

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 EXTRUSORA.

2.1.1 DEFINICIÓN.

Es la máquina encargada de la extrusión, que es un proceso por compresión en el cual se obliga al material a fluir a través del orificio de un dado para generar un producto largo y continuo cuya sección transversal queda determinada por la forma de la boquilla.

2.1.2 PROCESOS DE EXTRUSIÓN.

Éste es un proceso de conformación de polímeros que se usa ampliamente con termoplásticos y elastómeros, pero rara vez con termofijos, para producir masivamente artículos como tubos, ductos, láminas, películas, recubrimientos de alambres y cables eléctricos, perfiles estructurales como molduras de ventanas y puertas. Para éste tipo de productos, la extrusión se lleva a cabo con un proceso continuo; el producto que se extruye se corta inmediatamente en las longitudes deseadas.

Con la extrusión se realiza el mayor volumen de producción de polímeros, ya que no se usa solamente para la producción de barras, tubos, láminas y películas en materiales termoplásticos, sino también para el mezclado minucioso de todas las clases de plásticos y para la producción de gránulos.

Dos son los métodos de extrusión utilizados industrialmente:

- Extrusión en húmedo
- Extrusión en seco , continuo o caliente

2.1.2.1 Moldeo por extrusión en húmedo.

La extrusión en húmedo la practican solamente un número reducido de firmas, limitado a los compuestos de nitrocelulosa. La nitrocelulosa humedecida con alcohol se coloca en una mezcladora de acero junto con el disolvente y un plastificante; se pueden añadir color y pigmento, mezclando el conjunto hasta obtener una masa homogénea. El material se cuele, se seca al vacío para recuperar una parte del disolvente y, finalmente se amasa en cilindros diferenciales. El material plástico se muele hasta que adquiera una consistencia semejante a la de jalea para ser moldeado por extrusión hidráulicamente, formando varillas y tubos, o también en una forma más dura que se pueda cortar en tiras para la máquina de extrusión del tipo de tornillo.

2.1.2.2 Moldeo por extrusión en seco, continuo o caliente.

Este método utiliza polvos de moldeo termoplástico y máquinas de extrusión relativamente pequeñas, de un modelo usado antes para otros materiales, principalmente el caucho. Muchas de las distintas etapas de éste procedimiento están sujetas a regulación, ésta forma de extrusión no está normalizada.

2.1.2.3 Defectos generados en el proceso de extrusión.

Los productos de extrusión pueden sufrir numerosos defectos. Uno de los peores es la fractura de fusión, en la cual los esfuerzos que actúan sobre la fusión inmediatamente antes y durante el flujo, a través del dado, son tan altos que causan rupturas que originan una superficie altamente irregular.

Como en la figura 2.1, la fractura de fusión puede ser causada por una aguda reducción en la entrada del dado que causan un flujo turbulento y rompe la fusión. Esto contrasta con el flujo laminar uniforme en el dado gradualmente convergente.

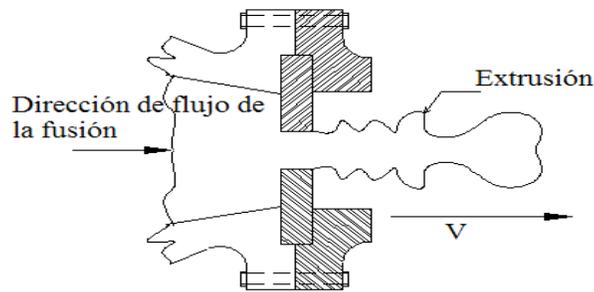


Figura 2.1.- Fractura de la fusión, causada por flujo turbulento en la fusión a través de una aguda reducción a la entrada del dado.

Un defecto muy común en extrusión es la piel de tiburón, en la cual la superficie del producto se arruga al salir del dado. Conforme la fusión atraviesa la abertura del dado, la fricción con la pared produce un perfil diferencial de velocidades a través de la sección transversal, lo que se puede observar en la *figura 2.2*. Esto ocasiona esfuerzos tensiles en la superficie del material que se estira para igualar el movimiento más rápido del núcleo central. Estos esfuerzos causan rupturas menores que arrugan la superficie.

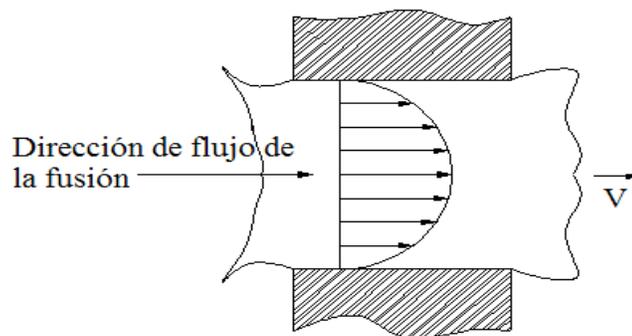


Figura 2.2.- Perfil de velocidades de la fusión al fluir a través de la abertura del dado, el cual puede conducir el defecto llamado piel de tiburón.

Si el gradiente de velocidad se vuelve más grande, se forman marcas prominentes en la superficie que dan la apariencia de un tallo de bambú, que es el nombre como se conoce a este defecto más severo.

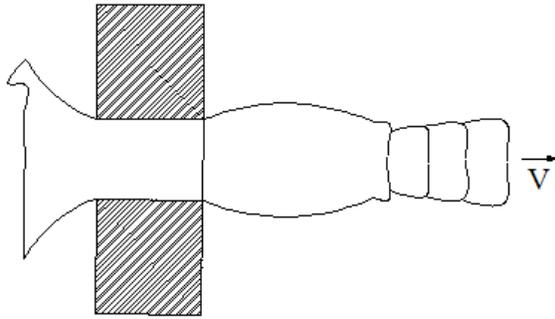


Figura 2.3.- Formación del tallo de bambú.

2.1.3 TIPOS DE EXTRUSORAS.

Las extrusoras más utilizadas, según la presión necesaria para hacer pasar el plástico fundido a través de la boquilla son:

- a) Extrusoras de desplazamiento positivo:
 - Extrusoras de pistón
 - Bombas de extrusión (bombas de engranaje)
 - Extrusora de tambor rotatorio

- b) Extrusoras de fricción viscosa:
 - Extrusora de rodillos
 - Extrusora de tornillo

2.1.3.1 Extrusoras de desplazamiento positivo.

Son aquellas utilizadas para una extrusión directa o en avance, el material se coloca en una cámara y es impulsado a través de la abertura de una matriz mediante un pistón mecánico o ariete de prensa.

2.1.3.1.1 Extrusoras de pistón.

Estas máquinas constan de un cilindro que posee elementos de calefacción, la materia prima desciende desde una tolva al interior del cilindro donde el material es plastificado. Éste es obligado a pasar a través de una boquilla, empujándolo con un pistón el cual es accionado por presión hidráulica o mecánica.

Las máquinas de un pistón producen piezas de longitud limitada, debido a la discontinuidad del proceso. Para fabricar perfiles continuos se utilizan las extrusoras de varios pistones

2.1.3.1.2 Bombas de extrusión.

Son bombas con algunos pares de engranajes que están acoplados y alojados en una carcasa cuando se impulsa un engrane éste mueve el correlativo. El transporte del plástico se debe solo al empuje de los dientes sobre el material por el lado de la carcasa. El acoplamiento entre dientes aísla el lado de descarga a presión, del lado de succión. El flujo de material es proporcional a la frecuencia de rotación de los discos dentados obteniéndose así un flujo de material esencialmente constante.

2.1.3.1.3 Extrusoras de tambor rotatorio.

En ésta máquina el material desciende por gravedad e ingresa por el émbolo hasta la cámara, la cual está formada por el tambor rotatorio y por el bastidor fijo o cuerpo estático

El bastidor puede calentarse o enfriarse para controlar la temperatura. En la cámara el polímero es arrastrado por el cilindro rotor que lo pone en contacto con las paredes calientes del bastidor y con el material previamente fundido, con lo que se efectúa la plastificación.

La homogenización tiene lugar en la pequeña holgura radial entre el marco fijo y el cilindro que gira.

El plástico así fundido es separado del cilindro rotatorio mediante una pieza en forma de cuchilla; la fundición, bajo acción de las fuerzas tangenciales se mueve hacia la boquilla y la cruza.

2.1.3.2 Extrusoras de fricción viscosa.

En este tipo de extrusoras la fricción calienta al material convirtiéndolo en un fluido viscoso.

2.1.3.2.1 Extrusora de rodillos.

Es la utilizada para la denominada “extrusión plana” empleada en la fabricación de láminas y películas, su funcionamiento está basado en la utilización de rodillos.

