, el proceso incluye un extruidor similar al descrito en el moldeado por inyección, exceptuando que en la extrusión el tamaño del extruidor es mucho más grande y el proceso es continuo (esto es que no tiene movimiento recíprocante), no requiere válvula check, a cambio del molde el material plástico es formado al pasar a través de un dado que le da forma. El perfil es entonces enfriado y cortado en los tamaños deseados.



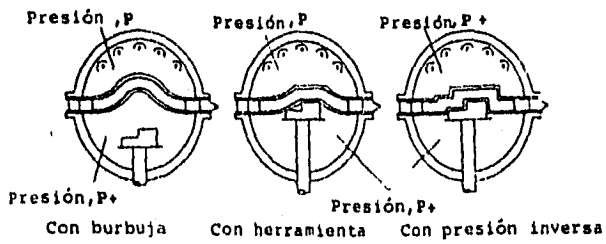
La extrusión de materiales reforzados no es un proceso importante para piezas con un buen acabado, pero es importante para la impregnación de la fibra en la resina. En este aspecto la extrusión es bien vista como un excelente proceso de mezclado y combinado. Fibras y reforzamientos cortados son unidos y mezclados por la acción de la extrusión. Se debe tener cuidado para prevenir el deterioro del reforzamiento; pero esto es función de la concentración y largo del reforzamiento, dimensión del tornillo de extrusión con respecto al calor y apertura del dado. El plástico es extruido en forma larga (como fideos) y cortado en forma de pelets con longitudes típicas de 3 a 10 mm.

#### **2.5.3.7 Formado por diafragma.**

En el proceso de formado por diafragma, una hoja sin consolidar es colocada entre dos diafragmas deformables plásticamente. El sandwich entero es entonces simultáneamente consolidado y formado en la forma deseada por medio de calentamiento (para ablandar el compuesto) y por presión hidrostática la cual es aplicada, inicialmente, por uno y otro lado del sandwich para consolidar el material, posteriormente mediante diferencia de presiones se fuerza el sandwich sobre el molde hasta obtener la forma deseada, ver figura 2.27.

Este proceso es derivado de una combinación de un formado por vacío de hojas termoplásticas y el formado superplástico de aluminio o titanio. En

estos procesos el material que va a ser formado es calentado y compactado elásticamente para formar la pieza.



**Figura 2.27** Formado por diafragma.

## **CAPITULO 3**

### **VARIABLES QUE DETERMINAN LAS CARACTERISTICAS MECANICAS DURANTE EL PROCESO DE FABRICACION**

#### **3.1 ARROLLAMIENTO DE FILAMENTOS**

Comúnmente se piensa en el arrollamiento de filamentos como un proceso por medio del cual un hilado de filamentos es impregnado con una resina, para ser enrollado posteriormente, por medio de un mandril rotatorio ( Fig. 3.1 ). El patrón o modelo obtenido se pasa a un proceso de curado al tiempo en que el mandril es removido. El producto terminado puede ser algunas veces tan simple como un pedazo de tubería, o algunas otras tan complejo como el fuselaje de un avión o el armazón de un auto. Entre los materiales típicos utilizados en este proceso, se incluye a la fibra de vidrio, la fibra de carbono, y la fibra aramid, unidas a matrices de poliéster, vinyl ester, o resina epóxica.

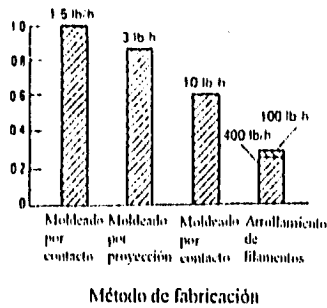
La ventaja principal del arrollamiento de filamentos sobre otros procesos de fabricación de materiales compuestos, es su bajo costo de materia prima y mano de obra. Estos bajos costos son posibles en el arrollamiento de filamentos, gracias a que una fibra relativamente barata puede ser combinada con una resina relativamente barata, y así obtener un compuesto barato. Los costos en el proceso de arrollamiento de filamentos se reducen también por la capacidad que tiene el proceso de trenzar las fibras a una alta velocidad, por ejemplo, para la fabricación de un fuselaje de avión la velocidad promedio de

trenzado de fibra es de 100 lb/h, que es una velocidad alta comparada con la de otros procesos ( Fig. 3.2 ).

Las grandes desventajas del arrollamiento de filamentos son las limitaciones que presenta con respecto a la herramienta utilizada para remover el mandril, es decir, no se puede variar de herramientas para remover el mandril. El mandril es también muy difícil de maniobrar, lo cual provoca que el arrollamiento de filamentos sea un proceso poco práctico; y junto a estas desventajas de suma la inhabilidad para enrollar superficies cóncavas.



**Figura 3.1** Mandril rotatorio para el arrollamiento de filamentos.



**Figura 3.2**

A continuación se presentarán otras ventajas y desventajas del proceso en forma de lista.

Otras ventajas del arrollamiento de filamentos son :

- La capacidad de usar fibras sobre una misma área, y la capacidad de orientar fácilmente las fibras en dirección de la carga.
- La eliminación del gasto para un autoclave.
- Grandes estructuras pueden ser construidas (mayores que en el proceso por autoclave).
- Obtención de un alto volumen de fibra.
- Bajo costo para un gran número de componentes.

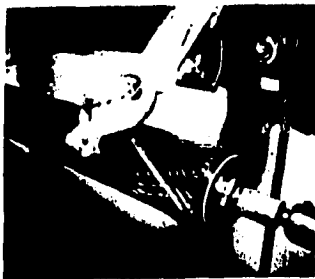
Otras desventajas del arrollamiento de filamentos son:

- El mandril requiere de condiciones especiales de mantenimiento.

- Inhabilidad para cambiar fácilmente la ruta de la fibra (en una lámina).
- Requiere del mandril, el cual puede ser complejo y caro.

En algunos casos, la ruta de la fibra se cambia para salvar los costos de materiales o para hacer removible una parte de algún componente sobre el cual se esté trabajando. Este cambio de ruta se logra pasando la fibra por una serie de alfileres antes de ser enrollada en el mandril ( Fig. 3.3 ). La ruta de la fibra también puede ser alterada por pernos para evitar deslizamientos.

Por último mencionaremos que las áreas de aplicación más directas para el producto terminado del proceso de arrollamiento de filamentos son las tuberías, recipientes para ensayos de presión ( estos recipientes los analizaremos más adelante en algunos experimentos ), resortes para los tableros de los automoviles, y cojinetes.



**Figura 3.3**

### **3.1.1 MATERIALES**

Existe un número determinado de materiales disponibles para el arrollamiento de filamentos. Las fibras típicamente utilizadas son fibra de

vidrio, fibra de carbono, y fibra aramid. Mientras que las resinas más comúnmente utilizadas en este proceso son poliéster, vinyl ester, resina epóxica, y fenólica. La combinación de fibra-resina puede ser clasificada dentro de cualquiera de dos sistemas: Un sistema de mojado ( en el cual la fibra es empapada de la resina justo antes de ser enrollada por el mandril ), o bien un sistema de preimpregnado ( en el cual la resina ha sido aplicada a la fibra en una operación temprana y pasada al enrollamiento inmediatamente).

El sistema predominante en la producción de partes por arrollamiento de filamentos es la fibra de vidrio en una matriz de poliéster o vinyl ester. Este sistema, con un costo de materia prima en el rango de 2.27-4.54 dils/kg, compite de forma eficiente contra sistemas, especialmente los metálicos, tales como el aluminio, y acero inoxidable. A parte del aspecto económico, la elección de la fibra está determinada por su rigidez, su capacidad de conducción tanto térmica como eléctrica, su resistencia química, y su resistencia al desgaste. En cambio, la elección de la resina se realiza en base a su resistencia química y su resistencia eléctrica, y su elongación.

### **3.1.1.1 FIBRAS PARA EL ARROLLAMIENTO DE FILAMENTOS.**

La fibra más utilizada en el arrollamiento de filamentos es la fibra de vidrio, la cual se ha comercializado en gran medida en los últimos 40 años. Algunos tipos de fibra de vidrio utilizadas en la producción de estructuras por medio del arrollamiento de filamentos se muestran en la tabla 3.1, la cual muestra el tipo de fibra, el módulo nominal de tensión, el esfuerzo nominal de tensión, y el número máximo de filamentos a torcer.

Esto último es importante en la selección de la fibra en el arrollamiento de filamentos, ya que un gran número de fibras cumplen con estas características mecánicas.

La fibra de vidrio continuará siendo utilizada en el arrollamiento de filamentos ya que su costo es bajo, tiene una buena estabilidad dimensional, y cumple con las características mecánicas requeridas para la producción de estructuras resistentes.

La fibra aramid, ha sido aceptada mundialmente como una fibra para el arrollamiento de filamentos desde que fue utilizada en la fabricación de la cubierta del motor industrial. La ventaja principal de esta fibra es su alta relación resistencia-peso ( módulo específico ), la cual es mucho mayor que la de la fibra de vidrio que previamente había sido utilizada en cubiertas de motores industriales ( tabla 3.2 ).

La fibra aramid muestra también gran consistencia, con una variación muy baja de su módulo específico, lo cual permite que se realicen diseños complicados. La naturaleza de esta fibra la da una propiedad especial de resistencia a la abrasión y al uso rudo, lo cual sugiere que se pueda utilizar en estructuras que reciben un trato duro o de abrasión.

La producción o proporción a la cual se obtiene esta fibra, es de 124 - 9540 m/kg aproximadamente, dependiendo del tipo de fibra.

Otra fibra importante en el proceso de arrollamiento de filamentos, es la fibra de carbono, que se encuentra disponible con una proporción de 996,498,249, y 62 m/kg. Esta fibra muy diferente a la fibra de vidrio y a la aramid, ya que es una fibra muy frágil, y por ese motivo necesita cuidados muy especiales a la hora de utilizarse en este proceso. Para minimizar la tendencia a romperse que tienen estos filamentos durante el proceso, se debe



minimizar el número de vueltas o enrollamientos en el mandril. Otra de las diferencias con respecto a las otras fibras, es que el carbono es eléctricamente conductor. Esto significa que hay que controlar muy bien el paso de la fibra cuando está seca, para que no sucedan cortos cerca del equipo.

Con la fibra de carbono se obtienen las más altas resistencias y módulos, como se muestra en la tabla 3.3.

### **3.1.1.2 RESINAS PARA EL ARROLLAMIENTO DE FILAMENTOS.**

El arrollamiento de filamentos puede utilizar la resina de tres formas diferentes. La forma predominante o más utilizada es la forma líquida, en la cual, la fibra es empapada como si hubiera pasado por un baño de resina. Otra forma es el preimpregnado, donde la fibra es impregnada en un paso temprano o previo al desarrollo del proceso, siendo enrollado posteriormente en una bobina. Una tercera forma utiliza resina termoplástica, la cual puede estar en forma de listón, o en forma de recubrimiento.

La resina en una estructura de material compuesto procesado por arrollamiento de filamentos, cumple las mismas funciones que en las estructuras de compuestos procesados por otros métodos, algunas de estas funciones son:

- Mantener los filamentos en una posición apropiada.
- Ayudar a distribuir las cargas.
- Proteger a los filamentos de la abrasión.
- Controlar las propiedades eléctricas y químicas.

Algunas de las características de la resina ( en un sistema de resina humedad ), son las siguientes:

- La viscosidad debe de ser alrededor de 2000 cp.
- El tiempo de permanencia en el crisol, debe ser tan largo como sea posible.
- Debe ser de baja toxicidad.

Una de las propiedades más importantes en la resina es la fuerza adhesión con la fibra, lo cual es sumamente importante en la mayoría de las estructuras que se fabrican por arrollamiento de filamentos. Las resinas para filamentos preimpregnados incluyen la resina epóxica, vinyl ester, poliéster, fenólica, y poliamida. Para cada resina existe un número determinado de procesos de curado, que le otorgan diferentes usos. La resina epóxica tiene el rango más amplio de propiedades de todas las resinas utilizadas en arrollamiento de filamentos. Esta resina es la más utilizada en la industria aeroespacial.

Otra característica importante en la resina es la resistencia a altas temperaturas. Un sistema de resina resistente a altas temperaturas, únicamente debe ser seleccionado después de haberse realizado un estudio completo de las condiciones ambientales operantes en los componentes de los filamentos. También, la resistencia a la fatiga, la resistencia química, y la resistencia a mezclarse de parte de los compuestos, son la llave de los criterios para seleccionar una resina; sin embargo estas características deben ser evaluadas únicamente en relación a las propiedades mecánicas deseadas.

Tipo	Módulo nominal de tensión		Esfuerzo nominal de tensión		Número máximo de filamentos o torcer	Densidad
	GPo	MPo	MPo	Ksi		
E.....	72.40	10.50	3,447.00	500.0	4,000.00	2.60
R.....	86.20	12.50	2,068.00	300.0	60.00	2.49
S.....	86.90	12.60	4,585.00	665.0	.....	2.55

Tabla 3.1 Fibras de vidrio para el arrollamiento de filamentos ( en orden ascendente de módulos normalizados a un volumen de fibra al 100% ).

Tipo	Módulo nominal de tensión		Esfuerzo nominal de tensión		Número máximo de filamentos o torcer	Densidad de fibra
	GPo	MPo	MPo	Ksi		
Aramid (módulo medio)	62	9	2758	400	1000	1.44
Polietileno ( o )	117	17	2585	375	118	0.97
Aramid ( o )	121	17.5	4067	590	....	1.44
Aramid	124	18	3792	550	5000	1.44
Polietileno ( b )	170	24.8	3274	471	....	0.97

( o ) En desarrollo ; ( b ) En investigación y desarrollo.

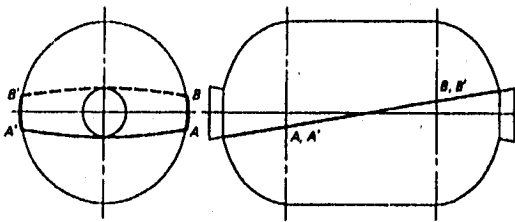
Tabla 3.2 Fibras orgánicas para el arrollamiento de filamentos ( en orden ascendente de módulos normalizados a un volumen de fibra al 100% ).

Tipo de fibra	Módulo nominal de tensión	Módulo nominal de tensión	de Esfuerzo nominal de tensión	de Número de filamentos por torcer	máximo Densidad a de fibra	
	Mpa	MPa	Ksi			
Alta resistencia a tensión	227	33	3102	450	12000	1.75
Alta deformación	234	34	4100	594	6000	1.79
Módulo intermedia	275	40	4295	623	12000	1.74
Alta módulo	358	52	2482	360	3000	1.81
Alta módulo de resina	379	55	2068	300	4000	2
Módulo Ultra-alto	517	75	1816	270	384	1.96
Mód. Ultra-alto de resina	517	75	2068	300	2000	2

Tabla 3.3 Fibras de carbón y grafito para el arrollamiento de filamentos ( en orden ascendente de módulos normalizados a un volumen de fibra al 100% ).

### 3.1.2 PATRONES DE ARROLLAMIENTO

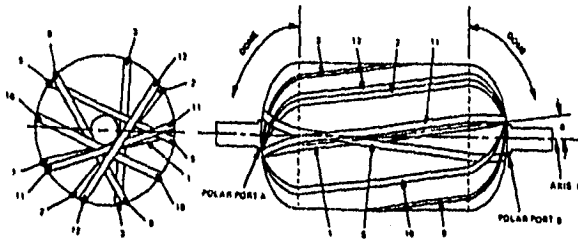
Los dos procesos básicos de enrollamiento son: enrollamiento polar y enrollamiento helicoidal. Cada método tiene un patrón de enrollamiento diferente. En el enrollamiento polar ( también llamado planar ), el mandril permanece estacionario mientras se alimenta en él una fibra que rota en su eje longitudinal, con una inclinación prescrita por el ángulo de enrollamiento. El mandril está programado para avanzar un ancho de banda de la fibra, por cada revolución del alimentador. Este patrón de enrollamiento es descrito como un circuito individual polar (fig. 3.5). Las fibras se tienden adyacentes una con respecto a la otra; una capa completa consiste de dos pilas de fibras orientadas con respecto al ángulo de enrollamiento.



**Figura 3.5**

En el modo helicoidal, el mandril rota continuamente mientras el alimentador de fibra corre hacia adelante y hacia atrás. La velocidad del alimentador y la rotación del mandril son reguladas para generar el ángulo de enrollamiento deseado. Este patrón de enrollamiento se describe como: multi-circuito helicoidal. Después de la primera carrera, las bandas de fibra ya no son adyacentes. Varios circuitos son requeridos antes de que se repita

el patrón. ( Un típico patrón de 10 circuitos se representa en la fig. 3.6 ). La trayectoria del filamento avanza un décimo de la circunferencia más un décimo del ancho de banda por circuito.