2.1.3.2.2 Extrusora de tornillo.

El polímero se alimenta a través de una tolva, hasta un cañón, en el cual un tornillo helicoidal transporta el polímero hacia el extremo con matriz.

2.2 POLIETILENTEREFTALATO (PET).

2.2.1 DEFINICIÓN.

El Polietilentereftalato, comúnmente llamado PET, es un polímero termoplástico lineal, con un alto grado de cristalinidad; como todos los termoplásticos puede ser moldeado cuando se calienta, pudiendo repetir este ciclo infinitas veces.

En términos generales podemos aseverar que el PET es un tipo de plástico con características y propiedades específicas.

2.2.1.1 Plásticos.

Los plásticos proceden de recursos naturales como el petróleo, gas natural, carbón y sal común.

A pesar de la gran industria que se ha desarrollado alrededor de ellos, sólo el 4 por ciento del petróleo producido comercialmente es usado para producir plásticos.

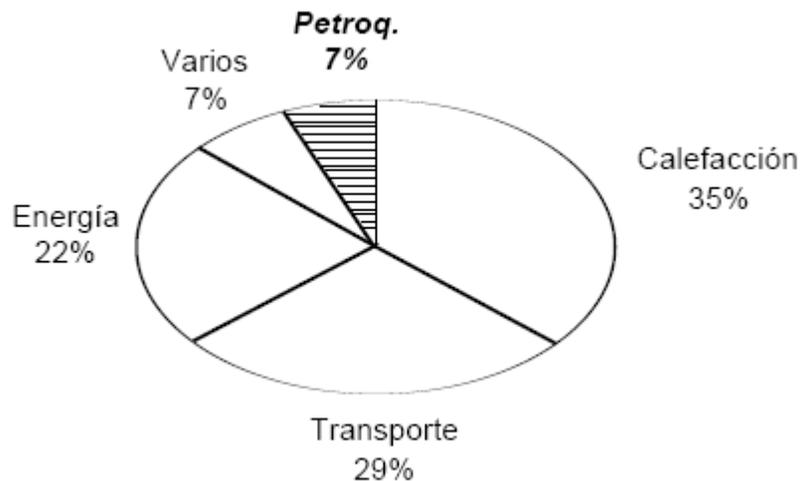


Figura 2.4.- Aplicaciones derivadas del petróleo.

El porcentaje utilizado por las petroquímicas se distribuye en un 4% para fabricación de plásticos y un 3% para las restantes industrias que utilizan derivados de la petroquímica.

Los plásticos se producen a través de un proceso llamado polimerización: unión química de monómeros para formar polímeros. El tipo, tamaño y la estructura (lineal / ramificada) de cada molécula de polímero determinan las propiedades del material plástico.

Los plásticos, al igual que el vidrio, son materiales no biodegradables, lo cual les permite preservar alimentos, medicinas y sustancias orgánicas en general, manteniéndose completamente inertes frente a su contenido, y frente al medio ambiente.

Como consumidores, la mayoría de nosotros no advertimos que hay variedades de plásticos tan diferentes unos de otros como lo son el cobre y el aluminio entre los metales.

2.2.1.2 Clasificación de los Plásticos.

Dentro de la gran familia de los plásticos podemos distinguir dos categorías principales, con características constitutivas y de reciclabilidad específicas:

Termoplásticos: Son, por definición, aquellos que funden al ser sometidos a presión y temperatura adecuadas. La mayoría de los materiales para envasado caen dentro de esta categoría, cuya estructura permite una relativamente fácil capacidad de ser reciclados. Los integrantes más comunes de esta subfamilia son: Polietilentereftalato (PET), Polietileno de Alta Densidad (PEAD), Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de Baja Densidad (PEBD), Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS).

Termoestables: Son aquellos que sufren un cambio químico permanente al ser calentados. Se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones técnicas, como pueden ser piezas electrónicas o de automóvil. Por el hecho de no responder bien a los métodos de procesamiento por calor utilizados al reciclar termoplásticos, la mayor parte del reciclado de termoestables se realiza por métodos alternativos (p. ej. químicos). Integran esta subfamilia, entre otros: Epoxi, Fenólicos, Poliuretanos.

Una tercera categoría la integrarían los llamados genéricamente:

Plásticos de Ingeniería: utilizados con distintos fines específicos en la industria. Entre otros podemos mencionar a las Poliamidas (PA: usadas como films protectores para alimentos), Polimetacrilato de Metilo (PMMA: aislantes transparentes), Policarbonatos (PC: pantallas protectoras transparentes y duras), Policloruro de Vinilideno (PVDC: capas delgadas impermeables a la humedad,

oxígeno y aromas) y copolímeros de Estireno (p. ej. ABS: moldeo y aplicaciones generales).

Hoy en día se encuentra en desarrollo lo que podríamos considerar como una cuarta categoría dentro de los plásticos:

Los "**biodegradables**": Éstos contienen en su estructura fibras biodegradables, como por ejemplo almidón, que confieren al producto la capacidad de ser literalmente deshecho por acción del medio ambiente. Pero no debemos engañarnos, las cadenas biodegradables pueden cortarse biológicamente, pero el soporte plástico no, quedando entonces un polvillo plástico de difícil manipulación. Como puede verse, esta nueva rama entre los plásticos no ofrece una real solución al problema integral de los residuos sólidos, teniendo sin embargo un importante desarrollo en aplicaciones muy específicas, como por ejemplo suturas para cirugía y cápsulas autodegradantes para medicamentos.

2.2.1.3 Procesos de fabricación de los Plásticos.

Las vías posibles de polimerización son dos:

Adición: Se forman por una combinación de moléculas iguales, lográndose una cadena, generalmente con la ayuda de un catalizador.

Ejemplo de esto son: Polietileno, Polipropileno, Cloruro de Polivinilo.

Condensación: La reacción de dos moléculas diferentes da por resultado una tercera, que se polimeriza. Ejemplo de esto son: Polietilentereftalato y Nylon.

Se pueden producir distintos grados y variantes de los materiales manejando las condiciones bajo las cuales los polímeros son fabricados y procesados e incluyendo distintos aditivos, como pigmentos, lubricantes y estabilizadores.

Los dos tipos fundamentales de proceso a los cuales se los somete para obtener los diferentes productos finales son:

Moldeo: El plástico fundido es forzado, mediante calor y presión, a tomar la forma del molde deseado. Dentro de esta categoría se encuentran:

- Moldeo por inyección
- Moldeo por compresión
- Moldeo por soplado
- Moldeo por rotación

Extrusión: El plástico fundido es forzado a pasar a través de un orificio con la forma deseada o bien entre dos rodillos. Así se obtienen los perfiles requeridos.

2.2.1.4 Plásticos más comunes y sus propiedades.

La tabla siguiente muestra los nombres, códigos internacionales de identificación, aplicaciones típicas primarias y postreciclado de los plásticos más usados.

Tabla 2.1.- Propiedades de los plásticos más comunes.

Código de reciclado	Tipo de plástico	Características	Densidad (g/cm ³)	Aplicación
	PET (polietilentereftalato)	Transparente, flexible pero se cuartea, rígido, no se rompe frente al impacto, habitualmente brillante	1.38 – 1.39	Botellas transparentes de bebidas
	PEAD (Polietileno de alta densidad)	Rígido pero se dobla, opaco, superficie áspera, insoluble en acetonas.	0.95 – 0.97	Jarras de leche, botellas de agua
	PVC (Policloruro de vinilo)	Rígido o flexible si se agrega plastificantes, muy brillante, difícil de encender y se apaga cuando se lo aleja de la llama, soluble en tuleno y no en acetonas.	1.30 – 1.34	Tubería de desagüe, cortinas de baño, algunas botellas de agua, techos vinílicos de algunos autos.
	PEBD (Polietileno de baja densidad)	Opaco, muy flexible, insoluble en acetonas	0.92 – 0.94	Bolsas de plástico, bolsas para la ropa, tapas de envases de vidrio.
	PP (Polipropileno)	Translucido a opaco, superficie suave, tiene lustre pero usualmente bajo brillo, insoluble en acetona.	0.90 – 0.91	Tapas de latas de aerosol, tapas rígidas de botellas, envolturas de caramelo, sustituto del papel celofán.
	PS (Poliestireno)	Transparente u opaco, brillante, frágil a semirrígido, muy soluble en acetona.	1.04 – 1.07	Tazas y utensilios de comida descartables, recipientes de yogurt recipientes aislantes.

Fuente: (http://www.quiminet.com.mx/ar4/ar_4%251D%25A2y%251FN%2529%2527.htm)

2.2.2 Obtención.

Como ya se pudo advertir dentro del estudio de los plásticos, el PET se hace a partir del petróleo crudo donde los materiales base refinados sufren una reacción química llamada “policondensación”, es decir, la obtención de un polímero por medio de condensación. Esta reacción, en la cual el etilenglicol se une ya sea a ácido tereftálico o a dimetil tereftalato, tiene como resultado el PET cristalino que se usa en aplicaciones de envases fundamentalmente.

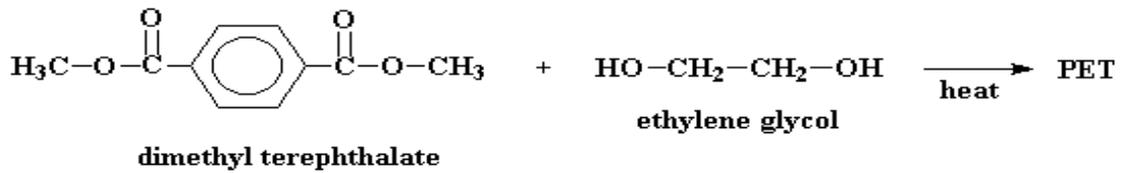


Figura 2.5.- Obtención de PET a partir de dimetil tereftalato.

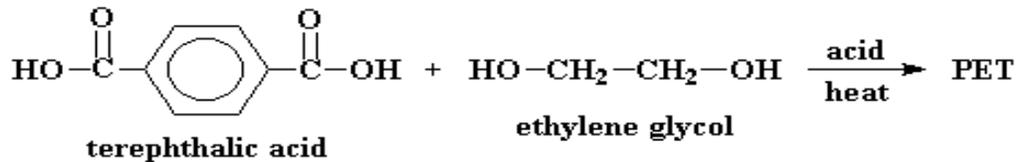


Figura 2.6.- Obtención del PET a partir de ácido tereftálico.

Una vez obtenido el PET, es procesado mediante extrusión, inyección, soplado y termoconformado. Para evitar el crecimiento excesivo de las esferulitas y lámelas de cristales, este material debe ser rápidamente enfriado, con esto se logra una mayor transparencia, la razón de su transparencia al enfriarse rápido consiste en que los cristales no alcanzan a desarrollarse completamente y su tamaño no interfiere con la trayectoria de la longitud de onda de la luz visible.

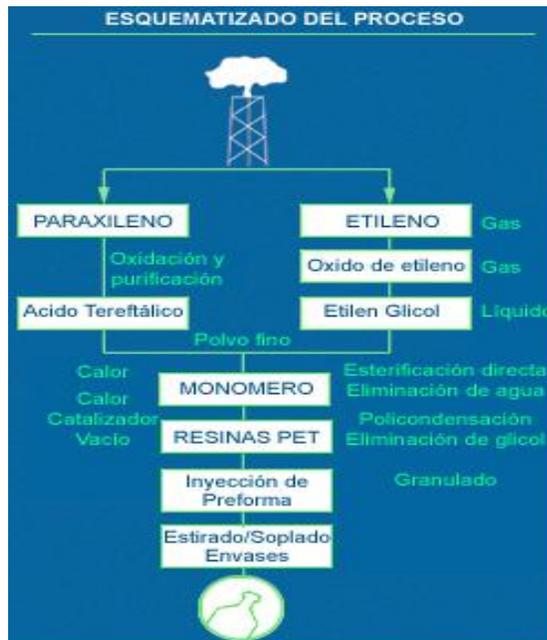


Figura 2.7.- Proceso de obtención de PET esquematizado.

2.2.3 PROPIEDADES.

El PET goza de un sin número de propiedades que lo hacen muy versátil, eficiente y con un gran horizonte de aplicaciones. La tabla a continuación muestra algunas de sus propiedades fundamentales y datos técnicos:

Tabla 2.2.- Propiedades técnicas del PET

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1,34 – 1,39
Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0.01 – 0.04
Dureza	--	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10 ⁻⁴ / °C	15.2 – 24
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Velocidad de combustión	mm/min	Consumo lento
Efecto luz solar	--	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	--	Excelente
Calidad óptica	--	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244 – 254

Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>

2.2.3.1 Ventajas.

Todas estas propiedades arriba enumeradas le otorgan al PET grandes ventajas en sus aplicaciones respecto a materiales sustitutos. Entre las principales ventajas podemos mencionar:

- Procesable por soplado, inyección y extrusión.
- Transparencia y brillo con efecto lupa.

- Liviano.
- No tóxico.
- No extrae ni transfiere sabores a la bebida envasada.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Alta resistencia al desgaste.
- Admite pigmentos para poder colorarlo.
- Aprobado para el uso en productos alimentarios y farmacéuticos.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Compatible con otros.
- Cristalizable.
- Esterilizable por rayos gamma y óxido de etileno.
- Buena relación costo / beneficio.
- Ubicado como No.1 en cuanto a facilidad de reciclado.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.

La producción, uso y disposición de los envases de PET implica menos energía, menos emisiones aéreas y menos residuos líquidos, comparado con otros materiales de embalaje.

Nombre	Unidad monomérica	Siglas	Símbolo de reciclado	Usos
Poliéterterftalato	Etilen glicol (C ₂ H ₆ O ₂) Ácido tereftálico (C ₆ H ₆)(COOH) ₂	PET (PETE)		Es transparente, muy resistente, no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos. Su principal uso es en la fabricación de botellas plásticas transparentes como las utilizadas para agua mineral, refrescos, biberones, etc.

Figura 2.8.- Información general del PET.

2.2.3.2 Desventajas.

Posee otras propiedades que lejos de conferir una ventaja, dificultan determinados procesos. El PET posee una velocidad de cristalización baja, lo que le confiere cierta tendencia a fragilizarse, característica que ha mantenido alejada a esta resina del proceso de inyección, presenta una alta sensibilidad a la humedad y baja temperatura de transición vítrea (temperatura a la cual un polímero amorfo se ablanda). Esto supone que los productos fabricados con dicho material no puedan calentarse por encima de dicha temperatura, razón por la cual (por ejemplo, las botellas fabricadas con PET no pueden calentarse para su esterilización y posterior reutilización).

2.2.4 APLICACIONES.

Si bien en un principio se empleaba únicamente para la fabricación de fibras textiles, las propiedades mecánicas y químicas de este polímero le abrieron nuevas y prometedoras aplicaciones en el campo del envasado de alimentos y bebidas.

Sus excelentes características de brillo, transparencia, elevada resistencia al impacto, baja permeabilidad a los gases y estabilidad dimensional, garantizan los requisitos exigidos a los envases destinados a la conservación y transporte de

productos de uso alimentario. En estos últimos años el campo de aplicación del PET se ha extendido al ámbito farmacéutico, cosmética, productos de limpieza y al sector de los laminados y films.

Dentro de sus diversas aplicaciones podemos resaltar como las importantes las siguientes:

Envases: Fabricados por inyección o soplado con biorientación, por extrusión o soplado; para aplicaciones como: gaseosas, dentífricos, lociones, polvos y talcos, aguas y jugos, champúes, vinos, aceites comestibles y medicinales, productos capilares, fármacos, industria de la alimentación y laboratorios de cosmética y farmacéuticos.

Láminas y películas: Fabricadas por extrusión plana o coextrusión por burbuja. Películas bio - orientadas. Sus aplicaciones más comunes son: cajas, blisters, pouches para envasado de alimentos, medicamentos, cosméticos.

Otros: Piezas de inyección, fabricación de plásticos de ingeniería usados para casos de alta exigencia térmica, mecánica.

2.2.5 RECICLAJE.

El reciclado es el reproceso aplicado a los materiales, para acondicionarlos con el propósito de integrarlos nuevamente a un ciclo productivo como materia prima.

Hay tres maneras de aprovechar los envases de PET una vez que terminó su vida útil:

- Reciclado mecánico
- Reciclado químico
- Reciclado energético

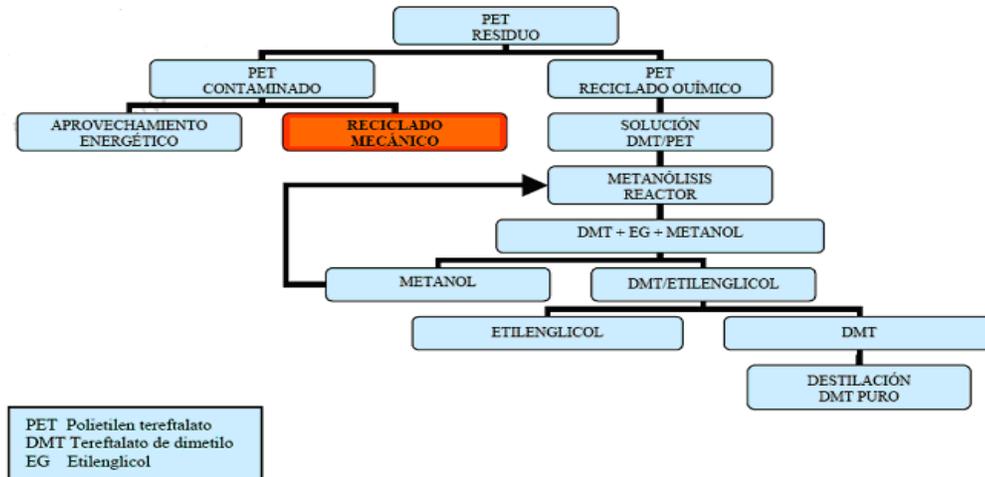


Figura 2.9.- Procesos de reciclaje del PET

2.2.5.1 Reciclado mecánico.

Una vez seleccionados y recolectados, los envases de PET van a las estaciones de reciclado donde son molidos en forma de escamas (hojuelas). Las escamas son separadas y limpiadas de acuerdo con las especificaciones del mercado. El PET recuperado luego es vendido a los fabricantes quienes lo convierten en productos útiles.