**Figura 3.6**

Los patrones de enrollamiento son determinados por ajustes de prueba y error en las máquinas o bien, son calculados por geometría. El siguiente ejemplo simplificado ilustra un método de estabilizar los circuitos por patrón y el número total de circuitos para completar el alcance del mandril.

*Ejemplo:* Para enrollar un diámetro de 10 pulgadas ( 25.4 cm ) en un cilindro de 40 pulgadas de longitud a un ángulo de enrollamiento de  $45^\circ$ , el ancho de banda de la fibra se asume que es 0.25 in ( 0.64 cm ) y el ángulo "dwell" de  $180^\circ$  ( El ángulo dwell es una medida de la rotación del mandril a cada revolución, antes de que el alimentador cambie de dirección ).

En un circuito, el alimentador se mueve 80 in ( 203.2 cm ), mientras el mandril rota  $80/10\pi$  revoluciones más una revolución de dwell, o un total de  $1276.8^\circ$  . La trayectoria de la fibra de esta manera, ha avanzado  $196.8^\circ$  .

( $1276.8^\circ - 3 \times 360^\circ$ ). Este ángulo no nos dará el patrón requerido. El ajuste más simple consiste en incrementar el dwell a  $1.6^\circ$ , así que el avance será de  $200^\circ$ . A este ángulo, los recorridos de la fibra coinciden después de 9 circuitos. El número total de circuitos por hilera es:

$$C_l = \pi D / S_c \quad (\text{Eq.13})$$

donde  $C_l$  es el número total de circuitos por hilera,  $D$  es el diámetro medio del compuesto,  $S_c$  es la componente circunferencial del ancho de banda, y para un ángulo de enrollamiento de  $45^\circ$ ,  $S_c = 0.354$ .

$$C_l = 10\pi / 0.354 = 88.8 \quad (\text{Eq.14})$$

El ancho de banda se reduce escasamente hasta que  $C_l$  es igual a 90, lo cual se obtiene con 10 repeticiones del patrón. La razón entre la velocidad del mandril y la velocidad de carrera es finalmente ajustado de modo tal que el avance en el recorrido de la fibra se incrementa  $0.354$  in (  $0.9$  cm ) en el noveno circuito.

El grado de precisión en el control de las velocidades de la máquina es evidente del ejemplo. Está visto que el ancho de banda y el ángulo dwell varían para obtener el alcance completo. En la práctica, la longitud del cilindro y el ángulo de enrollamiento son también considerados como variables en la realización de un patrón satisfactorio.

Otros tipos de arrollamiento incluyen los siguientes:

**Arrollamiento de aro:** En el arrollamiento de aro o circunferencial, las hileras se enrollan a un ángulo de  $90^\circ$ ; el alimentador de material avanza un ancho de banda por revolución.

**Arrollamiento longitudinal:** Este término se utiliza cuando se enrolla con un ángulo de revolución o de vuelta, en cualquier patrón de arrollamiento ( helicoidal o polar ).

### **3.1.3 DISEÑO Y ANALISIS**

Ahora vamos a realizar el diseño y análisis de una estructura que se pretende obtener por medio del arrollamiento de filamentos.

Vamos a hacer el análisis del un motor de un cohete o recipiente de presión ( se le llama así, porque obedece el mismo principio que un recipiente a presión ). Utilizaremos aquí, la aplicación de este proceso a los recipientes a presión, como el típico problema a resolver.

El análisis comienza con la determinación de todos los requerimientos, incluyendo características externas ( la longitud y diámetro del recipiente ), características de desempeño ( presión, peso, y volumen ), y características del medio ambiente ( temperatura, humedad, y cargas externas aplicadas ).

Conociendo estos parámetros, se realiza un diseño preliminar utilizando el método de análisis finales, para dirigir las cargas existentes. La selección del material es determinada por las condiciones del medio ambiente en el cual se esté trabajando o al cual será sometido el recipiente a presión.

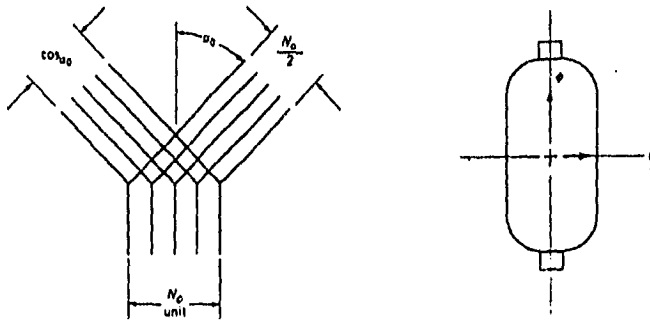
Después, se realiza un análisis detallado utilizando los ángulos de enrollamiento ( previamente seleccionados ), y el cálculo del espesor de la



fibra. Se selecciona un patrón de enrollamiento polar y un espesor, posteriormente se procede a estudiar el diseño para optimizarlo.

Finalmente se realiza un análisis detallado de esfuerzos utilizando técnicas de elemento finito. El espesor de las paredes del recipiente en el patrón polar, es analizado por medio de técnicas computacionales.

Ya que se explicó el procedimiento de diseño y análisis de estas estructuras, aplicaremos el método de análisis finales con objeto de observar las variables que determinan este análisis, y por ello, el proceso en sí.



**Figura 3.4**

### **3.1.4 ANALISIS FINALES**

En el método de análisis finales, se asume que la fibra provee al compuesto de la dureza, rigidez y resistencia, que tiene el compuesto. En la región cilíndrica de un motor de cohete o un recipiente a presión, la fibra

soporta toda la carga longitudinal. Un diagrama de cuerpo libre para un recipiente a presión se muestra en la figura 3.4.

Sumando las cargas en dirección longitudinal,  $N\alpha$ , se obtiene la siguiente relación:

$$2\left(\frac{N\alpha}{2}\right)\cos^2\alpha - N\Phi = 0 \quad (\text{Eq. 1a})$$

$$N\alpha = \frac{N\Phi}{\cos^2\alpha} \quad (\text{Eq. 1b})$$

Donde  $N\alpha$  y  $N\Phi$  son cargas en dirección longitudinal.

Para recipientes a presión con terminales cerradas, la carga longitudinal,  $N\Phi$ , puede ser definida en términos de la presión interna  $P$ , en el promedio del radio de las paredes,  $R$ :

$$N\Phi = \frac{P\bar{R}}{2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Donde  $P$  es la presión interna del recipiente a presión, y  $R$  es el radio de la pared del recipiente a presión.

Sustituyendo la ecuación 2 en 1b. resulta:

$$N\alpha = \frac{P\bar{R}}{2\cos^2\alpha} \quad (\text{Eq.3})$$

La tensión en las fibras helicoidales se encuentra por división de la extensión de la carga en la dirección de la fibra por el grosor de las fibras helicoidales, así:

$$\sigma_{af} = \frac{N\alpha}{t_{af}} = \frac{P\bar{R}}{(2\cos^2\alpha)t_{af}} \quad (\text{Eq.4})$$

Donde “ $\sigma_{af}$ ” es el esfuerzo en las fibras helicoidales,  $N\alpha$  es la carga en dirección de la fibra, y  $t_{af}$  es el espesor de la fibra helicoidal o polar.

La carga circunferencial, o de aro, en la región cilíndrica es soportada en parte, por las fibras de aro. Considerando el diagrama de cuerpo libre, se muestra que la contribución de las fibras helicoidales para soportar la carga de aro es:

$$N\Theta' = N\alpha\sin^2\alpha \quad (\text{Eq.5})$$

La carga total de aro, puede ser definida en términos de la presión interna, y el radio promedio de pared:

$$N\Theta_{tot} = P\bar{R} \quad (\text{Eq.6})$$

La carga que soportan las fibras de aro, se encuentra restando la contribución de las fibras helicoidales, de la carga total. La ecuación 3 puede ser entonces sustituida en la ecuación 7:

$$N\Theta = N\Theta_{tot} - N\Theta' = P\bar{R} - N\alpha \text{sen}^2 \alpha \quad (\text{Eq.7})$$

Los esfuerzos en las fibras de aro,  $\sigma_{\theta r}$ , se encuentran dividiendo la parte de la carga de aro,  $N\Theta$ , ( soportada por las fibras de aro ), entre el grosor de éstas fibras de aro,  $t_{\theta r}$ :

$$\sigma_{\theta r} = \frac{N\Theta}{t_{\theta r}} = \frac{P\bar{R}}{t_{\theta r}} \left(1 - \frac{\tan^2 \alpha}{2}\right) \quad (\text{Eq.8})$$

### 3.1.5 CALCULO DEL ESPESOR DE LA FIBRA

Para resolver las ecuaciones 4 y 8 en el método de análisis finales, el espesor de la fibra de enrollamiento debe de ser determinado como sigue:

$$t_r = (\text{número de bobinas} * \text{área de sección transversal}) / \text{ancho de banda} \quad (\text{Eq.9})$$

Para iniciar el cálculo, el área transversal debe conocerse. Dicha área puede determinarse por el peso y dimensiones, aplicando la densidad conocida.

#### 3.1.5.1 Factor de masa y volumen.

Esta es una constante (  $K\Theta$  ó  $K\alpha$  ) usada para convertir el espesor de fibra calculado (  $t_{of}$  y  $t_{\alpha r}$  ) en el espesor del compuesto, y es una medida del incremento en volumen debido a la adición de la resina. Este factor es el inverso del volumen de fibra ( vol % ). El espesor de la fibra, calculado, es convertido a espesor de pared del compuesto mediante la ecuación:

$$t_c = t_f k \quad (\text{Eq.10})$$

Donde  $t_c$  es el espesor de pared del compuesto, y  $t_f$  es el espesor de la fibra,  $k$  es el factor de masa.

o, más específicamente:

$$\text{Por hilera de aro: } t_{\Theta} = t_{of} \times K\Theta \times 2 \quad (\text{Eq.11})$$

$$\text{Por hilera helicoidal: } t_{\alpha} = t_{\alpha r} \times K\alpha \times 2 \quad (\text{Eq.12})$$

Donde  $t_{\Theta}$  es el espesor del compuesto fabricado por un patrón de aro,  $t_{of}$  es el espesor de la fibra de aro,  $K\Theta$  es el factor de masa para el espesor de aro,  $t_{\alpha}$  es el espesor del compuesto helicoidal,  $t_{\alpha r}$  es el espesor de la fibra helicoidal,  $K\alpha$  es el factor de masa para el compuesto helicoidal.

Los factores de masa de las fibras se muestran en la tabla 3.4, estos factores dependen de diversos procesos y consideraciones geométricas, ángulo de enrollamiento, tiempo de proceso, y presión externa durante el proceso.

	Factor de masa	Fibra, vol%
<b>Aramid o vidrio</b>		
Helicoidal/polar	1.82 - 1.67	0.55 - 0.6
Anillo	1.54 - 1.43	0.65 - 0.7
<b>Carbón ( grafito )</b>		
Helicoidal/polar	2 - 1.8	0.5 - 0.55
Anillo	1.67 - 1.54	0.6 - 0.65

Tabla 3.4 Factores de masa y volúmenes de fibra.

### 3.1.6 MAQUINAS DE ARROLLAMIENTO

Estas máquinas están diseñadas para cualquiera de los dos patrones de enrollamiento, tanto helicoidal como polar. Se hacen variaciones en las máquinas, para acoplar el arrollamiento de aro y para añadir versatilidad. Las máquinas de arrollamiento polar, usualmente operan con el mandril en una

posición vertical con el objeto de eliminar posibles deflexiones causadas por el peso, y permitir un movimiento más simple del brazo de alimentación. Una mayor ventaja de la máquina de arrollamiento polar, es que se pueden controlar los movimientos de la máquina por medio de controles muy simples. La rotación del brazo de alimentación es continua y a una velocidad uniforme, así que no existen efectos inerciales provocados por la variación de la velocidad.

Los movimientos básicos o grados de libertad de las máquinas de arrollamiento helicoidales, son dos, el movimiento de rotación del mandril y el movimiento de avance lateral del mismo mandril. A estos movimientos o grados de libertad se pueden agregar el movimiento de una corredera perpendicular al eje del mandril, y un cuarto movimiento que es la rotación del ojo alimentador de fibra. Estos últimos 2 movimientos, permiten una mayor exactitud en la colocación de la fibra sobre las terminales. Los controles de las máquinas pueden ser tanto numéricos como mecánicos. Los controles mecánicos emplean un sistema de manejo en el cual tanto la rotación como la traslación del mandril son controlados por trenes de engranes, cadenas, o tornillo. Los movimientos de las máquinas de arrollamiento operadas por control numérico, son controlados por tarjetas electrónicas que operan servomotores hidráulicos, cada eje teniendo su propio motor hidráulico.

Algunas otras máquinas se han diseñado para estructuras específicas. La figura 3.7 es una representación esquemática de una enrolladora esférica. Una microcomputadora de 12-bits controla el proceso, y es capaz de enrollar esferas de 3-15 pulgadas ( 7.6 - 38 cm ) de diámetro.

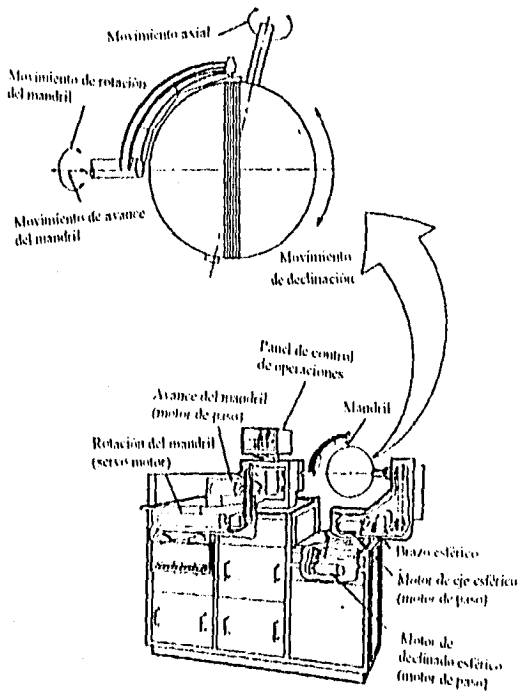


Figura 3.7

### 3.1.6.1 Mandriles

El mandril es la base geométrica para la estructura final. El mandril, tiene que soportar en el proceso de enrollamiento, al compuesto antes de ser curado y a través del curado, sin deformar al compuesto más allá de los límites permitidos. Los mandriles pueden ser clasificados como mandriles permanentes, mandriles removibles, y mandriles reutilizables.

Un mandril permanente será parte integral de la estructura final. En un tanque de buceo, por ejemplo, la fibra es enrollada sobre una delgada pared metálica



que esencialmente actúa como una barrera de gaseosa. El mandril removible debe ser separado del compuesto curado sin dañarlo. El mandril reutilizable debe de ser removido de manera tal que se conserve la entereza de la pieza como del mandril.

Normalmente en la producción de recipientes a presión se utilizan diversos materiales como recubrimiento o emplastado del mandril, estos materiales son los siguientes:

1.- *El metal segmentado plegable.* Son caros y no están garantizados por menos de 25 partes. El diámetro sugerido promedio es de 3-5 pies (0.91-1.52 m).

2.- *Aleaciones de bajo punto de fusión.*- Estos tienen alta densidad y soportan una tensión de enrollado moderada. Estos mandriles, están limitados a recipientes pequeños del orden de 1 pie (0.3 m) de diámetro por 1 pie ( 0.3 m ) de largo.

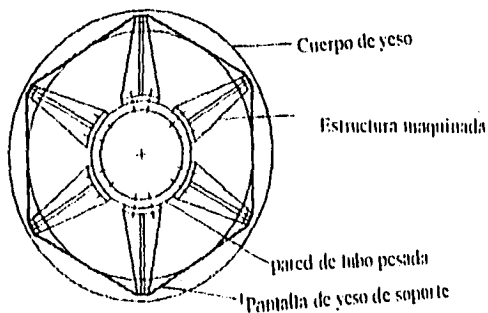
3.- *Sales eutécticas.*- Estas están mejor adaptadas que las aleaciones, y son aplicables para diámetros arriba de 2 pies (0.6 m). Con cuidado pueden ser moldeadas, y son fáciles de eliminar.

4.- *Empastados solubles.* Estos tienen un gran estado plástico y pueden ser soldados en su superficie.

5.- *El arena - PVA.* Este material es una excelente elección para los diámetros superiores a 5 pies (1.5 m) y para cantidades limitadas. Este se disuelve fácilmente en agua caliente, pero requiere cuidado en el control del moldeado. La baja fuerza de compresión es una limitante.

6.- *Los inflamables.* Estos no son convenientes donde es necesario para resistir las cargas de los esfuerzos de torsión o rotación. Una técnica para mejorar la resistencia a los esfuerzos de torsión o rotación es empastar el mandril con un material tal como la arena y hacer un vacío. Otro uso para los inflamables es para trasladar el enrollado sin tratamiento a un molde cerrado y para tratarlo con presión a través del mandril.

La figura 3.8 es un esquema de la estructura de soporte para un mandril de emplastado debilitado. La figura 3.9 representa el espesor del mandril en contra del diámetro, para los tres materiales. En el último caso, el vacío es diseñado para un pre-esfuerzo igual al 20% de la presión de operación.



**Figura 3.8**

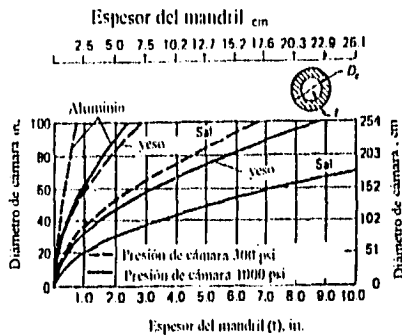


Figura 3.9

### 3.1.7 EL MANEJO DE MATERIALES Y LOS PROCESOS DE CONTROL

El equipo para transportar las fibras de empaque del removido para las formas del mandril es una característica esencial del enrollado. Este tipo de equipo proporciona los medios para controlar la tensión, el contenido de resina, la anchura de la banda, y el grosor de la capa. La cuidadosa atención a los detalles en estos puntos previene el daño de las fibras y conduce a las propiedades mecánicas óptimas y la uniformidad del producto.

La tensión es proporcionada por el ojo de dirección, las barras contadoras, y el arrastre a través del tanque de la resina. Típicamente, los rangos de tensión van desde 0.25-1.0 lbs (1-4.4 N) por terminal. El procedimiento normal es mantener la tensión sobre la fibra seca en un mínimo para prevenir la abrasión excesiva y los enredos. La tensión es entonces incrementada cuando la hebra

pasa a través del tanque de la resina y la barra de alimentación. Con los tubos mas pequeños dentro de la torsión recorriendo el empaque, la suficiente tensión inicial puede ser aplicada por los ojos guías solamente. Cuando el recorrido está enrollado en el tubo por una torcedura externa, puede ser necesario instalar alguna forma de freno sobre cada enrollado. Después de la tensión inicial, un número mínimo de guías son empleados a la hebra para el tanque de la resina. La guía de la cerámica usada para el manejo de las fibras textiles son consideradas superiores a otros materiales, tales como el acero inoxidable y el teflón. Diferentes disposiciones de guías son mostrados en la Figura 3.10.

El diseño del tanque de impregnado depende de un número de hebras que son procesadas, de la velocidad del proceso, de la viscosidad de la resina, del tiempo del gel de la resina, y de si se calienta o no la resina. Los dos métodos básicos para el impregnado de la hebra son ilustrados en la Figura 3.11. En un caso, las hebras pasan bajo los rodillos localizados en la resina. El otro método alternativo es pasar la hebra sobre un rodillo medidor. Un diseño más elaborado, con un baño y rodillo, es mostrado en la Figura 3.12. Este tanque maneja una banda de 15 terminales con una tensión de 4-6 lbs (17.8-26.7 N). En la mayoría de los casos, un aparato limpiador o una cuchilla es requerida para eliminar el exceso de las hebras cuando dejan el tanque.

Diferentes métodos para la formación en una banda están representados en la Figura 3.13. En estas ilustraciones, la barra alimentadora o el ojo es dejado para que gire libremente. Para una banda más precisa localizada sobre el mandril, la cabeza alimentadora es controlada por la máquina en un curso tangente al mandril.

La velocidad del enrollado varía en un rango muy amplio. Algunas máquinas más nuevas de enrollamiento tienen capacidades hasta de 450 pies lineales por minuto (137 m/ minuto). Esta velocidad puede parecer excesiva. Un límite superior de 300-350 pies lineales por minuto (91.4-106.7 m / minuto) parecería más práctico. Para un enrollado más preciso, particularmente con las fibras de grafito y aramid, las velocidades de 50-100 pies por minuto (15.2-30.5 m/ minuto) son típicos.

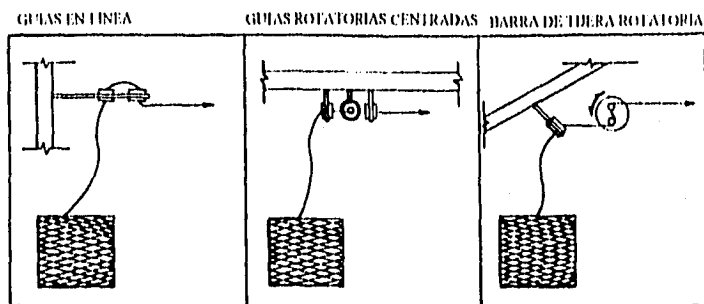
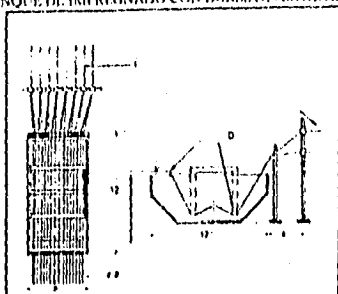


Figura 3.10

TANQUE DE IMPREGNADO CON DOBLE NIVEL DE ALIMENTACION



RODILLOS DE IMPREGNADO CON NIVEL DE ALIMENTACION SENCILLO

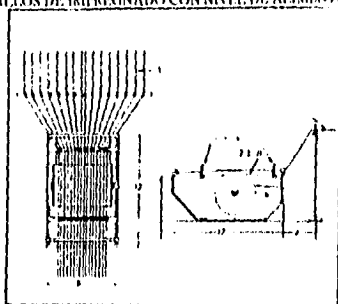
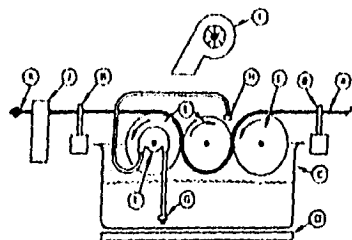


Figura 3.11



- A. SECADORA DE FILAMENTOS
- B. PEINE ALINEADOR DE FILAMENTOS
- C. RECIPIENTE PARA RESINA
- D. CALENTADOR
- E. RODILLOS DE IMPREGNADO
- F. BOMBA
- G. ADMISION DE LA BOMBA
- H. SALIDA DE LA BOMBA
- I. VENTILADOR DE AIRE CALIENTE
- J. ORIFICIO DE ARROLAMIENTO DEL FILAMENTO
- K. FILAMENTO IMPREGNADO

Figura 3.12

### **3.1.8 PROPIEDADES MECANICAS**

Un gran número de las propiedades de los compuestos procesados por arrollamiento de filamentos, dependen de ciertos factores como:

1) Una amplia selección de tipos de reforzamientos y sistemas de resinas están actualmente en uso, cada uno de los cuales requiere una evaluación separada y muchos de los cuales no han sido completamente probados.

2) Variables del proceso, tales como la uniformidad de la razón fibra / resina, el entrapamiento del aire, el grado de compactación, y el tratamiento, influyen fuertemente en las propiedades; la variación de un fabricante a otro es grande.

3) Las características del diseño, tales como el ángulo de enrollamiento, la secuencia de la capa, y el cierre de la terminal, producen diferentes resultados.

4) Las pruebas a las cuales se somete a los FRP, en general, tienden a mostrar una amplia dispersión.

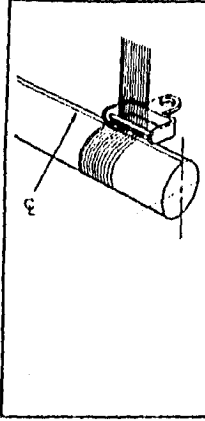
5) La evaluación de las propuestas ejemplificadas por los fabricantes del espacio aéreo y los fabricantes comerciales conducen a resultados desiguales.

6) Las estructuras diseñadas para propiedades mecánicas específicas, propiedades químicas o propiedades eléctricas, pueden ser debilitadas en algunas propiedades como resultado de la optimización.

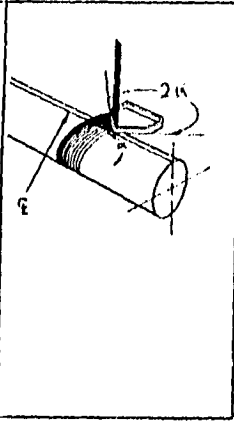
Consecuentemente, sólo ciertas propiedades mecánicas son revisadas aquí. Los valores de las propiedades de los recipientes a presión típicos y de las tuberías de uso industrial, junto con algunos resultados teóricos, son incluidos. Las propiedades químicas, eléctricas, y ambientales son de mayor interés en numerosas aplicaciones del arrollamiento. Estas propiedades no están dentro del ámbito de este capítulo. La respuesta química y eléctrica de los compuestos procesados por arrollamiento de filamentos, están esencialmente en función de los sistemas de resinas.



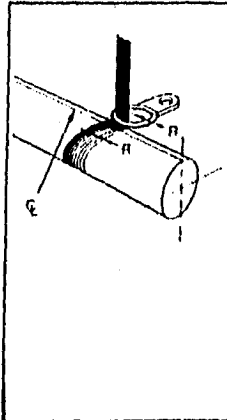
BANDA DE FORMADO  
CON BARRA RECTA



BANDA DE FORMADO CON BARRA  
DE ARMADURA DE BRAZOS RECTOS



BANDA DE FORMADO CON  
BARRA DE ANILLO



BANDA DE FORMADO CON PEINE

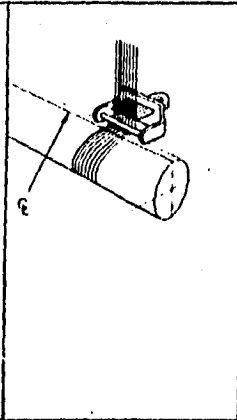
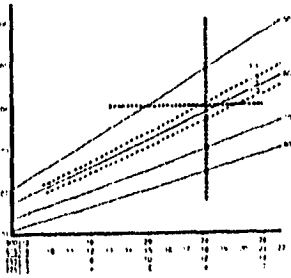


Figura 3.13



**Figura 3.14**

### 3.1.8.1 Metodos analíticos.

En el análisis de la mecánica macroscópica o macromecánica, un compuesto es analizado asumiendo que cada lámina de material compuesto es una capa homogénea y anisotrópica. Esta capa de compuesto consiste en filamentos orientados a más-menos un ángulo  $\alpha$ ; las propiedades de la capa son determinadas experimentalmente. La micromecánica, por otra parte, es un estudio de la respuesta característica de los constituyentes del compuesto; es decir, la distribución de esfuerzo y deformación en las fibras y la matriz. Las propiedades del reforzamiento y la resina, así como la geometría del compuesto, son tomados en cuenta para la determinación de esfuerzos y deformaciones. Este análisis de microesfuerzos permite establecer la carga máxima que un compuesto puede soportar antes de fracturarse. La micromecánica se utiliza también para calcular las propiedades del compuesto a partir de las propiedades de los constituyentes, y para estimar los efectos variables de estas propiedades sobre los compuestos.

El método de análisis finales es un procedimiento simplificado que normalmente se utiliza para determinar los esfuerzos a los cuales está sometida la fibra en un recipiente cilíndrico sometido a presión interna. Este método presupone que en un compuesto, únicamente las fibras tienen la capacidad para soportar las cargas y que todas las cargas están uniformemente tensadas (sometidas a esfuerzo de tensión). En la figura 3.15 se representa a dos sistemas de fabricación de capas de fibras paralelas de las cuales se pueden derivar las ecuaciones del método de análisis finales.

El esfuerzo en cada fibra es  $\sigma_f$  y actúa en el área de sección transversal de la fibra.

cruzada de la fibra. Estas fuerzas están resueltas dentro de sus componentes en las direcciones X y Y, correspondientes a la dirección del aro y la dirección longitudinal, respectivamente. Un resumen de las fuerzas en ambas direcciones conducen a las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_x = \sigma_f \cos^2 \alpha \quad (\text{Eq.15})$$

$$\sigma_y = \sigma_f \sin^2 \alpha \quad (\text{Eq.16})$$

y

$$\sigma_y / \sigma_x = \tan^2 \alpha \quad (\text{Eq.17})$$

en donde  $\alpha$  es el ángulo del enrollado.

Cuando el enrollado consiste de dos capas a diferentes ángulos, tenemos la siguiente ecuación:

en dirección longitudinal:

$$\sigma_L(t_1 + t_2) = \sigma_1 t_1 \cos^2 \alpha_1 + \sigma_2 t_2 \cos^2 \alpha_2 \quad (\text{Eq.18})$$

en dirección del aro:

$$\sigma_H(t_1 + t_2) = \sigma_1 t_1 \sin^2 \alpha_1 + \sigma_2 t_2 \sin^2 \alpha_2 \quad (\text{Eq.19})$$

Cuando la capa externa está compuesta sólo por arrollamiento de aro, las ecuaciones 18 y 19 son reducidas a:

$$\sigma_L t_1 = \sigma_1 t_1 \cos^2 \alpha_1 \quad (\text{Eq.20})$$

$$\sigma_H(t_1 + t_2) = \sigma_1 t_1 \sin^2 \alpha_1 + \sigma_2 t_2 \quad (\text{Eq.21})$$

Donde:  $\sigma_L$  = esfuerzo longitudinal.

$\sigma_H$  = esfuerzo del aro.

$\sigma_1$  = esfuerzo de la fibra en la capa 1.

$\sigma_2$  = esfuerzo de la fibra en la capa 2.

$t_1$  y  $t_2$  = espesor de la capa 1 y 2.

$\alpha_1$  y  $\alpha_2$  = ángulos del enrollado en la capa 1 y 2.

Normalmente,  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r$  y la razón entre el espesor de aro y el espesor de la espiral en un recipiente a presión, pueden ser expresados como la ecuación 3.22.

$$\frac{t_{aro}}{t_{hélice}} = 2 \cos^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_1 = 3 \cos^2 \alpha_1 - 1 \quad (\text{Eq.22})$$

El módulo de tensión en la dirección de la fibra y la relación de Poisson, son frecuentemente estimadas a través de la "regla de las mezclas".

Módulos longitudinales:

$$E_x = E_f V_f + E_m V_m \quad (\text{Eq.23})$$

Relación de Poisson:

$$\mu_{xy} = \mu_f V_f + \mu_m V_m \quad (\text{Eq.24})$$

en donde V es la fracción del volumen, y la "f" y la "m" subscritas se refieren a la fibra y la matriz.

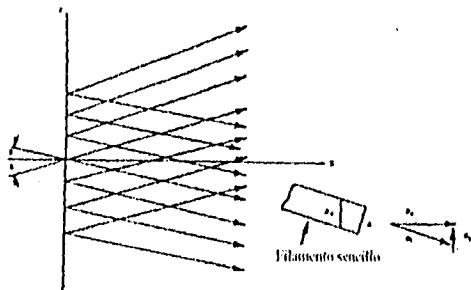


Figura 3.15

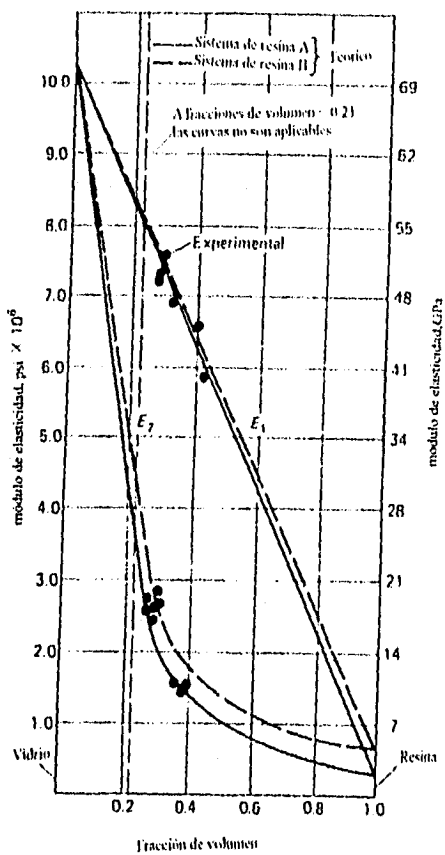


Figura 3.16

### 3.1.8.2 Soluciones analíticas.

Las aproximaciones teóricas de las principales propiedades de los compuestos son útiles, en primera instancia, en el diseño preliminar y el entendimiento de la conducta del material. También es posible establecer una correlación entre los valores empíricos y teóricos.

Algunos resultados iniciales son presentados en las Figuras 3.16-3.19, en las cuales los valores de algunas pruebas son comparados con los datos teóricos en relación con las constantes elásticas y la relación de Poisson.