Alrededor de un 75% del PET recuperado se usa para hacer fibras de alfombras, ropa y membranas geotextiles. La mayor parte del 25% remanente se aplica en envases para productos no alimenticios, o compuesto para aplicaciones de moldeo.

El PET reciclado mecánicamente no es empleado en envases para alimentos debido a que las temperaturas alcanzadas durante el proceso no son lo suficientemente altas para esterilizarlo.

2.2.5.1.1 Etapas del reciclado mecánico.

El proceso de reciclaje mecánico es, en esencia, el mismo para los distintos plásticos. Consiste en la separación y/o selección, limpieza y en algunos casos

todavía el peletizado, aunque el moldeado por inyección, por compresión o termoformación puede realizarse con el material limpio picado.

Acopio de material: El acopio es simplemente la recolección del material ya sea en puntos fijos o en recorridos, es importante además puntualizar que un buen sistema de acopio garantizará un buen suministro de materia prima para el resto de los procesos, no debiendo existir cortes de materia prima.

Pacado: Es común que en las grandes empresas de reciclado el material se compacte para reducir su volumen y así facilitar su transporte y almacenamiento. No obstante, el PET debido a su elevada recuperación elástico-plástica, es difícil de prensar.

Cuando se realiza este proceso, las “pacas” deben ser posteriormente abiertas y picadas tal como llegan a la planta, es decir con tapas y etiquetas, que es una alternativa en el proceso. Sin embargo, cuando a la planta llegan botellas sueltas, si bien el volumen ocupado es mucho mayor, la posibilidad de realizar el desetiquetado y destapado permiten obtener un producto más fácil de tratar constituyéndose en la segunda alternativa del proceso.



Figura 2.10.- Pacado de PET para reciclaje.

Reducción de tamaño: La reducción de tamaño no es otra cosa que el picado (molido) del material recolectado, cuyo principal objetivo es facilitar la siguiente operación dentro el proceso de reciclado, el cual puede ser la separación de los diferentes tipos de polímeros del material (si es que éste ha sido compactado) y la limpieza del material picado.

Para la reducción de tamaño existen diversos tipos de tecnologías según el tamaño al cual se quiera llegar, para el PET puede llegarse a obtener hojuelas de media, un cuarto de pulgada o finalmente polvo, según el diseño y el tipo de molino del que se disponga.



Figura 2.11.- Máquina moledora de PET

Separación: La separación tiene por finalidad liberar al plástico de interés (en nuestro caso PET) de diferentes tipos de materiales especialmente de los otros tipos de polímeros que lo estén acompañando y también de metales, algunas veces vidrio o papel.

La importancia de la separación radica en que si existiesen otros materiales presentes, éstos podrían perjudicar el proceso de reciclaje o directamente empeorar la calidad del producto final.

Existen métodos de separación automatizada basados en las diferencias de gravedad específica, difracción de rayos x y disolución en solventes.



Figura 2.12.- Proceso de separación de PET para reciclaje.

Limpieza: Las hojuelas (flakes) de PET están generalmente contaminados con comida, papel, piedras, polvo, aceite, solventes y en algunos casos pegamento. De ahí que tienen que ser primero limpiados en un baño que garantice la eliminación de contaminantes.

El uso de hidrociclones cuando el desecho plástico está muy contaminado es una alternativa, el plástico contaminado es removido ya que al ser ligero flota en la superficie donde es expulsado. Los contaminantes caen al fondo y se descargan. Después del proceso de limpieza, los plásticos se llaman hojuelas limpias o granulado limpio.

El uso de detergentes está limitado por la cuestión ambiental debido a que los efluentes del proceso o procesos de lavado deben ser tratados para que puedan ser reutilizados nuevamente en el ciclo de lavado. En segundo lugar, es necesario encontrar un adecuado sistema de purificación de las aguas residuales para no contaminar ni dañar el entorno en el cual se desarrolla el proceso de reciclado.

Secado: Posterior al ciclo de lavado sigue un proceso de secado el cual debe eliminar el remanente de humedad del material, para que pueda ser comercializado y posteriormente procesado. Pueden usarse secadores centrifugados, es decir tambores especialmente diseñados para extraer la humedad por las paredes externas del equipo o también pueden utilizarse secadores de aire, ya sea caliente o frío, que circulando por entre el material picado, eliminen la humedad hasta límites permisibles.

Varios otros sistemas se han desarrollado para este proceso, dentro los cuales también están los de procesos simultáneos, los cuales combinan directamente los dos anteriormente mencionados. Es decir, sistemas que pueden al mismo tiempo operar como centrifugas con aire en contracorriente.

Procesos que combinan el molido y el lavado o el lavado y el secado, también son posibles y constituyen alternativas del proceso.



Figura 2.13.- Proceso de secado del PET reciclado.

En los casos que se requiera extrema sequedad pueden usarse secaderos térmicos de doble lecho fluido con aire atemperado a 120 hasta 180 °C, durante periodos de entre 2, 4 a 6 horas dependiendo de la capacidad y diseño de los equipos.

2.2.5.2 Reciclado químico.

El PET también puede ser depolimerizado a través de metanólisis o glicólisis. Dichos procesos someten al PET a una reacción química que lo reducen a sus monómeros o a sus materias primas originales. El resultante luego es purificado o vuelto a reaccionar, dando un nuevo PET que puede usarse para envases de alimentos, etc.

En algunos lugares, el PET reciclado es usado para envases de alimentos a través de su transformación en la lámina central de una estructura multilaminada.

2.2.5.3 Reciclado energético.

El PET incinerado tiene un alto valor energético (10.000 BTUs por libra), lo cual es comparable al carbón.

Como los envases de PET no contienen halógenos, azufre o nitrógeno, los productos de la combustión completa son compuestos que contienen hidrógeno, oxígeno y carbono.

En su forma básica, el PET está compuesto de carbono, hidrógeno, y oxígeno. El PET no contiene halógenos (cloro o bromo), sulfuro, o nitrógeno.

La mayoría de los envases de PET no requieren aditivos tales como estabilizadores, plastificantes o anti-oxidantes.

2.3 FIBRA DE VIDRIO.

2.3.1 DEFINICIÓN.

La fibra de vidrio es un material obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos y al solidificarse tiene suficiente flexibilidad para ser usado como fibra.

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

La fibra de vidrio tiene como propiedades principales: buen aislamiento térmico, inerte ante ácidos, soporta altas temperaturas. Estas propiedades y el bajo precio de sus materias primas, le han dado popularidad en muchas aplicaciones industriales. Las características del material permiten que la fibra de vidrio sea moldeable con mínimos recursos, la habilidad artesana suele ser suficiente para la autoconstrucción de piezas de bricolaje tales como kayaks, cascos de veleros, terminaciones de tablas de surf, esculturas, etc. Debe tenerse en cuenta que los compuestos químicos con los que se trabaja en su moldeo dañan la salud, pudiendo producir cáncer.

La fibra de vidrio, también es usada para realizar los cables de fibra óptica utilizados en el mundo de las telecomunicaciones para transmitir señales lumínicas, producidas por láser o LEDs. También se utiliza habitualmente como aislante térmico en la construcción, en modo de mantas o paneles de unos pocos centímetros.

2.3.2 TIPOS DE FIBRA DE VIDRIO.

La fibra de vidrio está tipificada fundamentalmente en función de las propiedades que ésta presenta frente a determinados agentes, así tenemos:

Vidrio E (eléctrico): Representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90 % de los refuerzos y tiene buenas propiedades eléctricas.

Vidrio A (alto contenido de álcali): Es menos resistente y tiene un módulo más bajo que el vidrio E, presenta gran resistencia química.

Vidrio AR (álcali resistente): Es el único tipo que puede combinarse con el hormigón o cemento.