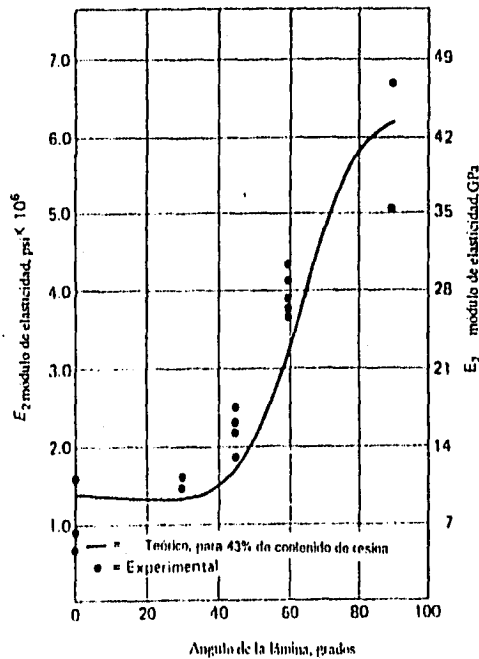


Figura 3.17

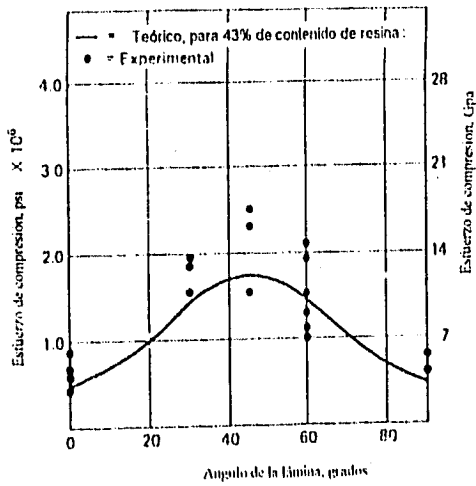


Figura 3.18

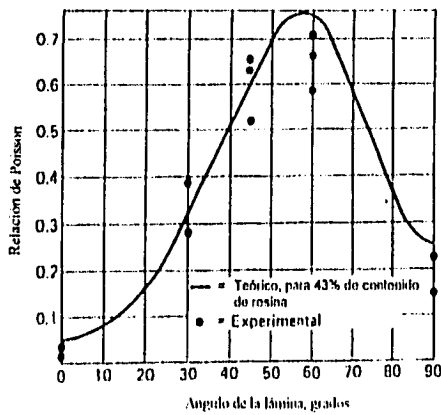
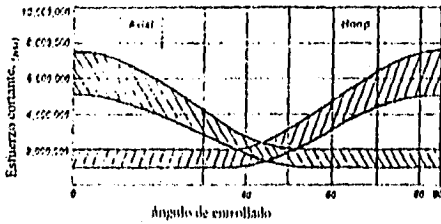


Figura 3.19

La mayoría de los análisis asumen una respuesta lineal del material, aunque éste no es el caso actual. Una comparación entre la conducta lineal y no lineal de seis capas de vidrio / fibras epóxicas, a una presión interna de



4000 lbs (27.58 MPa), se muestra en la tabla 3.5. Las cuatro capas internas son enrolladas a un ángulo de 54°, mientras que dos capas están a 83°. Como se indica, la linealidad reduce los esfuerzos en las capas internas mientras se incrementa en las capas externas. La figura 3.20 muestra una relación en los módulos efectivos típicos en contra del ángulo del enrollado.



**Figura 3.20**

Fibra	Análisis lineal, MPa	Análisis no-lineal, MPa
1	407.2	316.6
2	404.1	329.4
3	404.3	340.4
4	401.5	338.5
5	792.8	967.3
6	784.6	949.7

**Tabla 3.5** Comparación de los esfuerzos en la fibra

### **3.1.8.3 Resultados empíricos.**

Las diferentes fuerzas con las que estallan los recipientes al someterlos a presión, dependen de su diámetro. Estos recipientes están formados por enrollamiento de S-vidrio/fibra epoxica, con un rango de 55-65% de volumen de fibra. Las presiones de estallamiento son convertidas en esfuerzos para las fibras y el compuesto utilizando el método de análisis finales. Debe notarse que la presión de estallamiento, varía considerablemente con la relación entre la presurización y el tiempo de exposición a cualquier presión. Hay un efecto que se observa en los experimentos, y es que hay un decrecimiento de la fuerza que provocado por el incremento del diámetro del recipiente; pero este efecto es sólo aparente. Se han implementado factores de diseño para contrarrestar estos efectos modificando los esfuerzos permisibles de los filamentos. La tabla 3.6 enumera los factores determinados por un fabricante. Aquí, los resultados son verificados experimentalmente para diámetros arriba de 54 in. ( 1.37 m ) y han sido extrapolados para 300 in. (7.62 m ).

Diámetro ( cm )	Filamento de aro	Filamento Longitudinal
10	0.99	0.95
46	0.96	0.89
91	0.94	0.87
112	0.93	0.87
137	0.92	0.86
762	0.87	0.83

Tabla 3.6 Factores de corrección para esfuerzos permisibles.

PROPIEDAD	RANGO
TIPO DE ARROLLAMIENTO	PLANO
Diámetro ( cm )	10.2
L/D	1.3 - 3
Presión de estallamiento ( MPa )	16.9 - 19.1
Módulo de estallamiento del compuesto, longitudinal, ( GPa )	22.1 - 34.1
Módulo de aro, ( GPa )	49.6 - 62.7
Torcimiento máximo, %	
Axial	1.5 - 1.7
Aro	1.5 - 2
Esfuerzo máximo de fibra, aro, ( GPa )	2.89 - 3.05

Tabla 3.7 Recipientes de caucho forrados con Kevlar / Resina epóxica

PROPIEDAD	RANGO
DIAMETRO ( cm )	15.24
Esfuerzo máximo de fibra, aro, ( GPa )	2.43 - 2.95
Esfuerzo máximo de fibra, axial, ( GPa )	2.21 - 2.98

Tabla 3.8 Recipientes de Aluminio forrados con Kevlar / Resina epóxica

El aramid y el grafito han probado ser superiores al S-vidrio a presiones de servicio altas alcanzadas con gases licuados y conteniendo fluidos a temperatura ambiente y a temperatura criogénica. Tres tipos de recubrimientos fueron desarrollados para estos recipientes; a saber, elastomérico, metálico, y metálico de distribución de carga. Los relativamente bajos módulos del S-vidrio, limitan su aplicabilidad a recubrimientos elastoméricos. Tales recipientes, son aplicables únicamente a presiones y temperaturas moderadas. La combinación aramid / epoxy con un recubrimiento muy delgado de aluminio tiene un factor de rendimiento del orden de 1.2 millones de pulgadas ( 3 millones de cm ). El factor de rendimiento está determinado por la presión de estallamiento entre el peso total. No hay diferencia en el rendimiento entre recipientes esféricos y cilíndricos. El enrollamiento planar es superior al helicoidal en el rango de pruebas de los diámetros de recipientes. La grafito / epoxy con un

recubrimiento de titanio, tiene el peso más bajo y el ciclo de vida más largo, 300 ciclos a 50% de fuerza promedio de estallamiento. El recipiente de aramid es escasamente más pesado, tiene un ciclo de vida medio, y es menos costoso que la versión de grafito. Las tablas 3.7 y 3.8 muestran los resultados obtenidos con recipientes experimentales.

La fuerza de estallamiento bajo presión, varía según el método de experimentación. La tabla 3.9 muestra los resultados de pruebas realizadas bajo 2 condiciones: 1) con terminales cerradas, en la cual el esfuerzo de aro, es el doble que el axial; y 2) con terminales libres para deslizarse, por lo que el esfuerzo axial es cero. Las tuberías que se examinaron con estos experimentos, fueron enrolladas de fibra de vidrio / poliéster con un ángulo de  $54^{\circ} 44'$  y un volumen de fibra promedio de 53%. Los valores mostrados son el promedio de 5 experimentos. Con las terminales cerradas, la fractura de la resina ocurre muy rápido en el ciclo de presión. Con las terminales libres, la resina aparece para dominar la fractura.

	TERMINACIONES CERRADAS	TERMINACIONES ABIERTAS
<b>Esfuerzos de aro, ( MPa )</b>		
A presión de estallamiento	462	285
A presión de escurrimiento	101	259
A no-linearidad	44	48
<b>Porcentaje de torcimiento %</b>		
A presión de estallamiento		
Aro	1.75	2.4
Axial	1.62	-1.6
A presión de escurrimiento		
Aro	0.33	2.26
Axial	0.22	-1.53
A no-linearidad		
Aro	0.13	0.22
Axial	0.04	-0.13

Tabla 3.9 Pruebas bajo condiciones de terminación cerrada y abierta.

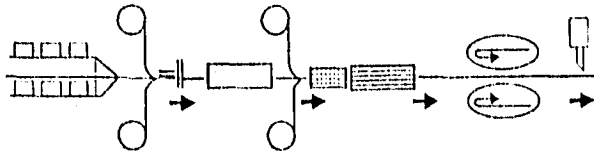
### **3.2 PULTRUSION**

La pultrusión es un proceso de manufactura continuo utilizado para producir perfiles estructurales plásticos reforzados con alto contenido de fibra. La pultrusión se diferencia del arrollamiento de filamentos en que el arrollamiento de filamentos sitúa su reforzamiento primario en dirección circunferencial ( en dirección del anillo ), mientras que la pultrusión tiene su reforzamiento primario en dirección longitudinal. Por consiguiente, mientras se obtengan buenas propiedades mecánicas con el proceso de pultrusión en dirección transversal utilizando reforzamientos especiales, el esfuerzo primario ocurrirá en dirección longitudinal.

En el proceso de pultrusión, las fibras de reforzamiento que previamente han sido impregnadas con una solución con resina y otros aditivos, son empujadas a través de un dado caliente. Los reforzamientos entran en el dado generalmente saturados de una solución de resina líquida, pero al salir del dado están en estado sólido. El proceso de pultrusión puede producir formas sólidas, huecas o abiertas, las cuales pueden ser cortadas en la máquina a lo largo.

El proceso de pultrusión es un proceso continuo que puede manufacturar de 1.5-60 m/h, dependiendo de la forma del perfil.

Una máquina de pultrusión puede ser dividida en 5 áreas funcionales para su operación como se muestra en la figura 3.21.



**Figura 3.21** Máquina de pultrusión.

La descripción del proceso de pultrusión se centra alrededor de este tipo particular de máquina, la cual a excepción del mecanismo de empuje, es básicamente la misma máquina de otros diseños.

Las cinco áreas funcionales de la máquina son las siguientes:

- 1.- Área de alimentación y colocación de los refuerzos de fibra.
- 2.- Área de impregnado de la fibra.
- 3.- Área de realización.
- 4.- Área de corte.
- 5.- Área de empuje.

El proceso de pultrusión fue catalogado originalmente como un método para elaborar secciones sólidas simples con reforzamientos de fibras unidireccionales. Pero al ir evolucionando ha adquirido la habilidad de crear propiedades excelentes en los perfiles, y así, ha podido satisfacer los requerimientos estructurales de la ingeniería.

La resistencia química, la resistencia a altas temperaturas, la resistencia al impacto, y las propiedades de fatiga, pueden aumentar con una apropiada selección de la resina.



Se han hecho mejoras al proceso a través del tiempo, con el objeto de que estuviera comercialmente disponible. Los coeficientes de producción han ido en aumento desde 2-3 ft/min. ( 61-91 cm/min. ) hasta 15-20 ft/min ( 457-610 cm/min ).

Este dramático aumento en la producción se ha debido a la relación entre las modificaciones hechas a la resina, y a las avanzadas técnicas de curado. El uso de frecuencias de radio para calentar, en conjunción con las técnicas tradicionales de calentamiento, no solamente incrementan la velocidad de producción sino que permiten también manufacturar perfiles en masa.

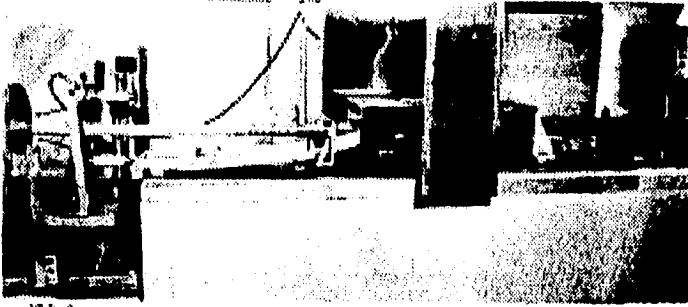
Ahora que la producción de perfiles complejos se ha hecho bastante común, se ha dado actualmente mayor importancia al área que proporciona la orientación de fibra más exacta, que permita optimizar las propiedades de los diferentes perfiles.

Normalmente, el paquete de fibras orientadas es secado y después impregnado por bombeo del sistema de resina a través del paquete seco. Esta aproximación tiende a eliminar el aire entrante. El exceso de resina es drenado y regresado al sumidero para recircularse ( ver figura 3.22).

En última instancia, el paquete seco de fibras orientadas se forma continuamente en un mandril cilíndrico donde también toma su forma ( ver figura 3.23 ).

El incremento en la disponibilidad y continua reducción del costo, han alentado el uso de fibras de alta resistencia en el proceso de pultrusión. Grafito, aramid, y fibra de vidrio, han empezado a ser utilizadas para producir diversas formas estructurales con propiedades muy superiores a las de los materiales tradicionales. La hibridización de estas fibras para satisfacer los

parametros tanto ingenieriles como económicos, ha venido a ser una realidad comercial.



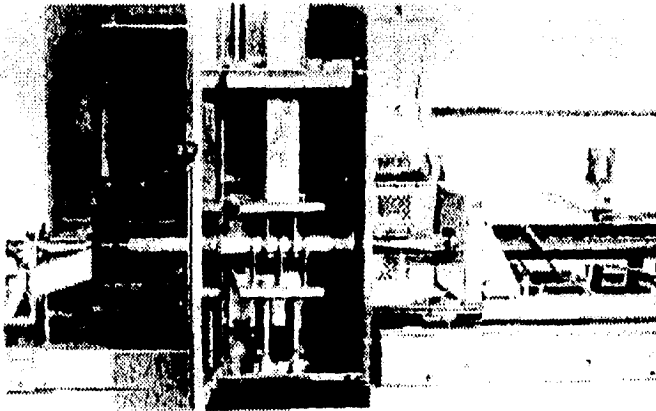
**Figura 3.22** Impregnado

Aunque si bien las propiedades de las formas obtenidas en el proceso de pultrusión con reforzamiento de varias formas de fibras de vidrio-E han sido bien documentadas, muy pocas han sido publicadas en las propiedades de perfiles utilizando fibras de alta resistencia.

En años recientes, el proceso de pultrusión se ha convertido en una de las técnicas de producción de materiales compuestos con mejor relación costo-eficiencia.

Hoy en día, muchas de las actividades industriales de pultrusión se realizan con un sistema de resina de poliéster no saturada reforzada con fibra de vidrio, mientras que las actividades realizadas con sistemas de resina epóxica reforzada con fibras de vidrio o de carbón, son relativamente pocas. Esto es debido a que la resina epóxica requiere una alta concentración de calor al principio del proceso. Muy recientemente, sin embargo, se han reportado avances en el desarrollo de un nuevo sistema de resina epóxica que

se puede procesar por pultrusión a velocidades comparadas a las del sistema de resina de poliéster no saturada ( 2-3 ft/min ).

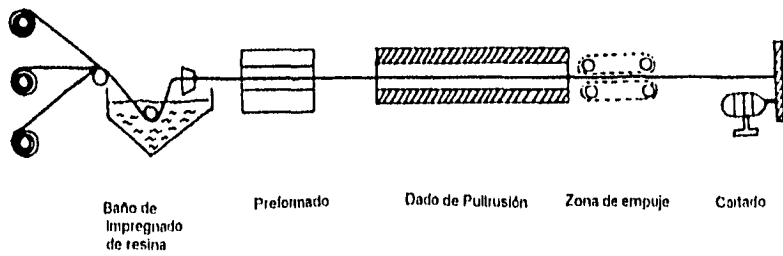


**Figura 3.23** Mandril cilíndrico.

Para producir productos de alta calidad por pultrusión, es esencial desarrollar una estrategia para controlar el proceso de pultrusión, fundamentada en las bases de la investigación. Para llevar a cabo un grado uniforme de curado en la sección transversal del producto pultruido, la temperatura del dado de pultrusión es la variable más importante del proceso. Debe ser puntualizado que el control de la temperatura del dado requiere cierta información de la reacción que tiene lugar dentro del dado. Es por lo tanto importante el desarrollo de un modelo matemático para poder simular el proceso de pultrusión y en última instancia controlar el proceso.

### 3.2.1 DESCRIPCION DEL PROCESO

Consideremos que se impregnan las fibras de la matriz y que son empujadas a una velocidad constante a través, por ejemplo, de un dado largo de forma cilíndrica, el cual es calentado eléctricamente para mantener una distribución de temperatura predeterminada, tal como se muestra en la Figura 3.24. Como las fibras impregnadas con la matriz entran al dado, inicialmente el calor es conducido desde la pared del dado al material. Debido a la baja conductividad térmica de la matriz y de las fibras, el centro de una sección dada no llega a la temperatura de la pared del dado hasta un tiempo después de que la sección del material ha entrado en el dado. En otras palabras, la temperatura del material cerca de la pared del dado, inicialmente es más que la del centro. Cuando la temperatura del material alcanza un valor en el cual un iniciador ( o catalizador ) se activa, se inicia la reacción de curado y genera calor debido a la naturaleza exotérmica de la reacción química que tiene lugar entre la resina y el iniciador ( o catalizador ). Como el calor generado por la reacción de curado ayuda a acelerar otras reacciones, como una reacción autocatalítica, la temperatura de la sección transversal del material en el centro del dado comienza a ser más alta que la temperatura cerca de las paredes del dado. Por ese motivo el calor externo de origen no será necesario por mucho tiempo, y así el calor se conducirá del material a la pared del dado.



**Figura 3.24** Proceso de pultrusión.

De esto se puede deducir que la temperatura es la variable más importante para controlar el proceso de pultrusión, y por lo tanto la calidad de los productos pultruidos. Debe hacerse notar que una distribución no uniforme de la temperatura en la sección transversal del material, implica una distribución no uniforme del peso molecular y, así, de las propiedades mecánicas de los productos pultruidos.

Usualmente, el volumen de fibra en la mezcla ( no reactiva ) de fibra-resina es en algunos casos de 50-70%, y las fibras actúan como un absorbedor del calor generado por la reacción exotérmica de la resina y así, ayudando a controlar el aumento de temperatura en el material.

El aumento de temperatura en el material después de entrar en el dado, depende del tipo de resina y de iniciador ( catalizador ) utilizado. La razón entre longitud y diámetro en el dado de pultrusión es usualmente muy grande, y la velocidad de empuje es relativamente lenta. Por lo tanto, el uso de cualquiera de los dos, también activa un iniciador o una cantidad grande de iniciadores, la cual debe de evitarse. Bajo estas circunstancias, las reacciones de curado tendrán que completarse cerca de las paredes del dado, dando lugar a una distribución no uniforme del grado de curado en la sección transversal,

y así, originar una mala calidad del producto pultruido. Por otro lado, el uso de cualquiera de los dos, también suaviza ( o apacigua ) un iniciador o una cantidad insuficiente de iniciadores que dará lugar a un bajo grado de curado, y así nuevamente, se producirá una mala calidad en el producto pultruido. Por lo tanto es necesario un cuidadoso balance entre la reactividad de la resina, la reactividad y cantidad de iniciador, la temperatura del dado, el espesor de las partes a pultruir, y además la velocidad de empuje, que es la que determina el tiempo de permanencia del material en el dado.

Un iniciador tiene un rango de temperatura estrecho dentro del cual se puede activar, mientras que un dado tiene una extensa distribución de temperatura. Por lo tanto, en la pultrusión de la resina de poliéster no-saturada, frecuentemente se utilizan mezclas de iniciadores de baja y alta temperatura, de manera que el iniciador de baja temperatura inicia la reacción enseguida de que ha entrado la resina impregnada en el dado, y el iniciador de alta temperatura continua manteniendo la reacción después de la que la temperatura del material ha llegado hasta cierto nivel ( por ejemplo, después de que el material ha entrado en el dado y ha viajado una cierta distancia ).

La figura 3.25 da un ejemplo de la descripción de la razón de calor generado (  $dQ/dt$  ) en un diferencial de exploración calorimétrico no isotérmico DSC ( Differential Scanning Calorimetry ) en un rango de exploración de  $5^{\circ}C/min$ , utilizando un iniciador de alta y uno de baja temperatura, separadamente, y utilizando una mezcla de los dos iniciadores. Se puede observar que el uso de la mezcla de los dos iniciadores da lugar a un valor más bajo del máximo, y un perfil más uniforme de  $dQ/dt$  que si utilizáramos los dos iniciadores por separado. Esto quiere decir que el uso de iniciadores mezclados en la operación de pultrusión, puede dar lugar a

perfiles más uniformes del tipo de reacción de curado ( y por lo tanto a una calidad de producto más uniforme ) que si usamos separadamente los dos iniciadores.

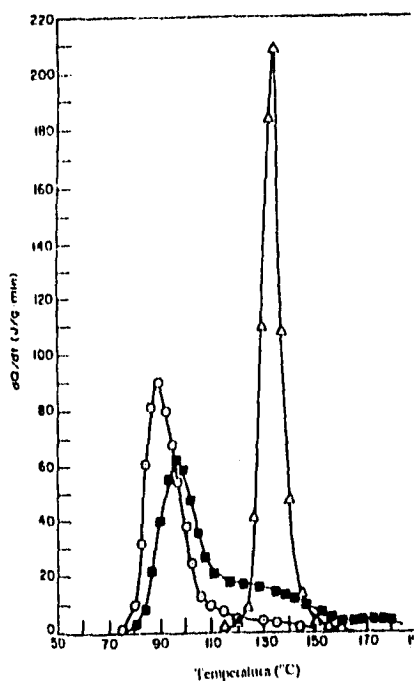


Figura 3.25

### 3.2.2 DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO

Para demostrar una técnica que nos permita modelar y simplificar los resultados de las manipulaciones matemáticas, consideraremos un dado de

forma cilíndrica, a través del cual se empuja las fibras impregnadas con la resina.

En el análisis siguiente, no consideraremos la transferencia de calor que ocurre en el radio de frecuencia de radiación en el cual el material, mientras viaja, es calentado a la temperatura deseada. En adición, haremos las siguientes suposiciones:

- (1) El proceso se realiza en estado estable.
- (2) La velocidad del perfil es constante.
- (3) La conducción de calor en dirección axial es insignificante comparada con la de dirección radial.
- (4) La difusión de la resina durante el curado es insignificante.
- (5) El movimiento local de la resina durante el curado es insignificante.

### **3.2.2.1 Ecuaciones de balance de energía y continuidad.**

Usando coordenadas cilíndricas, la ecuación de continuidad está dada por:

$$v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = R_A \quad (\text{Eq. 25})$$

Donde  $v_z$  es la velocidad de la resina en el dado de pultrusión,  $C_A$  es la concentración de la resina reactiva dentro del dado de pultrusión,  $z$  es la posición axial en el dado de pultrusión,  $R_A$  es la razón de formación de fibra curada.



Definiendo el grado de curado,  $\alpha$ ,

$$\alpha = (C_{A0} - C_A)/C_{A0} \quad (\text{Eq.26})$$

Donde  $C_{A0}$  es la concentración inicial de resina a la entrada del dado ( $z = 0$ ).

Y tenemos:

$$\frac{d\alpha}{dt} = v_z \frac{\partial \alpha}{\partial z} = - \frac{v_z}{C_{A0}} \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (\text{Eq.27})$$

Donde  $t$  es el tiempo, y sustituyendo la ecuación 27 en 25 tenemos:

$$C_{A0} \frac{d\alpha}{dt} = -R_A \quad (\text{Eq.28})$$

La ecuación de balance de energía está dada por:

$$\rho C_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + R_A \Delta H_R \quad (\text{Eq.29})$$

En las ecuaciones anteriores,  $v_z$  es la velocidad del movimiento de la barra cilíndrica a través del dado,  $C_A$  es la concentración de resina en el curado,  $T$  es la temperatura de la barra cilíndrica a través del dado,  $\rho$  es la densidad definida en la ecuación 30,  $C_p$  es el calor específico,  $k$  es el coeficiente de conductividad térmica,  $R_A$  es la razón de formación de resina curada,  $\Delta H_R$  es el calor generado por la reacción de curado, y  $C_{A0}$  es la concentración inicial

de resina a la entrada del dado ( $z = 0$ ),  $r$  es la posición radial del dado de pultrusión.

Hay que hacer notar que el material curado consiste de tres componentes, llamadas resina, fibras, y resina curada. Por lo tanto las propiedades físicas del material deben incluir las tres componentes. En nuestro análisis, usaremos las siguientes definiciones de propiedades físicas:

(1) densidad  $\rho$ :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w_m^0}{\rho_m} (1 - \alpha) + \frac{w_m^0}{\rho_m^0} \alpha \frac{\rho_m^0}{\rho_p} + \frac{w_f^0}{\rho_f} \quad (\text{Eq.30})$$

en la cual las densidades de la resina ( $\rho_m$ ), el producto curado ( $\rho_p$ ), y las fibras ( $\rho_f$ ) están dadas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} \rho_m &= \rho_m^0(1 + aT) \\ \rho_p &= \rho_p^0(1 + bT) \\ \rho_f &= \rho_f^0(1 + cT) \end{aligned} \quad (\text{Eq.31})$$

las fracciones volumétricas de la resina ( $\Phi_m$ ), el producto curado ( $\Phi_p$ ), y las fibras ( $\Phi_f$ ) están dadas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} \Phi_m &= w_m^0(1 - \alpha)/\rho_m \\ \Phi_p &= \alpha w_m^0 \rho/\rho_p \\ \Phi_f &= w_f^0 \rho/\rho_f \end{aligned} \quad (\text{Eq.32})$$

y las fracciones de peso en la resina ( $\omega_m$ ), el producto curado ( $\omega_p$ ), y las fibras ( $\omega_f$ ) están dadas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned}\omega_m &= \omega_m^0(1 - \alpha) \\ \omega_p &= \alpha\omega_m^0 \\ \omega_f &= \omega_f^0\end{aligned}\quad (\text{Eq.33})$$

(2) calor específico  $C_p$ :

$$c_p = \omega_m c_{pm} + \omega_p c_{pp} + \omega_f c_{pf} \quad (\text{Eq.34})$$

en la cual el calor específico de la resina ( $C_{pm}$ ), el producto curado ( $C_{pp}$ ), y las fibras ( $C_{pf}$ ) están dados, respectivamente, por:

$$\begin{aligned}c_{pm} &= c_{pm}^0(1 + a_1 T) \\ c_{pp} &= c_{pp}^0(1 + b_1 T) \\ c_{pf} &= c_{pf}^0(1 + c_1 T)\end{aligned}\quad (\text{Eq.35})$$

(3) conductividad térmica  $k$ :

$$\frac{1}{k} = \frac{\phi_m}{k_m} + \frac{\phi_p}{k_p} + \frac{\phi_f}{k_f} \quad (\text{Eq.36})$$

en donde las conductividades térmicas de la resina ( $k_m$ ), el producto curado ( $k_p$ ), y las fibras ( $k_f$ ) están dadas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned}
 k_m &= k_m^0(1 + \alpha_2 T) \\
 k_p &= k_p^0(1 + b_2 T) \\
 k_f &= k_f^0(1 + c_2 T)
 \end{aligned}
 \tag{Eq.37}$$

Las ecuaciones 1 y 5 deben ser resueltas simultáneamente, sujetas a las siguientes condiciones de frontera:

$$\begin{aligned}
 \text{(i) At } r = r_0 \text{ and } 0 \leq z \leq L, \\
 T &= T(z), \\
 \text{(ii) At } z = 0 \text{ and } 0 \leq r \leq r_0, \\
 T &= T_i \text{ and } C_A = C_{A0}, \\
 \text{(iii) At } r = 0 \text{ and } 0 \leq z \leq L, \\
 (\partial T / \partial r) &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{Eq.38}$$

Donde  $r_0$  es el radio del dado de pultrusión cilíndrico.

Para resolver las ecuaciones 25 y 29, necesitamos especificar un tipo de expresión para la cinética del curado, ya que las ecuaciones 25 y 29 se relacionan una con la otra por el tipo de reacción de curado,  $R_A$ , que a su vez depende de la temperatura  $T$ .

### 3.2.2.2 Reacción de curado.

Ya que los mecanismos de reacción de curado las resinas de poliéster no-saturada y epóxica son muy complejas, se ha propuesto una relación empírica que es:

$$da/dt = (k_1 + k_2 a^m)(1 - a)^n
 \tag{Eq.39}$$

que describe las observaciones experimentales de los curados tanto con resinas de poliéster no-saturada, como de resina epóxica. En la ecuación 39,  $\alpha$  denota el grado de curado, definido por la ecuación 26,  $m$  y  $n$  son constantes, y  $k_1$  y  $k_2$  son constantes de la reacción de curado que varían con la temperatura definidas en la eq. 40, siguiendo la relación de Arrhenius:

$$\begin{aligned} k_1 &= k_{10} \exp(-E_1/RT) \\ k_2 &= k_{20} \exp(-E_2/RT) \end{aligned} \quad (\text{Eq.40})$$

en la cual,  $k_{10}$  y  $k_{20}$  son factores de frecuencia,  $E_1$  y  $E_2$  son activadores de energía,  $R$  es la constante universal de los gases. La literatura dice que una ecuación de segundo orden ( $n + m = 2$ ) describiría bastante bien las reacciones de curado de las resina de poliéster no-saturada y epóxica.

Existen algunas desventajas en el uso de la expresión empírica, Eq. 15, en la descripción de las reacciones de curado de resinas termoestables. Por ejemplo, la ecuación 39 no describe explícitamente los efectos de la concentración de un catalizador y/o un inhibidor y los mecanismos de control en el proceso de curado. Hoy en día se sabe que, conforme avanza la reacción de curado, el tamaño de las moléculas se hace más grande y, por lo tanto, la difusión de monómeros en el crecimiento de las moléculas se convierte en un proceso controlado. Para disminuir estas desventajas, se han hecho, últimamente, varios intentos para desarrollar un modelo mecánico que

describa las reacciones de curado de la resina de poliéster no-saturada, utilizando el concepto de polimerización por radical libre.

### 3.2.2.3 Sistema de ecuaciones.

El uso de las ecuaciones 25-27 en la ecuación 39 nos da:

$$-R_A = C_{A0}(k_1 + k_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (\text{Eq.41})$$

Sustituyendo la Ec. 27 en la Ec. 39, y la Ec. 41 en la Ec. 29, nos da:

$$B_1 \frac{\partial \alpha}{\partial Z} = (K_1 + K_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (\text{Eq.42})$$

$$Pe \dot{\rho} \dot{c}_p \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \left( k \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) \right) + B_2(K_1 + K_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (\text{Eq.43})$$

donde

$$\begin{aligned} B_1 &= v_s/r_0 k_{20}, \quad B_2 = k_{20} \Delta H C_{A0} r_0^2 / k_m T_i \\ Pe &= \rho_m c_{pm} v_s r_0 / k_m; \quad R = r/r_0; \quad Z = z/r_0; \\ \theta &= T/T_i; \quad K_1 = k_1/k_{20}; \quad K_2 = k_2/k_{20}; \\ \dot{\rho} &= \rho/\rho_m; \quad \dot{c}_p = c_p/c_{pm} \end{aligned} \quad (\text{Eq.44})$$

Nótese que en las ecuaciones 42 y 43 las constantes adimensionales K1 y K2, definidas en la ec. 44, están en función de la temperatura  $\theta$ .

### **3.2.3 DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS PARAMETROS CINETICOS DEL CURADO.**

#### **3.2.3.1 Materiales.**

Se ha utilizado una resina comercial de poliéster no-saturada ( Owens - Corning Fiberglas Corp., OC-E701) y un desarrollo de resina epóxica (Shell Development Co., resina Epon 9302 y un agente de curado Epon 9350).

Para el proceso de curado de la OC-E701, utilizamos dos sistemas de iniciadores, siendo cada uno una mezcla de dos iniciadores, llamados (1) una mezcla de Percadox 16N (P16N) (Noury Chemical Corp.) y t-butyl perbenzonato (TBPB) (Pennwalt Chemical Corp.) y (2) una mezcla de P16N y benzoyl peróxido (BPO) (Noury Chemical Corp., CADET Benzoyl Peróxido- 78 WET). Hay que hacer notar que el 16N es un iniciador de baja temperatura, y ambos el TBPB y el BPO son iniciadores de alta temperatura. Es una práctica común en la industria de la pultrusión, el usar dos o más iniciadores para la resina de poliéster, ya que la temperatura de las fibras impregnadas con la resina a la entrada del dado es bastante baja en general ( 80 -140 °F ). En este estudio, se utilizaron : (1) 0.75 partes de P16N y 0.25 partes de TBPB por 100 partes de resina, y (2) 0.5 partes de P16N y 1.5 partes de BPO por 100 partes de resina. Se utilizaron 2 diferentes grados de fibra de vidrio, cada una tratada químicamente con diferentes medidas. Por cada grado de fibra de vidrio, utilizamos una razón de peso resina/fibra de 25/75.

Para el curado de la resina Epon 9302, se utilizaron 3 partes de agente de curado Epon 9350 por 100 partes de resina, y dos diferentes tipos de fibra, llamadas (1) fibra de vidrio (PPG 712NT) y fibra de carbono (Union Carbide, T-300). Por cada fibra, se utilizó una razón de peso resina/fibra de 25/75. La tabla 3.10 da una lista de los materiales que se han utilizado para el estudio de la cinética del curado.