Vidrio C (químico): Se sitúa entre el vidrio A y el E y se utiliza entre las capas superficiales de estructuras anticorrosión, tiene una alta resistencia química.

Vidrio R ó S (resistencia): Empleado en estructuras de elevadas características mecánicas, tiene una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio.

Vidrio D (dieléctrico): Con sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobre todo en la construcción de materiales electrónicos de telecomunicación. Estos materiales presentan muy débiles pérdidas eléctricas.

Vidrio B (boro): Tiene excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido de álcali.

Vidrio ERC (eléctrico y resistente químico): Con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.

Vidrio X: Con base de Li_2O por su transparencia a rayos X.

2.3.3 PROPIEDADES DE LA FIBRA DE VIDRIO.

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

Alta adherencia fibra – matriz: Gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.

Resistencia mecánica: Siendo su resistencia específica (tracción / densidad) superior a la del acero.

Buena resistencia a la humedad y a la corrosión: Lo que significa una gran ventaja sobre los materiales metálicos.

Características eléctricas: Es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad dieléctrica, permeable a las ondas electromagnéticas.

Incombustibilidad: Materia mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza, no propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.

Estabilidad dimensional: Poco sensible a las variaciones de temperatura, tiene un bajo coeficiente de dilatación.

Compatibilidad con las materias orgánicas: Su actitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso o el cemento.

Imputrescibilidad: Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.

Débil conductividad térmica: La utilización de los materiales compuestos en la industria de la construcción permite suprimir los puentes térmicos.

Facilidad de fabricación: Tanto a nivel industrial cuanto a nivel artesanal debido a la facilidad que presenta para el moldeo.

Costo relativamente bajo: En función de las grandes prestaciones que provee su costo es bajo, es decir, buena relación costo beneficio.

Tabla 2.3.- Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio.

PROPIEDAD	TIPO DE FIBRA DE VIDRIO			
	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de Hilo (um)	5 – 13	10 - 20	10	10
Densidad (kg/m ³)	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72,5	86	85
Resistencia a la tracción (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4 - 4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /k)	8,6	5	5,1	5

Fuente: (<http://www.polimeroscompuestos.cl/Page/prfv.htm>)

2.3.4 FABRICACIÓN.

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

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

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

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

Varios son los procedimientos que conducen a la producción de fibra de vidrio pero, en general, el principio sobre el cual se basa es siempre el mismo; el

estiramiento a muy alta temperatura, por tracción mecánica o por acción de fluidos en movimiento, de una veta o vena de vidrio fundido y su inmediata solidificación.

2.3.4.1 Fases de fabricación.

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

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

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

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

Para corregir estos defectos es necesario revestir los filamentos con una fina película (ensimaje), que está constituida por una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos. El ensimaje se deposita sobre los filamentos a la salida de la hilera, cuando la temperatura del vidrio está comprendida entre 80 y 120 °C. La cantidad de ensimaje que se deposita sobre el vidrio es relativamente bajo (0.3 – 3 %).

Características del ensimaje:

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

Tabla 2.4.- Principales componentes del ensimaje y su función.

Constituyente (Agente)	%	Naturaleza química	Función
Líquido vector	85 - 95	Agua	Soporte
Filmógenos colantes	3 -- 15	Acetanos, poliésteres, epoxi, copolímeros	Integridad, rigidez, protección, impregnación
Lubricantes	0.05 - 2	Aminas alif. Con radicales grasos, oxialcoholamidas, sales de amonio cuaternario	Protección, lubricación
De puente	0.1 - 0.5	Silanos	Unión a la resina, resistencia, envejecimiento
Antiestáticos	0.2 - 1	Sulfatos de alquilaro, sales de amonio cuaternario	Eliminar o reducir la electricidad estática

Fuente:(http://books.google.com.ec/books?id=cJvCLh9kOK0C&pg=PA21&lpg=PA21&dq=liquido+v+ector+fibra+de+vidrio&source=bl&ots=sybWZ_Cn01&sig=8FJyfwrUYKh4STVSRBkQWnE7mjl&hl=es&ei=9tCySb6dFd-Btwf6xqy8Bw&sa=X&oi=book_result&resnum=2&ct=result#PPA23,M1)

Tipos de Ensimaje:

- Ensimajes textiles.
- Ensimajes plásticos.
- Ensimajes textil-plásticos.

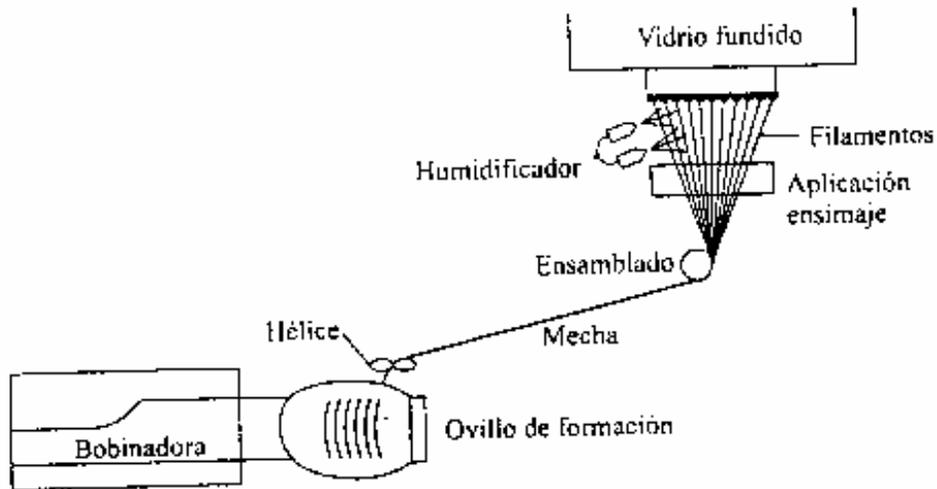


Figura 2.14.- Proceso de fabricación de la fibra de vidrio.

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

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

2.3.5 PRESENTACIONES COMERCIALES DE LA FIBRA DE VIDRIO.

Mat de hilos cortados: Son filtros de hilos cortados a una longitud determinada y aglomerados entre sí mediante un ligante químico. Se presentan en rollos bobinados sobre un tubo soporte de cartón y varían en cuanto al gramaje, que se encuentra entre 100 y 900 g/m² y un ancho, entre 0.092 y 0.240 m.

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

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

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

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

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

Las características principales de este tipo son:

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

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

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

- **Telas o tafetanes (plan weave):** Los hilos de trama y urdimbre se entrecruzan alternativamente. Los gramajes suelen variar de 150 a 1000 g/m².
- **Satén (crowfoot satin):** Los hilos de urdiambre y de trama están entrecruzados según un orden y una frecuencia programados a fin de obtener un aspecto unido, no estando los puntos de ligadura dispuestos en orden. Las armaduras de satén permiten obtener tejidos de fuerte gramaje que conservan una buena flexibilidad.

- **Sarga (twill):** Los hilos de urdiembre y trama están entrecruzados según un orden y una frecuencia programados a fin de obtener líneas diagonales características de este tipo de tejido.
- **Unidireccionales:** El número de hilos es netamente más elevado en un sentido que en el otro (tejido unidireccional urdiembre o tejido unidireccional trama). Los hilos están colocados en paralelo y simplemente sujetos entre ellos.
- **Bidireccional deformable:** La sinuosidad de los hilos es suprimida y los hilos están dispuestos en capas colocadas a 90° las unas sobre las otras y ligadas entre ellas por un pequeño hilo que representa menos del 10 % del total.

Hilos cortados: Son hilos de base cortados generalmente en longitudes de 3 a 12 mm. Estos productos tienen múltiples aplicaciones como:

- El refuerzo de escayolas, cemento o papel.
- Se utiliza en procesos de moldeo de piezas de grandes series a base de resinas termoplásticas

Fibras molidas: Mediante una operación de triturado, las fibras son reducidas a longitudes entre 0.1 y 0.02 mm, manteniéndose su diámetro entre 10 y 17 micras. Estas fibras se utilizan principalmente para el refuerzo de resinas termoplásticas y de poliuretanos (proceso RRIM) y en la mayoría de los casos van desprovistas de ensimaje.

Hilos texturizados: Mediante una operación mecánica se aumenta el volumen de la mecha, obteniendo un producto de fibra de vidrio con cualidades óptimas para la realización de tejidos decorativos.

Roving rizado (spun roving): Para este caso sus rizos constituyen un refuerzo perpendicular a la dirección principal dada al roving. Esta particularidad está hecha a propósito, para mejorar la resistencia transversal de los composites unidireccionales (moldeados por pultrusión). La utilización del spun roving para la realización de tejidos permite aumentar la resistencia a los cortes interlaminares.