Código	Sistema de resina	Fibra
PE - 1	OC - E701/P16/BPO	Fibra de vidrio (Owens-Corning)
PE - 2	OC - E701/P16/TBPB	Fibra de vidrio (Owens-Corning)
EP - 1	EPON 9302/CA 9350	Fibra de Carbono (Union Carbide Thomel T-500)
EP - 2	EPON 9302/CA 9350	Fibra de vidrio (PPG-721)

Tabla 3.10 Materiales y formulaciones utilizadas en el estudio del curado.

### 3.2.3.2 Determinación de los parámetros cinéticos para las reacciones de curado.

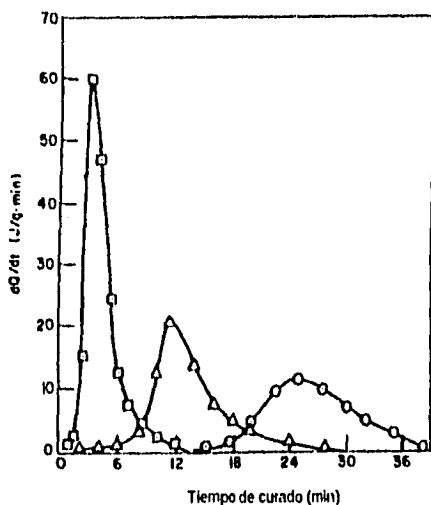
El DSC fue utilizado para investigar la cinética del curado de los materiales listados en la tabla 1. Para el estudio, se utilizó un analizador térmico de Du Pont 1090 equipado con un módulo 910 de DSC.

La cantidad de calor producida por la reacción de curado fue medida completando la reacción isotérmicamente, a varias temperaturas. El tiempo requerido para completar la reacción de curado fue determinado por termogramas ( por ejemplo, gráficas de calor contra tiempo ). El área bajo la



curva de los termogramas fue determinada integrando la señal de salida utilizando un programa interactivo de DSC que fue construido en Du Pont.

La figura 3.26 muestra las gráficas del calor generado ( $dQ/dt$ ) contra el tiempo de curado ( $t$ ) para un DSC isotérmico. Se puede ver que  $dQ/dt$  se incrementa conforme se incrementa la temperatura, tal como se esperaba por las reacciones químicas exotérmicas.



**Figura 3.26**

La figura 3.27 muestra los resultados desplegando: (1) el calor generado ( $Q_r$ ) durante el proceso isotérmico; (2) el calor residual ( $Q_R$ ) que se liberó cuando la muestra fue calentada a 200 °C; y (3) el calor total de la reacción de curado ( $Q_{TOT}$ ) dado por:

$$Q_{TOT} = Q_r + Q_R \quad (\text{Eq.45})$$

Si asumimos que la cantidad de calor generada (  $Q_T$  ) por la reacción de curado, es directamente proporcional al grado de curado (  $\alpha$  ) de la muestra en ese tiempo, podemos definir la relación de curado,  $d\alpha/dt$ , por:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{Q_{UR}} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_T \quad (\text{Eq.46})$$

donde  $Q_{UR}$  es el calor último de la reacción de curado. El valor de  $Q_{UR}$  utilizado fue el promedio de varios valores de  $Q_{OR}$ , definido por la ec. 45.

Hay que notar que  $(dQ/dt)_T$  en la ec. 46 es una cantidad medida experimentalmente a temperatura  $T$  ( ver la fig. 3.25 ).

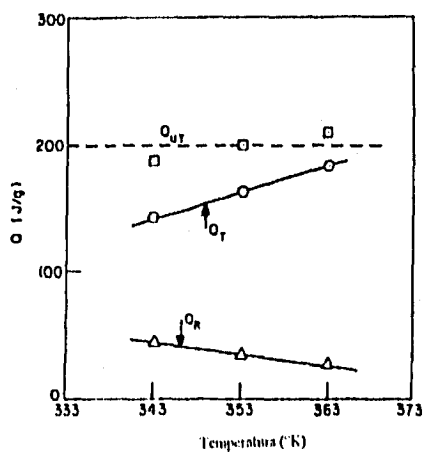


Figura 3.27

Para ayudar a resolver el sistema de ecuaciones presentado anteriormente para la simulación del proceso de pultrusión, se necesita generar dos piezas de información adicional: (1) el calor de la reacción durante el curado ( $\Delta H_r$ ), y (2) la relación entre  $d\alpha/dt$  y  $\alpha$ , representada por la ec. 39. Para  $\Delta H_r$ , se utilizó el calor último de la reacción de curado  $Q_{ur}$ . Teniendo ya construidas las gráficas de  $d\alpha/dt$  contra  $t$ , y  $\alpha$  contra  $t$ , tendremos construida la gráfica de  $d\alpha/dt$  contra  $\alpha$ , como lo muestra la figura 3.28.

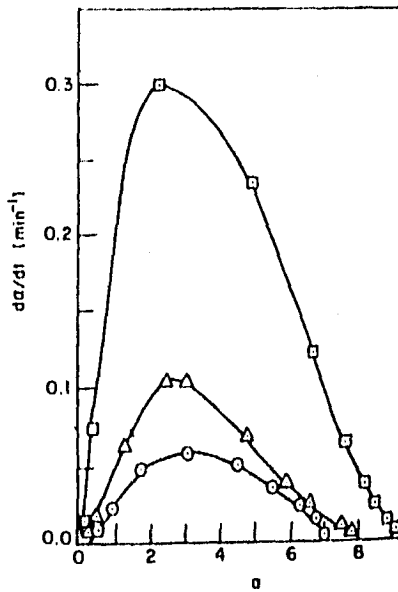


Figura 3.28

Para los materiales investigados ( ver tabla 3.11 ), se siguieron los procedimientos descritos por Han y Lem para determinar los parámetros

cinéticos,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $m$ , y  $n$ , que aparecen en la ecuación 39. Una lista de los parámetros cinéticos determinados están dados en la tabla 3.11. Nótese que los resultados experimentales confirman que los valores de  $k_1$  y  $k_2$  se incrementan con la temperatura, según la relación de Arrhenius representada en la ecuación 40.

Material	$k_{01}$ (1/min)	$E_1$ (Kcal/mol)	$k_{02}$ (1/min)	$E_2$ (Kcal/mol)	$m$	$n$
PE - 1	3.41E+14	25.57	5.17E+10	17.93	0.58	1.42
PE - 2	3.17E+19	34.98	1.78E+12	20.08	0.56	1.44
EP - 1	1.34E+10	20.02	1.69E+09	15.82	0.91	1.09
EP - 2	1.17E+08	16.71	2.70E+07	12.96	0.93	1.07

Tabla 3.11 Parámetros cinéticos.

### 3.2.4 RESULTADOS Y DISCUSION

El sistema de ecuaciones, Ecs. 42 y 43, fueron resueltas numéricamente, utilizando el método de diferencias finitas. Para el análisis numérico del cómputo del sistema poliéster/fibra y epóxica/fibra, se utilizaron los valores de los parámetros cinéticos obtenidos experimentalmente, dados en la tabla 3.11, y las propiedades termodinámicas de transporte dadas en la tabla 3.12.

Las dimensiones de la simulación del dado de pultrusión, la temperatura del material entrando en el dado, y el porcentaje en peso de fibras en el material, están dadas en la tabla 3.13.

Material	Densidad (g / cm <sup>3</sup> )	Calor específico (cal/g °K)	Conductividad térmica (cal/cm seg °K)
Poliéster no-curado	1.1	0.45	4.05E-04
Poliéster curado	1.2	0.45	1.54E-4 + 9.46E-7 T
Epóxica no-curada	1.13	2.57 + 5.97E-4 T	1.98E-4 + 4.30E-7 T
Epóxica curada	1.17	(-1.35 + 1.49E-4 T)	4.59E-4 + 1.73E-7 T
Fibra de vidrio	2.54	0.199	2.07E-03
Fibra de carbono	1.79	0.17	2.07E-02

Tabla 3.12 Propiedades físicas de los materiales investigados.

Material	Radio del dado ( cm )	Longitud del dado ( cm )	Temperatura del material ( K )	Contenido de fibra ( % peso )
PE-1 y PE-2	0.635	152.4	333	83
EP-1 y EP-2	0.635	90	298	82

Tabla 3.13 Dimensiones del dado y temperatura del material utilizado.

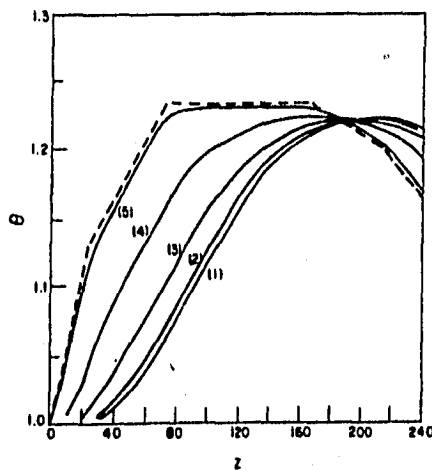


Figura 3.29

La figura 3.29 muestra las gráficas de temperatura  $\theta$  contra la posición axial  $Z$  para PE-1, para varios valores de la posición radial  $R$  como parámetro. Nótese que en la figura 3.29 la línea punteada representa el perfil

de temperatura de la pared del dado, empleada en las condiciones de frontera en la solución de las ecs. 42 y 43 ( ver ec. 38 ).

Las siguientes observaciones se hacen patentes en la figura 3.29 : (1) la conductividad térmica de la resina y de la fibra de vidrio ( especialmente la de la resina ) son muy bajas ( ver tabla 3.12 ), la cantidad de calor transferida en la dirección radial ( por ejemplo, de la pared al centro del dado ) es muy bajo, y esto se ve reflejado en una diferencia muy grande de temperatura entre una región cerca de la pared del dado y el centro del dado; (2) conforme se incrementa la temperatura hasta el nivel en el cual se comienza a descomponer el iniciador, se inicia la reacción de curado. La reacción de curado comienza exotérmica, y la temperatura se incrementa conforme continúa la reacción de curado. Esta es la razón por la cual la temperatura en el centro del dado ( por ejemplo, a  $R = 0$  ) continúa incrementándose inclusive en la región donde la temperatura de la pared del dado es constante; (3) Conforme la temperatura de la pared del dado decrece cerca del final del dado, la temperatura en el centro del dado se incrementa hasta un valor más alto que el de la pared del dado. Esto se atribuye al hecho de que la reacción de curado continúa en el centro del dado, generando calor, la conductividad térmica del material es tan pobre que el centro del dado no se puede enfriar lo suficientemente rápido.

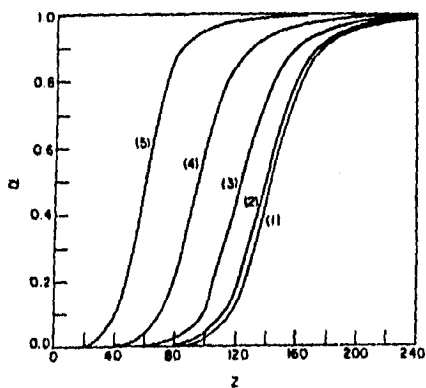


Figura 3.30

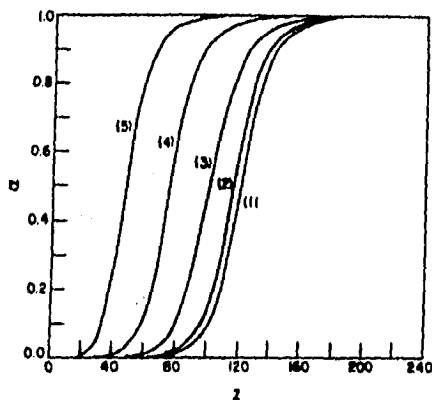


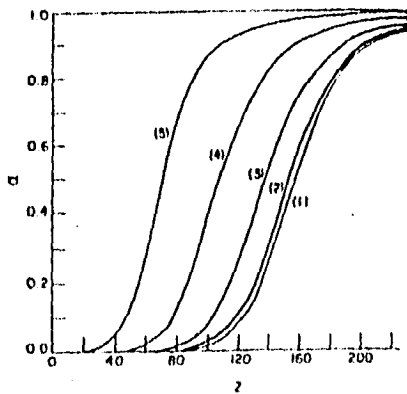
Figura 3.31

La figura 3.30 muestra las gráficas del grado de conversión  $\alpha$ , contra la posición axial dimensional  $Z$  del PE-1, con el dimensional de posición radial  $R$  como parámetro. Se ve que, a  $Z = 80$ , cerca del 90 % de la conversión se ha llevado a cabo en la región cerca de la pared del dado, mientras que la reacción de curado no ha comenzado aún en el centro. Esto se debe a que,



como se muestra en la figura 3.29, a Z 0 80 la temperatura en el centro del dado no ha llegado a un nivel en el cual el iniciador de baja temperatura P16N puede comenzar a descomponerse.

La figura 3.31 muestra los perfiles teóricamente predichos de  $\alpha$  para PE-2. Nótese que el Pe-2 tiene 0.75 partes de P16N y 0.25 partes de TBPB, mientras el PE-1 tiene 0.5 partes de P16N y 1.5 partes de BPO (ver tabla 3.11). Note que el P16N es un iniciador de baja temperatura. El 100% de conversión se lleva a cabo con el PE-2 a una distancia mucho más corta que la requerida con el PE-1 ( comparar la figura 3.31 con la figura 3.30 ), esto es debido a que el PE-2 tiene una mayor cantidad de P16N que el PE-1. Para probar esta especulación, se han computado los perfiles de  $\alpha$  cuando un iniciador de alta temperatura BPO es utilizado sólo, en lugar de una mezcla de P16 y PBO; los resultados se dan en la figura 3.32. Se ve en la figura 3.32 que en la región cerca de la pared del dado se logra un 100% de conversión en una posición axial muy cerca de la salida del dado, mientras que en el centro del dado se logra sólo el 90% de conversión. Esto indica claramente la ventaja del uso de un iniciador de alta temperatura sólo.



**Figura 3.32**

Las figuras 3.33 y 3.34 se muestran los perfiles teóricamente predichos de  $\theta$  para EP-1 y EP-2, respectivamente, bajo las condiciones idénticas de la pultrusión, y las figuras 3.35 y 3.36 muestran el correspondiente perfil de  $\alpha$ . Se ve en las figuras 3.33 y 3.34 que, para EP-1, la temperatura del centro del dado se aproxima a un valor cercano al que existe a la mitad del dado ( $Z = 75$ ), pero para el EP-2 esto ocurre aproximadamente a la salida del dado ( $Z = 150$ ). Esta notable diferencia en los perfiles de temperatura entre el EP-1 y el EP-2 se debe, en gran parte, al hecho de que la conductividad térmica de las fibras de carbono presentes en EP-1 es un ordenamiento de una magnitud mayor que la de las fibras de vidrio presentes en EP-2 ( ver tabla 3.13 ), y así la transferencia de calor desde la pared del dado al centro del dado es mucho más efectiva con el EP-1 que con el EP-2.

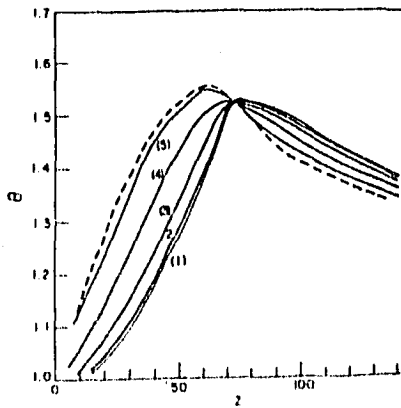


Figura 3.33

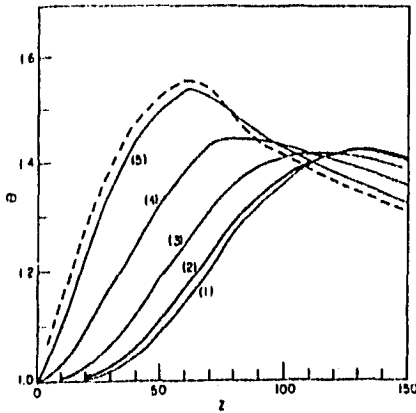


Figura 3.34

Se ve en las figuras 3.35 y 3.36 que existe una considerable diferencia en los perfiles de  $\alpha$  entre el EP-1 y el EP-2. Esto se puede atribuir, en adición a la diferencia en conductividad térmica entre las fibras de carbono y las fibras de vidrio, a la diferencia en el desarrollo del curado entre el PE-1 y el

EP-2. En otras palabras, las fibras de carbono en el EP-1 pueden incrementar el tipo de curado de la resina Epon 9302 más de lo que lo hacen las fibras de vidrio en el EP-2. Las figuras 3.37 y 3.38 muestran las gráficas de  $\alpha$  contra el tiempo de curado para EP-1 y EP-2, respectivamente, en varios valores de temperatura constante. Se ve en estas figuras que, durante el mismo periodo de la reacción de curado, el EP-1 logra valores más altos de  $\alpha$  que el EP-2 y el EP-1 logra el valor final de  $\alpha$  más pronto que el EP-2.

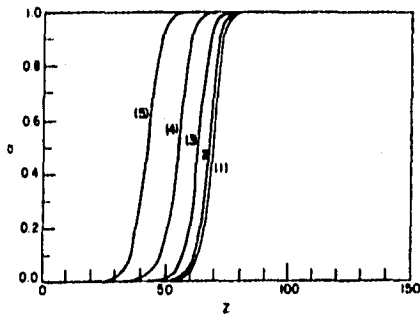


Figura 3.35

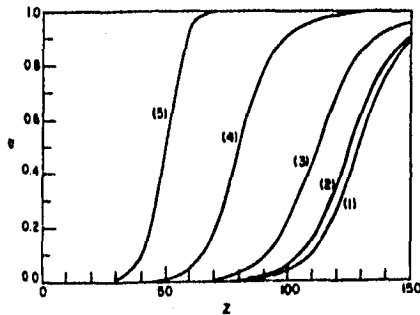


Figura 3.36

Una de las variables más importantes en el proceso que afectan las propiedades del producto pultruido es la velocidad de empuje. De ahí que se haya investigado el efecto de la velocidad de empuje en los perfiles de temperatura y el grado de conversión. Para la simulación, se utilizaron las condiciones de pultrusión empleadas en los experimentos de T.J. Tuling. Las figuras 3.39 y 3.40 muestran los perfiles predichos teóricamente de  $\theta$  para el EP-2 a una velocidad de empuje de 1.04 ft/min y 0.58 ft/min, respectivamente. Se ve en estas figuras que, conforme la velocidad de empuje decrece desde 1.04 ft/min hasta 0.58 ft/min, la posición a la cual la temperatura del centro del dado llega a un máximo es disminuida de  $Z = 100$  a  $Z = 80$ , implicando que el curado se complete en la primera parte del dado conforme el tiempo de residencia se incrementa de 2.8 min a 5.1 min.

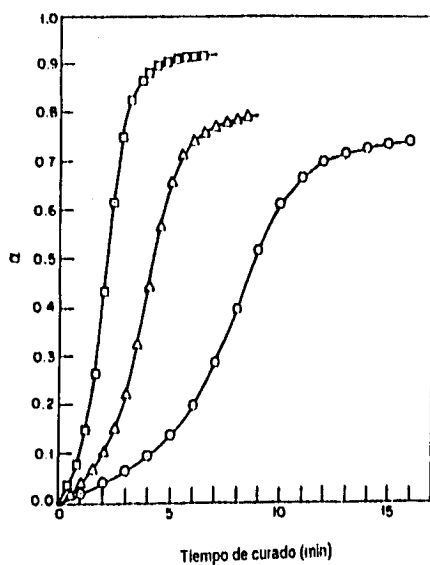


Figura 3.37

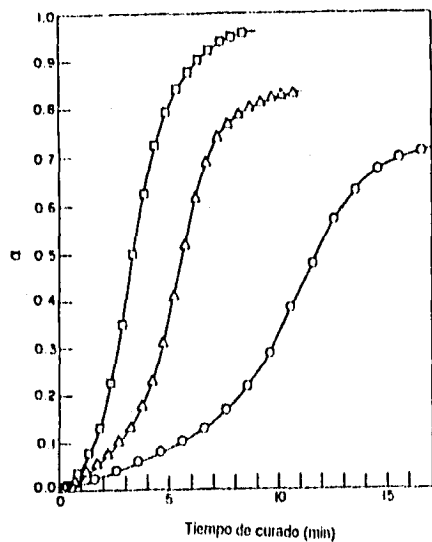


Figura 3.38

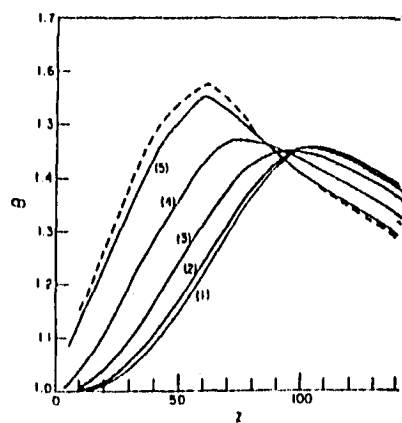


Figura 3.39

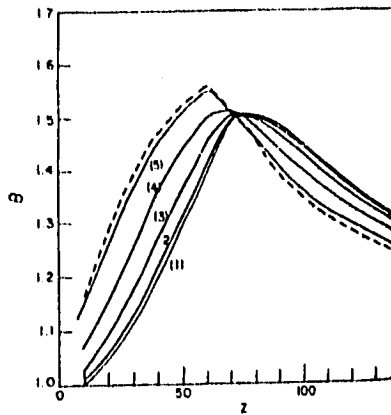


Figura 3.40

### 3.2.5 CONCLUSIONES

Un modelo matemático ha sido desarrollado para predecir los perfiles de temperatura y el grado de curado en las direcciones axial y radial, a las que se hizo referencia anteriormente, en un dado de pultrusión de forma cilíndrica. El modelo fue utilizado para simular los efectos característicos en el proceso de pultrusión de las siguientes variables:

- (1) El tipo de iniciador.
- (2) El tipo de fibra de refuerzo.
- (3) El tipo de resina.
- (4) La velocidad de empuje y por lo tanto el tiempo de residencia.

La fiabilidad de las predicciones del modelo, entre otras cosas, en la exactitud de los parámetros cinéticos determinados por una expresión del tipo

de la que describe la reacción de curado. Se ha encontrado que el curado de una resina está grandemente influenciado por la presencia de fibras y el tipo de fibras empleadas, como se demuestra en la figura 3.41. Es por lo tanto absolutamente esencial obtener los parámetros cinéticos involucrados en la reacción de curado utilizando mezclas de fibra/resina en lugar de resina sola, si la expresión para el curado será significativa para la simulación del proceso de pultrusión. Se ha encontrado además que el uso de la mezcla de iniciadores de baja y alta energía es mucho más efectiva para llevar a cabo el curado completo de un sistema resina/fibra que el uso de iniciadores de alta temperatura solos, sin tener tampoco un aumento considerable de temperatura en el centro del dado.

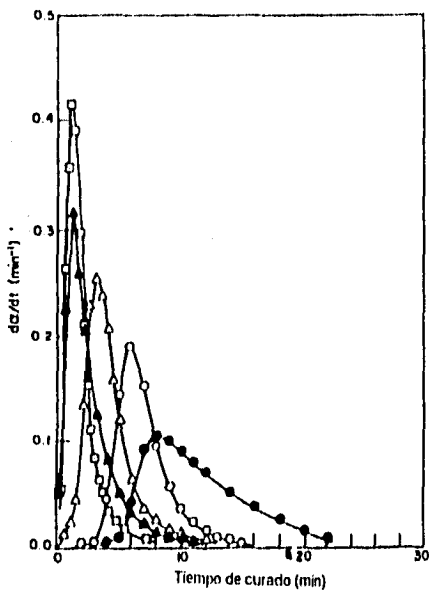


Figura 3.41



Podemos concluir de este estudio que, para obtener las características deseadas en el proceso de pultrusión, se requiere una elección sensata del tipo de iniciador, la razón de mezcla de los iniciadores, y el tipo de resina, cada uno de los cuales influencia la reacción de curado. El modelo matemático desarrollado permite incorporar los cambios en las variables de los materiales tan bien, como las variables del proceso ( velocidad de empuje, temperatura de campo, temperatura de la pared del dado ) dentro de las características deseadas para el proceso de pultrusión para resinas de poliéster no-saturadas y resinas epóxicas.

## **CAPITULO 4**

### **APLICACIONES**

#### **4.1 INTRODUCCION**

Cerca de 50 años han pasado desde que los plásticos reforzados con fibra de vidrio fueron los primeros en ser utilizados por su alta resistencia, bajo peso, bajo costo, y su alta resistencia a la corrosión. Estas características no sólo aseguran la diversidad de usos para estos materiales, sino que también funcionan como catalizadoras en los procesos de evaluación de estos materiales.

Como resultado del éxito que han tenido los materiales compuestos de matriz polimérica, la era de los materiales compuestos ha llegado, y hoy en día representa el más acelerado avance en tecnología de materiales. Los materiales compuestos avanzados encuentran sus principales aplicaciones en estructuras marinas, en la industria automotriz y equipo deportivo, campos en los cuales se requiere de alta resistencia específica y rigidez específica. Las aplicaciones han sido desarrolladas en un gran número de pruebas y experimentos que incluyen los reforzamientos de materiales para la construcción, y pruebas de reforzamiento de plásticos con fibras para equipos de audio y precisión.

El rango de aplicaciones para estos materiales compuestos es hasta este momento ilimitado ya que el hombre, por primera vez, tiene la oportunidad de

diseñar el material que satisfaga sus necesidades sin tener que limitarse a utilizar sólo los materiales disponibles. Las aplicaciones en el campo aeroespacial, de las fibras de carbón y las fibras aramid, han sido estudiadas por 20 años de exitosos diseños, desarrollos y servicios. Estos materiales compuestos avanzados han encontrado también aplicaciones ( que antes no eran posibles ), en el campo de la navegación y la marina en general. Lo mismo en el campo del deporte, los materiales compuestos han marcado un avance extraordinario en la fabricación de equipo y artículos deportivos. Después de muchos años de investigación, y comienzos inciertos, el mercado automotriz aparece listo para ser abordado por los materiales compuestos avanzados. El futuro para los compuestos avanzados pinta muy prometedor, y se prevé un incremento en aplicaciones para nuevos diseños.

## **4.2 APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA PROCESADOS POR ARROLLAMIENTO DE FILAMENTOS.**

### **4.2.1 APLICACIONES AEROESPACIALES Y DE DEFENSA.**

Las primeras aplicaciones aeroespaciales de los materiales compuestos de matriz polimérica obtenidos por arrollamiento de filamentos, fueron las cubiertas de los motores en las naves espaciales, las tuberías de propulsión, los recipientes a presión ( para las pruebas de presurización industrial ), y en los tanques de almacenamiento de combustible. Las cubiertas de motores fabricadas por arrollamiento de filamentos han sido utilizadas en los Estados Unidos, desde mediados de los 60's, se desarrollaron programas aeroespaciales de defensa en los cuales toda la estructura fue fabricada por arrollamiento de filamentos, utilizando fibra de vidrio S901. Siguiendo estos primeros éxitos, la cubierta de motor de los primeros misiles, se fabricó por arrollamiento de filamentos, utilizando también fibra de vidrio.

A principios de los 70's, la naval de los Estados Unidos continuó el estudio de estos compuestos fabricados por arrollamiento de filamentos, y desarrollaron ( por arrollamiento de filamentos ) las primeras cubiertas para motor de misil utilizados en un submarino. El material utilizado para estas cubiertas fue Kevlar 49. La cubierta más larga, se desarrolló entre 1975 y 1980. En la actualidad se le conoce a esta cubierta, como abrazadera de paso, se fabrica con Kevlar por arrollamiento de filamentos y tiene un diámetro de

2.4 m. En el campo de la artillería, todos los desarrollos hechos en la década de los 70's por la armada de los Estados Unidos, se realizaron con Kevlar 49 por medio del arrollamiento de filamentos.

La fibra de carbono, por otra parte, no tuvo una utilización en las cubiertas de motores sino hasta 1980. Posteriormente se fabricó un misil especial conocido como "sistema interceptor" desarrollado por la Armada de los Estados Unidos; en este sistema interceptor se utilizó un híbrido de Kevlar y fibra de carbono para la cubierta de alta resistencia del motor.

En 1982 el modelo más pequeño de misil interceptor se convirtió en el primero en utilizar una cubierta de motor fabricada por arrollamiento de filamentos, hecha en su totalidad de fibra de carbono. El cambio a fibra de carbono fue factible gracias al desarrollo de un módulo de fibra de carbono de alta resistencia al impacto, y alta elongación.

Los misiles de la Armada y Marina de los Estados Unidos, salvo muy contadas excepciones utilizan tuberías de propulsión de compuestos arrollados por filamentos. Los sistemas desarrollados a partir de 1975, utilizan tuberías de propulsión, las cuales fueron procesadas por arrollamiento de filamentos utilizando fibra de vidrio E. El misil "Stinger", fue desarrollado a finales de los 70's con Kevlar y se sigue produciendo actualmente.

A principios de los 80's se desarrolló la primer arma antitanque, la cual utilizó una cubierta de motor muy pequeña, arrollada por filamentos, para su sistema de propulsión. Tiene también una tubería de lanzamiento de dos piezas hecha con fibra de vidrio E. Este sistema se convirtió en la primer arma antitanque que se podía disparar desde el hombro, y se fabricó fácilmente en producción automatizada. Sin embargo, este programa fue

cancelado cuando la Armada de los Estados Unidos desarrolló el sistema antitanque metálico. La única porción de este antitanque, fabricada por arrollamiento de filamentos, es la tubería de propulsión, la cual tiene un diámetro de 203 cm.

El sistema de multipropulsión de cohetes ( MLRS ) es un sistema de misil de artillería de campo ( artillería terrestre ) que está en uso actualmente por la Armada de los Estados Unidos. La cubierta del motor de este misil es metálica, pero la tubería de propulsión es de fibra de vidrio-E fabricada por arrollamiento de filamentos, y tiene un diámetro de 279 mm. Después del desarrollo de un exitoso programa, se comenzó a producir este sistema en 1983.

La industria aeroespacial de recipientes a presión utiliza técnicas sofisticadas de arrollamiento de filamentos para producir un óptimo diseño, recipientes a presión de bajo peso que contienen gases a presiones de 21-42 MPa. Estos recipientes pueden ser tanto cilíndricos como esféricos y son utilizados en mecanismos de flotación, en mecanismos neumáticos para la liberación del asiento en un avión, y en sistemas experimentales para naves y vehículos espaciales. Todos estos recipientes a presión utilizan una delgada capa metálica en su interior que les sirve tanto de barrera de contención para los gases a alta presión, como de recubrimiento para el mandril en el proceso de arrollamiento de filamentos. El material utilizado comúnmente en estos recubrimientos metálicos es el aluminio, aunque también se puede utilizar el titanio. Los materiales que se utilizan en el recubrimiento externo, es decir, los materiales con que se fabrican los recipientes a presión, son

predominantemente la fibra de vidrio y el Kevlar, ya que tienen una alta resistencia y elongación, resistencia a la abrasión, y resistencia a la fatiga.

La aplicación más notable de estos recipientes a presión fabricados por arrollamiento de filamentos, es en los transbordadores espaciales. 17 recipientes a presión son utilizados en el medio ambiente espacial, actuando como sistemas neumáticos, y sistemas de presurización. Todos estos recipientes a presión son esféricos, y utilizan Kevlar como reforzamiento del material con el que se recubren los recipientes.

Los incendios ocurridos en las aeronaves más importantes de la Naval de los E.U.A. en 1968 y en 1974, enfatizaron los peligros de tener combustible almacenado en tanques no protegidos bajo condiciones de combate. Después de estos incidentes se solicitaron condiciones nuevas de seguridad para los tanques de almacenamiento de combustible, creándose las láminas de seguridad para recubrimiento de los tanques. Estas láminas consisten en una matriz polimérica con retardantes a la flama y reforzado con fibras de carbono, y una lámina de compuesto híbrido de fibra de vidrio y fibra de carbono, obtenida por arrollamiento de filamentos.

## 4.2.2 APLICACIONES INDUSTRIALES

Tanto el mercado industrial como el comercial para los productos fabricados por arrollamiento de filamentos, es muy variado. Algunas de las líneas de productos incluyen los recipientes a presión comerciales, las tuberías de alta presión utilizadas para los combustibles, y tanques de almacenamiento de petróleo.

La mayoría de los recipientes a presión comerciales caen dentro de una clasificación general conocida como aparatos de respiración, en donde se incluyen los recipientes que utilizan los bomberos para llevar sus herramientas durante un incendio, los recipientes médicos para almacenar oxígeno utilizados en los hospitales, y los tanques de oxígeno para buceo.

Los tanques de almacenamiento de fluido que se utilizan en pruebas subterráneas ( como en minas o pozos ) que se fabrican por arrollamiento de filamentos, se fabrican desde finales de los 70's. La mayor ventaja que tienen estos tanques sobre su contraparte metálicos, es que no se corroen y permiten que el líquido pueda gotear hacia el exterior del tanque. Inicialmente los tanques construidos para este mercado se construyeron de una pared de fibra de vidrio, construida por arrollamiento de filamentos. A principios de 1990 se comenzaron a construir tanques de doble pared.