Complejos mat-tejido: Estas fibras son asociaciones de mats (de superficie, de hilos cortados o continuos) con tejidos mediante un ligado químico (ligante) o por ligado mecánico (el caso más frecuente, a base de cosido). Se utiliza en los casos siguientes:

- Para economizar tiempos de moldeo, al aplicar los dos tipos de refuerzo en una sola operación de impregnación y desburbujeo.
- Cuando la manipulación de un tejido determinado se hace dificultosa debido a su constitución (unidireccionales).
- Los complejos, como contrapartida ofrecen una deformabilidad mediocre, por lo que su utilización se ve restringida y limitada a piezas de forma plana o con grandes radios de curvatura.

2.4 MATERIALES COMPUESTOS.

2.4.1 DEFINICIÓN.

Se define como material compuesto todo sistema o combinación de materiales constituido a partir de una unión no química, de dos o más componentes insolubles entre sí, que dan lugar a uno nuevo con propiedades características específicas, no siendo estas nuevas propiedades ninguna de las anteriores.

Podemos identificar dos fases: una continua, constituida por la matriz, y otra fase discontinua, denominada refuerzo. Los componentes de un material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente unos con otros.

La identificación de los materiales y la de su interfase debe ser posible de distinguir por medios físicos.

Las propiedades del nuevo material dependen, entonces, del tipo de interfase y de las características de los componentes.

2.4.2 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS.

De las diferentes clasificaciones que podemos hacer de los materiales compuestos, quizás la más importante sea la que se refiere a su matriz, y en la cual podemos identificar tres grupos principales:

2.4.2.1 Materiales compuestos de matriz metálica.

Los materiales compuestos de matriz metálica han sido desarrollados principalmente para componentes aeroespaciales y de motores de automoción. Poseen alta resistencia y muy bajo peso.

Se clasifican en tres grandes grupos, de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado:

- Reforzados con fibra continua.
- Reforzados con fibras discontinuas.
- Reforzados con partículas.

Así, encontramos como ejemplos de los materiales compuestos de matriz metálica las aleaciones de aluminio con refuerzos de fibras de boro, aleaciones de aluminio reforzados con partículas de alúmina y carburo de silicio, etc.

2.4.2.2 Materiales compuestos de matriz cerámica.

Los materiales compuestos de matriz cerámica son más recientes, y mejoran las propiedades mecánicas como la resistencia y tenacidad de los materiales cerámicos tradicionales, especialmente en rangos de bajas temperaturas.

También se clasifican de acuerdo con el tipo de refuerzo incorporado en:

- Reforzados con fibras continuas.
- Reforzados con fibras discontinuas.
- Reforzados con partículas.

Las principales fibras de refuerzo que se combinan con las matrices cerámicas son las de carburo de silicio y las de óxido de aluminio, y en el caso de fibras discontinuas y partículas se utilizan como refuerzo agujas cerámicas de carburo de silicio.

2.4.2.3 Materiales compuestos de matriz polimérica.

Podemos definirlos como materiales con buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, y que dadas sus particulares características, pueden ser moldeados con absoluta libertad de formas. Son aquellos materiales en los cuales la matriz está constituida por un polímero y el refuerzo es algún tipo de fibra, ya sea sintética o inorgánica.

Podemos destacar entre éstos los materiales compuestos termoestables, con sus principales grupos de matrices, las resinas poliéster, viniléster, epoxi, y fenólicas; y, como materiales de refuerzo, las fibras de vidrio, las aramídicas (kevlar) y las de carbono, tomando la forma de numerosos tipos de estructuras textiles simples o combinadas.

2.4.3 MATERIAS PRIMAS QUE COMPONEN UN MATERIAL COMPUESTO.

Dependiendo de los requerimientos deseados en el material compuesto a obtener varía también la materia prima a emplear en el mismo.

Los elementos constitutivos básicos de un material compuesto son:

- Matriz.
- Fibras.
- Núcleo.
- Adhesivo.
- Recubrimiento.

Tabla 2.5.- Tipos de materia prima para materiales compuestos.

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

Fuente:(http://books.google.com.ec/books?id=cJvCLh9kOK0C&pg=PA1&lpg=PA1&dq=matriz+nucl eo+fibras+material+compuesto&source=bl&ots=sybW-_CiZ3&sig=O-yglAD6UkcgqeCUHzwc3y_MwJc&hl=es&ei=Jty1SbilOJyOmQfJ_On2Cg&sa=X&oi=book_result&resnum=9&ct=result#PPA1,M1).

2.4.4 FIBRAS.

Las fibras dentro de la estructura de un material compuesto constituyen el denominado material de refuerzo, pues aporta resistencia mecánica en:

- Tracción.
- Rigidez.
- Dureza.

Es el componente determinante para obtener las principales propiedades mecánicas del compuesto. Las características más importantes de las fibras en los materiales compuestos son su resistencia a la tracción específica y su módulo específico.

2.4.5 MATRIZ.

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

- Orgánicas.
- Inorgánicas.

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

El polímero puede estar unido entre sí mediante fuerzas de diversa intensidad. Así, cuando sean de baja intensidad, podremos superarlas con un simple calentamiento dando lugar al plástico fundido. Los polímeros de estas

características se llaman “**Termoplásticos**” los cuales se funden o plastifican con un suministro de calor. Cuando las fuerzas de unión de estos filamentos entre sí son tan intensas que llegan a igualar a las de construcción de ellos mismos, lo que implica que el incrementar la temperatura no podrán cambiar de estado sólido a líquido; denominando a estos polímeros **Termoendurecibles** o **Termoestables**. Para la práctica las matrices más utilizadas para la fabricación de materiales compuestos son las resinas líquidas termoestables.

2.4.5.1 Matriz epoxi (resina).

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

La mayoría de estas resinas son aromáticas pero algunas veces mezcladas con material alifático.

En general las resinas aromáticas dan superiores prestaciones en los materiales compuestos.

Las resinas se curan por reacción con un agente de curado, esta reacción se controla mediante el uso de catalizadores y aceleradores.

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

La dureza de los epoxi es superior a la de la resina poliéster, por ello, pueden operar a temperaturas más altas.

Tienen buena adherencia a muchos sustratos, baja contracción durante la polimerización y son especialmente resistentes a los ataques del álcali, permite moldeos de alta calidad con buena tolerancia dimensional.

Tabla 2.6.- Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas.

PROPIEDAD	RESINA EPOXI	
	TGMDA	DGEBA
Módulo de Young (Mpa)	3800 - 4500	2750 - 3450
Deformación a rotura (%)	1 -2	5 - 8
Tg(°C)	175 - 235	120 - 175
Absorción de agua (%)	4 - 6	2 - 3

Fuente: <http://www.miliarium.com/Proyectos/Carreteras/Pliegos/pliego2e.asp>

2.4.5.2 Matriz viniléster (resina).

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

Características:

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

2.4.5.3 Matriz ésteres cianato (resina).

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

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

Tabla 2.7.- Propiedades de las resinas ésteres cianato.

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

Fuente: (http://books.google.com.ec/books?id=cJvCLh9kOK0C&pg=PA56&lpg=PA56&dq=densidde+resina+esteres+cianato&source=bl&ots=sybW0Yxi03&sig=87ITst-OTm3Rwltu3bmTdWeggvk&hl=es&ei=PAG3SZfoOZnNmQecvXICg&sa=X&oi=book_result&resnr=1&ct=result#PPA55,M1)

2.4.5.4 Matriz polieteramida (resina).

Ofrecen estabilidad ante la oxidación para altas temperaturas, su resistencia a la tracción esta en aproximadamente 195 MPa. Su aplicación se remonta a la aeronáutica, espacial, sector eléctrico, automoción.

2.4.5.5 Matriz poliéster no saturado (resina).

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

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

Tabla 2.8.- Propiedades de las resinas de Poliéster Polimerizadas.

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

Fuente:(http://www.quiminet.com.mx/ar9/ar_%25F7%2586R%253F%25C7%25D8S%25CB.htm)

Aplicaciones:

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

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

2.4.5.6 Matriz fenólicas (resina).

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

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

Ventajas:

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

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

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

Propiedades:

- Excelentes características eléctricas.
- Buena resistencia a temperaturas elevadas.

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

2.4.5.7 Matriz bismaleimida y poliimida (resina).

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

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

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

Aunque menos utilizadas que las termoestables, existen también varias resinas termoplásticas en el mercado.

- Matriz policloruro de vinilo (resina PVC).
- Matriz polietileno (resina PE).
- Matriz polipropileno (resina PP).
- Matriz poliestireno (resina PS).
- Matriz copolímeros de estireno (resina ABS-SAN).

- Matriz ésteres de celulosa (resina).
- Matriz polimetacrilato de metilo (resina PMMA).
- Matriz poliamidas (resina PA).
- Matriz polioximetileno (resina POM).
- Matriz poliésteres termoplásticos (resina).
- Matriz policarbonato (resina PC).
- Matriz plásticos fluorados (resina).

2.4.6 INTERFASE FIBRA MATRIZ.

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

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

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

2.4.7 IMPREGNABILIDAD.

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

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

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

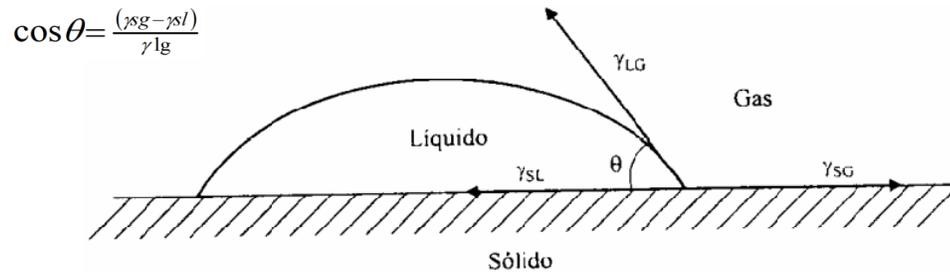


Figura 2.15.- Ángulo de contacto de impregnabilidad.

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

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

2.4.8 UNIÓN EN LA INTERFASE.

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

Existen cuatro tipos de unión:

2.4.8.1 Unión mecánica.

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

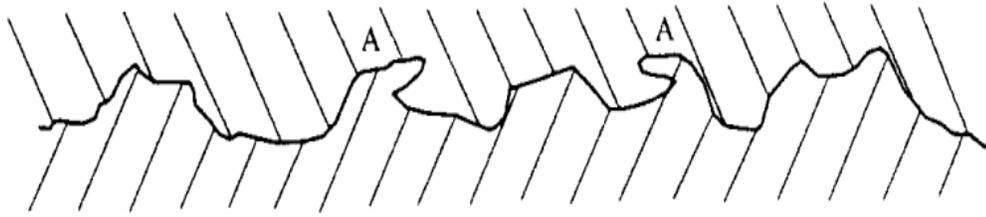


Figura 2.16.- Unión mecánica fibra matriz.

2.4.8.2 Unión electrostática.

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

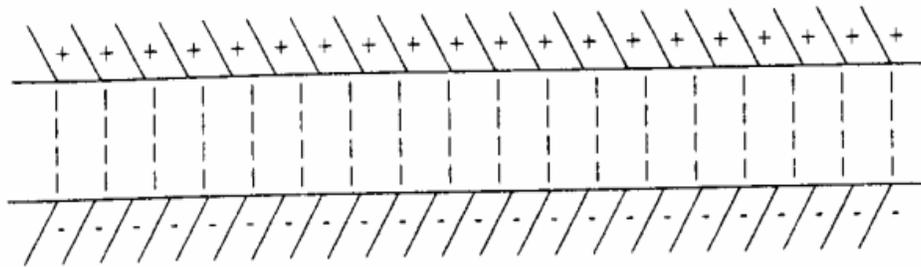


Figura 2.17.- Unión electrostática fibra matriz.

2.4.8.3 Unión química.

Puede estar formada entre grupos químicos en la superficie de refuerzo y grupos químicos compatibles en la matriz.

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

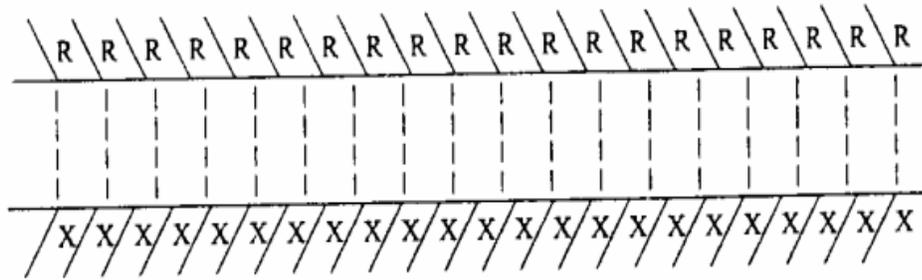


Figura 2.18.- Unión química fibra matriz.

2.4.8.4 Unión mediante reacción.

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

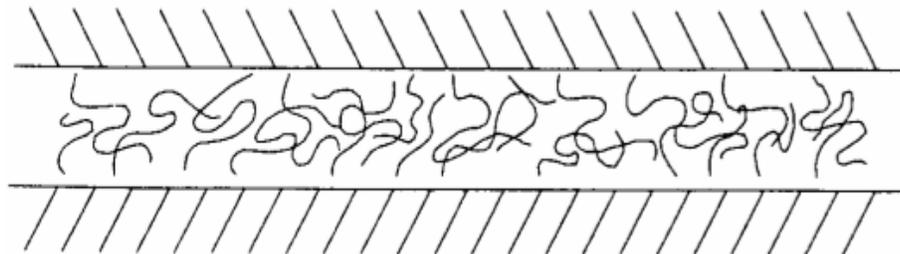


Figura 2.19.- Unión mediante interdifusión fibra matriz

2.4.9 Cargas y aditivos.

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

- Cargas reforzantes (permiten aligerar la pieza).
- Cargas de bajo coste (abaratán el producto final).

- Cargas ignífugas.
- Cargas conductoras y antiestáticas.
- Colorantes y pigmentos.
- Agentes anti ultravioleta.
- Agentes anti retracción.

Para mejorar la procesabilidad del material compuesto se utiliza:

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

Efectos de las cargas sobre las resinas:

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

La correcta elección de una carga o resina depende de:

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

2.4.9.1 Cargas reforzantes.

Las cargas reforzantes más utilizadas son las micro esferas de vidrio, las cuales reparten regularmente los esfuerzos en las piezas, evitando las concentraciones de tensiones. Debido a que su relación $\frac{\text{superficie}}{\text{volumen}}$, no tiene una gran influencia sobre la viscosidad de la resina se las puede utilizar en porcentajes altos. Éstas micro esferas pueden ser huecas o macizas y su diámetro está comprendido entre 10 a 150 micras.

2.4.9.2 Cargas no reforzantes.

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

Las más utilizadas son:

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

2.4.9.3 Aditivos lubricantes.

- Lubrificante interno: modifica las fuerzas de cohesión intermoleculares, disminuyendo la viscosidad de la resina sin alterar sus propiedades.
- Lubrificante externo: aflora a la superficie de la resina para reducir su tendencia a pegarse a los moldes.

2.4.9.4 Aditivos colorantes.

- Pigmentos: son de origen mineral u orgánico, son preparados a partir de productos insolubles, en forma sólida.
- Colorantes: compuestos solubles en agua o disolvente orgánico, se utilizan poco debido a su mala resistencia química y térmica.
- Pastas colorantes: son dispersiones de pigmentos en un soporte pastoso, de fácil incorporación y dispersión en la resina.

2.4.9.5 Aditivos químicos.

- Agentes anti reacción: se utilizan para obtener un mejor acabado superficial.
- Aditivos anti ultravioleta: su principal función es la de proteger al material compuesto de los rayos UV.

2.4.10 CRITERIOS DE ELECCIÓN DE LOS CONSTITUYENTES.

Las propiedades mecánicas de la pieza son función del porcentaje de refuerzo y de la orientación de las fibras.

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

2.4.11 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS.

Son materiales que contienen fibras en su interior; así, se forman por la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles dentro de una matriz más blanda y dúctil. Se consigue mejor resistencia (incluso a altas temperaturas), rigidez y alta relación resistencia/peso.

El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras y proporciona ductilidad y tenacidad, mientras que las fibras soportan la mayor parte de la fuerza aplicada.

2.4.11.1 Regla de las mezclas.

Con la regla de las mezclas se predicen propiedades como densidad, conductividad térmica y eléctrica (sólo para la dirección de las fibras, si son unidireccionales y continuas, ya que sino no sabemos la dirección de las fibras y no se predicen sus propiedades)

$$\rho = f_m \rho_m + f_f \rho_f$$

Ecuación 2.1

Donde:

ρ = densidad del material fibroso

f_m = fracción volumétrica de la matriz

ρ_m = densidad de la matriz

f_f = fracción volumétrica de las fibras

ρ_f = densidad de las fibras

El **módulo de la elasticidad** se predice también con esta regla (sólo para fibras continuas y unidireccionales), pero sólo a baja tensión; a altas tensiones se deforma la matriz y contribuye poco a la rigidez del compuesto, no cumpliéndose la regla de las mezclas:

$$E = f_f E_f$$

Ecuación 2.2

Donde:

E = módulo de la elasticidad

f_f = fracción volumétrica de las fibras

E_f = módulo de la elasticidad de las fibras

Si la carga se aplica en dirección perpendicular a las fibras:

$$1/E = (f_m / E_m) + (f_f / E_f)$$

Ecuación 2.3

La *resistencia* de un material compuesto reforzado por fibras depende de la unión entre las fibras y la matriz.