Las tuberías de alta presión fabricadas por arrollamiento de filamentos, son utilizadas ampliamente en instalaciones petroleras, tanto en transporte superficial del petróleo como en inyección de petróleo en pozos profundos. Aunque muchas de las tuberías tienen un rango de presión entre 2.7 y 13.8



MPa., aunque en la actualidad existen algunos productos de alta presión fabricados por arrollamiento de filamentos, que soportan presiones de hasta 41 MPa. La mayoría de estas tuberías utilizan la fibra de vidrio-E como refuerzo debido, principalmente, a su bajo costo.

#### **4.2.3 APLICACIONES EN FLECHAS DE MOTORES**

A principios de los 80's, se desarrolló una flecha ( de una pieza ) de material compuesto de matriz polimérica, para sustituir a las flechas de acero ( de dos piezas ) utilizadas por los camiones de carga ligera. La composición del acero con las dos secciones ( dos piezas ), tenía una frecuencia de rotación o frecuencia rotacional, suficientemente alta como para detener las vibraciones de la transmisión. Los análisis realizados muestran que un material compuesto, lo suficientemente rígido y ligero, podría realizar la misma tarea con una sola pieza. El reto fue desarrollar una combinación de material y método de fabricación, que tuviera un bajo costo, para poder competir con el acero ensamblado. A finales de 1980's se produjo, por arrollamiento de filamentos, una flecha para camión de carga ligera ( o camioneta ) de material compuesto de matriz polimérica. Esta nueva flecha se utilizó en la "Ford Econoline" y en la camioneta "Astrostar" de la Ford.

Esta flecha lleva una horquilla colocada a una distancia de 1.9 m del centro de la flecha, y tiene un diámetro de 101 mm. Debe de soportar un torque máximo de 3400 Nm, y tiene una frecuencia natural de rotación máxima de 6500 rpm. La temperatura máxima de operación está entre 99 y 121 °C.

Se desarrollaron dos diferentes diseños de estas flechas. El primero, diseñado por "Hércules", está hecho con una combinación de fibra de carbono y fibra de vidrio, en una matriz de vinyl ester. El manguillo de acero se colocó a la flecha por medio de un adhesivo, y las horquillas fueron soldadas al manguillo. El segundo diseño, hecho por "Ciba-Geigy", es una combinación de dos fibras en una matriz de resina epóxica. En este diseño, el manguillo de acero se soldó inicialmente a las horquillas y posteriormente unidas a la flecha utilizando un anillo de compresión de acero. Ambos diseños se fabricaron por arrollamiento de filamentos y se muestran en la figura 4.1.

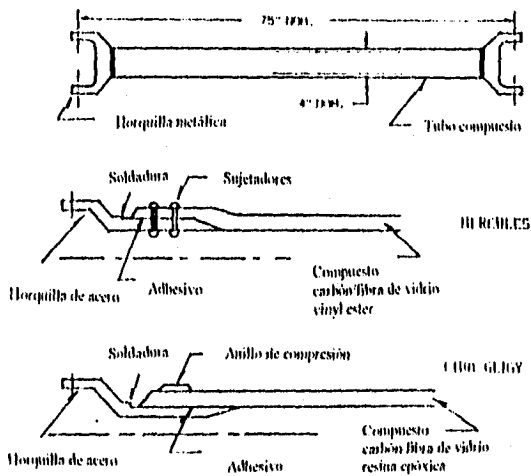


Figura 4.1 Flechas de materiales compuestos de matriz polimérica.

### **4.3 APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMERICA PROCESADOS POR PULTRUSION.**

Las estructuras mostradas en la figura 4.2 fueron fabricadas por pultrusión utilizando fibra de vidrio, y posteriormente colocadas en la parte superior de un rasca-cielos en Orlando Florida, U.S.A. con ayuda de un helicóptero.

Para la fabricación del bombardero mostrado en la figura 4.3, se utilizó una delgada capa de 279 mm de diámetro de fibra de vidrio procesada por pultrusión, que se colocó alrededor de los tubos mostrados en la figura 4.4, los cuales se utilizan para la carcasa del bombardero.

Este bombardero es utilizado por pilotos de guerra, en simulaciones militares de práctica. Esta nave se controla enviando señales de radio a un receptor que está dentro del bombardero; por lo tanto un requerimiento esencial es que la interferencia de radio sea muy baja. Ya que el bombardero es impulsado por una cámara de propulsión situada en la popa de la nave, los materiales en esa región deben de ser no-conductores térmicos y deben tener retardantes a la flama.

Un tragaluz de 12.2 m de largo hecho con fibra de vidrio por pultrusión, reemplaza a otro de acero en una planta química de Ciba-Geigy en Nueva York. El tragaluz, mostrado en la figura 4.5, fue fabricado con persianas y estructuras de fibra de vidrio y está expuesta a un ambiente químico altamente corrosivo.

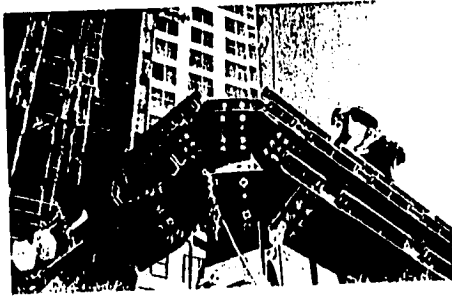
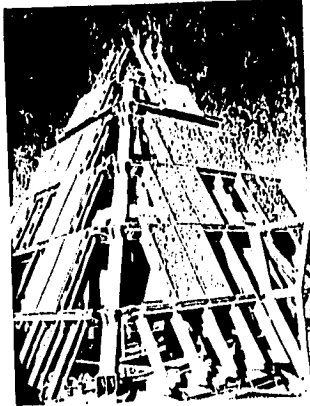
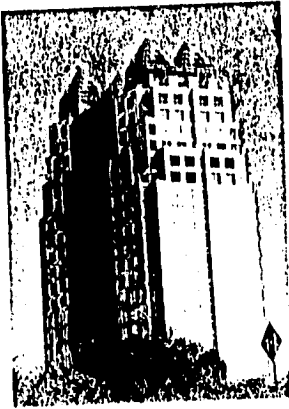


Figura 4.2

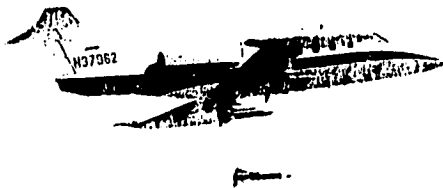


Figura 4.3



Figura 4.4

Una cubierta rectangular de 11.68 m de largo x 8.43 m de ancho x 1.52 m de alto fabricada para una estación de sulfuro , fue instalada en una refinería de la "Shell Oil" para contener los humos despedidos en los procesos de refinamiento y cumplir así con las regulaciones de medio ambiente. Esta cubierta se muestra en la figura 4.6 y se fabricó con estructuras de fibra de vidrio por pultrusion. El reto fue, diseñar y fabricar una cubierta de fibra de vidrio que pudiera sustituir a la cubierta de acero con la que se había estado trabajando, y que presentaba muchas desventajas.

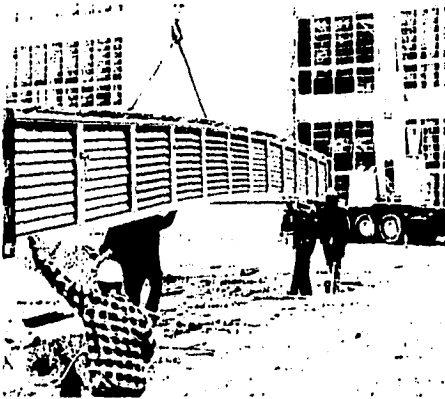


Figura 4.5



Figura 4.6

Otros ejemplos de la sustitución de estructuras metálicas por estructuras de compuestos pultruidos, se muestran en las figuras 4.7 y 4.8. La figura 4.7 es un larguero utilizado en una planta de papel la cual está expuesta a un medio ambiente corrosivo. Los barandales en la figura 4.8 están en una planta de tratamiento de agua residual. Estos barandales fueron hechos de fibra de vidrio por pultrusión, y se utilizaron aquí gracias a su alta resistencia a la corrosión y a sus requerimientos mínimos de mantenimiento.

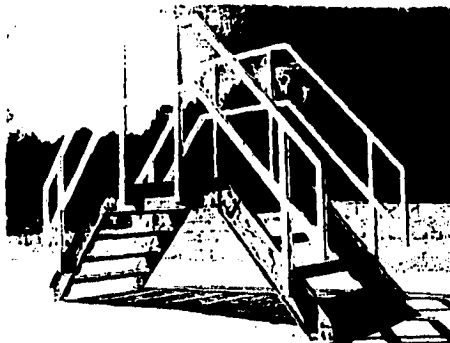


Figura 4.7

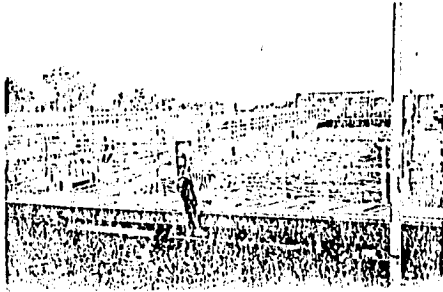


Figura 4.8

Los emparrillados pultruidos de fibra de vidrio se utilizan en una gran variedad de medios ambientes corrosivos, entre los cuales se encuentran las plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas de fabricación de papel, y operaciones de procesamiento de petróleo. La instalación de los emparrillados pultruidos que se muestra en la figura 4.9, tiene lugar en una plataforma de la compañía "Shell".

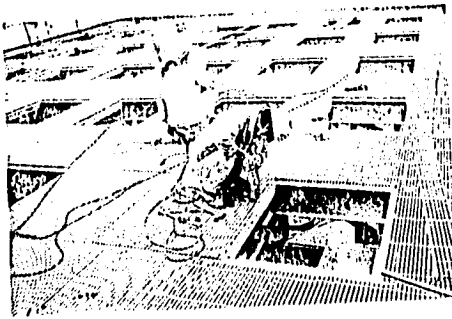


Figura 4.9

Algunas de las 18 diferentes estructuras, hechas de fibra de vidrio por pultrusión, utilizadas como uniones de paneles y marcos de puertas para los gabinetes de los baños, se muestran en la figura 4.10. Estas estructuras están dentro de las primeras estructuras pultruidas de fibra de vidrio utilizadas en la industria de la aviación para reemplazar las estructuras de aluminio.

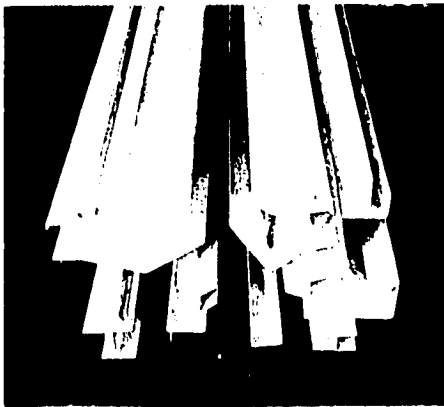


Figura 4.10



## CONCLUSIONES

El motivo principal que condujo a la utilización de los materiales compuestos de matriz polimérica, fue el ahorro en peso, así como la libertad de diseño y las rutas de elaboración posibles de estos materiales, que por otra parte, también conducen a la reducción significativa de los costos. Este ahorro surgió principalmente a través de la elaboración de mejores artículos estructurales conteniendo menos partes, reduciendo con esto los altos costos de mano de obra requerida en el maquinado y ensamble de estructuras complejas.

Desde el punto de vista tecnológico los materiales compuestos de matriz polimérica ofrecen ventajas competitivas en muchos productos, incluyendo aeronaves, automóviles, maquinaria industrial y artículos deportivos, debido a que los costos totales de producción pueden ser reducidos y a que mejoran su funcionalidad.

Los materiales compuestos pueden ser tan resistentes como el acero, ligeros como el aluminio y rígidos como el titanio, estas ventajas son posibles mediante una adecuada selección de fibras de alta resistencia tales como carbón, grafito, aramid, boro o vidrio unidas en una matriz. Por ejemplo en la fabricación de estructuras aeroespaciales, un compuesto epoxi - grafito ofrece aproximadamente la misma rigidez que el aluminio; la ventaja es que la estructura compuesta es 45% más ligera, exhibe una baja conductividad térmica, buena resistencia al calor y mejora la resistencia a la fatiga comparándolos con los metales. También son anticorrosivos y tienen alta resistencia al desgaste.

El estudio de los materiales compuestos de matriz polimérica, es una actividad que ha venido creciendo en los últimos años, debido a los alcances que tienen estos materiales. Sin embargo, aún falta mucho por conocer con respecto a estos “nuevos materiales” y sus técnicas de procesamiento.

En este trabajo se ha hecho énfasis en la importancia que tienen los materiales compuestos, tanto para la ciencia e ingeniería de materiales ( siendo la cuarta familia de materiales de ingeniería ), como para la sociedad en general. La importancia principal que tienen los materiales compuestos es que nos permiten diseñar el material que nosotros necesitamos, sin tener que poner nuestras necesidades en función de los materiales existentes. Esto nos da la oportunidad de diseñar un material con las propiedades mecánicas que nosotros deseamos; las propiedades mecánicas logradas por un sistema compuesto son el resultado de la selección del proceso de los materiales y el proceso de manufactura a utilizar.

Es por eso que se necesita tener un control riguroso del proceso de manufactura que se utiliza, y para esto es necesario conocer las variables de las cuales dependen los fenómenos que tienen lugar durante dicho proceso. A esto nos ayuda el establecer relaciones matemáticas en las cuales nos podemos apoyar para controlar los procesos.

En este trabajo se analizaron los procesos de manufactura para materiales compuestos de matriz polimérica, conocidos como:

- 1) Arrollamiento de filamentos.
- 2) Pultrusión.

En los cuales se definieron las variables de las que depende cada uno. Es importante resaltar que en el caso del arrollamiento de filamentos, el proceso

depende en mayor medida del ángulo de enrollamiento de las fibras, que de las condiciones físico - químicas del proceso; no así en el proceso de pultrusión el cual depende casi en su totalidad del proceso físico - químico que se realiza sobre la fibra.

El desarrollo de modelos matemáticos para estos dos procesos, aparte de describirnos el proceso, nos muestran las variables de las cuales depende el proceso, y por lo tanto las propiedades físicas de las estructuras fabricadas con materiales compuestos de matriz polimérica. El control de estas variables durante el proceso de manufactura es la clave para efficientar el proceso y por lo tanto, aumentar la calidad de los productos terminados de materiales compuestos de matriz polimérica.

## **BIBLIOGRAFIA**

### **1) LIBROS.**

Van Vlack

Materiales para Ingeniería

C.E.C.S.A.

6ta. Edición , E.U.A. 1975

Donald R. Askeland

La Ciencia e Ingeniería de los materiales

Grupo Iberoamérica.

E.U.A. 1985

Bryan Harris.

Engineering Composite Materials

Institute of Metals England.

2da. Edición, Londres Inglaterra 1986

American Society for Testing and Materials.

Composite Materials: Testing and Design

ASTM

E.U.A. 1977

George Lubin.  
Handbook of Composites  
Van Nostrand Reinhold Company  
E.U.A. 1982

G.B. Chapman, H.S. Kliser.  
Composite Materials Technology  
Hanser Publishers  
4ta. Edición, E.U.A. 1990

K.H.G. Ashbee.  
Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites  
Technomic Publishing Company Inc.  
2da. Edición, E.U.A. 1989

S.A. Paipetis.  
Engineering Applications of New Composites  
Omega Scientific  
E.U.A. 1988

Stuart M. Lee.  
International Encyclopedia of Composites  
V.C.H.  
E.U.A. 1991

J.C. Anderson, K.D. Leaver, J.M. Alexander, R.D. Rawlings.

Materials Science

Thomas Nelson & Sons

2da. Edición, E.U.A. 1974

S. Oleesky and G. Mohr.

Handbook of Reinforced Plastics of the SPI

Reinhold Publishing

E.U.A. 1974

F.W. Billmeyer.

Textbook of Polymer Science

Wiley Interscience

E.U.A. 1971

## **2) ARTICULOS**

**“ Filament Winding Process Models ”**

Susan C. Mantell, George S. Springer

Composite Structures. Vol. 27 No. 1 1994 pags. 141-147

**“ Resin Flow, Cure and Heat Transfer Analysis for Pultrusion Process ”**

R. Gorthala, J.A. Roux

Journal of Composite Materials. Vol. 28 No. 6 1994 pags. 486-498

**“ Evaluating Catalysts for Polyester Molding Compounds ”**

**J. Simmonds and L. Roskott**

**Modern Plastics. Oct. 1973 pags. 168-178**

**“ Pultruding Filamentary Composites - An Experimental Determination of  
Process Parameters ”**

**Dr. Brian H. Jones**

**29th Annual Technical Conference, 1974**

**Reinforced Plastics/Composites Institute**

**The Society Of the Plastics Industry, Inc.**

**“ Natural Fibers for Plastic Reinforcement ”**

**A.J. Bolton**

**Materials Technology. Vol.9 No. 1 1994**