Se puede predecir la resistencia con la regla de las mezclas para un material con fibras continuas y paralelas:

$$\sigma = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f$$

Ecuación 2.4

Donde:

σ = resistencia del material

σ_m = tensión que actúa sobre la matriz cuando el compuesto está deformado hasta el punto donde se fractura la fibra.

σ_f = resistencia de las fibras.

2.4.11.2 Características de los materiales compuestos reforzados con fibras.

Al diseñar este tipo de materiales se tienen en cuenta las siguientes características:

- Relación de forma (l / d)
- Cantidad de fibras
- Orientación de las fibras
- Propiedades de las fibras
- Propiedades de las matrices
- Unión y rotura

2.4.11.2.1 Relación de forma.

l / d (longitud / diámetro de la fibra)

La resistencia aumenta cuando la relación es grande.

Esto se consigue con fibras de diámetro lo más pequeño posible; es debido a que las fibras se fracturan por defectos en la superficie, y cuanto menor sea el diámetro menos área superficial, y por tanto más resistencia.

También se prefiere fibras largas, ya que los extremos soportan menos carga que el centro de las fibras, y cuanto más largas sean menos extremos habrá; pero son difíciles de introducir a veces.

Por tanto, se usan fibras cortas con una relación de forma por encima de algún valor crítico, para conseguir buena resistencia y fácil procesado

2.4.11.2.2 Cantidad de fibras.

Una fracción mayor en volumen de fibras incrementa la resistencia y la rigidez del compuesto. Sin embargo, la fracción máxima en volumen de fibras es aproximadamente el 80%, más allá de esta cantidad las fibras ya no quedan totalmente rodeadas por la matriz, obteniéndose un material menos resistente.

2.4.11.2.3 Orientación de las fibras.

Las fibras de refuerzo pueden introducirse en la matriz con orientaciones diversas:

Las fibras cortas con orientación aleatoria se pueden introducir con facilidad en la matriz, dando un comportamiento isotrópico (propiedades homogéneas en el material)

Los ordenamientos unidireccionales con fibras largas producen propiedades anisotrópicas, con resistencia y rigidez paralelas a las fibras (Cuando la orientaciones erpendicular a las fibras la resistencia es menor que en paralelo, y se ve que disminuye con el aumento del ángulo entre las fibras y la tensión aplicada).

Las propiedades de estos materiales se pueden diseñar para soportar condiciones de carga diferentes; es decir, se pueden introducir fibras largas y continuas en varias direcciones, consiguiendo un compuesto casi isotrópico.

Las fibras también se pueden organizar en patrones tridimensionales.

2.4.11.2.4 Propiedades de las fibras.

Son resistentes, rígidas y de poco peso. Si el material compuesto va a ser utilizado a temperaturas altas, la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta.

Características:

- Resistencia específica = σ_y/ρ
- Módulo específico = E / ρ

Donde:

σ_y = límite elástico

ρ = densidad de la fibra

E = módulo de la elasticidad de la fibra

Interesa que la resistencia específica sea alta para una fibra mejor (se consigue con baja densidad o alta resistencia de la fibra).

Generalmente el módulo específico más alto se encuentra en materiales con número atómico bajo y enlace covalente (ej. C y B; también el polietileno, por su baja densidad y mayores resistencia y módulo específico, pero no resiste alta temperatura; las fibras cerámicas son resistentes, rígidas y resisten altas temperaturas)

2.4.11.2.5 Propiedades de las matrices.

La matriz de un material compuesto soporta las fibras manteniéndolas en una posición correcta, transfiere la carga a las fibras fuertes, las protege de sufrir daños durante su manufactura y su uso y evita la propagación de grietas en las fibras a lo largo del compuesto.

La matriz es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.

También se selecciona la matriz en función de la aplicación, por ejemplo:

- Las matrices poliméricas son buenas ya que son moldeables.
- Las matrices metálicas resisten altas temperaturas

2.4.11.2.6 Unión y rotura.

Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz para que la carga se transfiera correctamente de la matriz a las fibras. Si la unión es pobre, las fibras pueden salir de la matriz durante la carga, reduciendo la resistencia y la resistencia a la fractura del compuesto. En algunos casos, para reforzar la unión se pueden utilizar recubrimientos especiales (ej. las fibras de B se recubren de carburo de Si para mejorar su unión con la matriz de Al).

Otra propiedad que debe tomarse en consideración al introducir fibras en una matriz es la similitud de los coeficientes de expansión térmica de ambos materiales (pues si se expanden o contraen de forma distinta, se pueden romper las fibras o su unión con la matriz).

Las capas de tejido se unen, pues sino se puede producir la delaminación (separación bajo carga).

2.4.11.3 Aplicaciones:

- Grafito-polímero: aplicaciones aeroespaciales, artículos deportivos.
- Vidrio-polímero: equipos deportivos, componentes aeroespaciales.
- Aluminio bórico: aspas de ventiladores en motores, aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales.
- Kevlar-epóxido y kevlar-poliéster: aplicaciones aeroespaciales, aviación, artículos deportivos, chamarras antifuego.

- Hormigón-varillas de acero y ladrillos-paja: construcción.

2.5 TEORÍA DE ENSAYOS A FLEXIÓN.

2.5.1 VIGAS.

Se denomina viga a un elemento constructivo lineal que trabaja principalmente a flexión. En las vigas la longitud predomina sobre las otras dos dimensiones y suele ser horizontal.

2.5.2 FLEXIÓN.

En ingeniería se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" se aplica cuando una dimensión es dominante frente a las otras. Un caso típico son las vigas, las que están diseñadas para trabajar, principalmente, por flexión. Igualmente, el concepto de flexión se extiende a elementos estructurales superficiales como placas o láminas.

El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector.

El esfuerzo de flexión provoca tensiones de tracción y compresión, produciéndose las máximas en el cordón inferior y en el cordón superior respectivamente, las cuales se calculan relacionando el momento flector y el segundo momento de inercia.

En las zonas cercanas a los apoyos se producen esfuerzos cortantes o punzonamiento. También pueden producirse tensiones por torsión, sobre todo en las vigas que forman el perímetro exterior de un forjado.

Estructuralmente el comportamiento de una viga se estudia mediante un modelo de prisma mecánico.

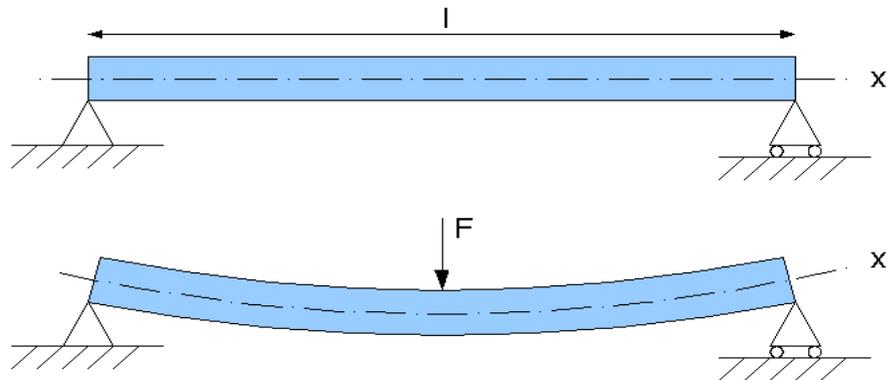


Figura 2.20 .- Viga sometida a flexión

2.5.3 FIBRA NEUTRA.

La fibra neutra o "eje neutro" es la superficie material curva, de una pieza alargada o de una placa, deformada por flexión que separa la zona comprimida de la zona traccionada. Tiene la siguiente propiedad importante, si consideramos una curva contenida totalmente la fibra neutra antes y después de la deformación por flexión, las distancias a lo largo de esa curva no varían.

En una viga de material elástico e isótropo sometida a flexión, la tensión sobre una sección transversal es proporcional a la distancia a la fibra neutra.

2.5.4 FLEXIÓN EN VIGAS Y ARCOS.

Las vigas o arcos son elementos estructurales pensados para trabajar predominantemente en flexión. Geométricamente son prismas mecánicos cuya rigidez depende, entre otras cosas, del momento de inercia de la sección transversal de las vigas. Existen dos hipótesis cinemáticas comunes para representar la flexión de vigas y arcos:

- La hipótesis de Navier-Bernouilli.
- La hipótesis de Timoshenko.

2.5.5 TEORÍA DE NAVIER-BERNOULLI.

La teoría de Navier-Bernouilli para el cálculo de vigas es la que se deriva de la hipótesis cinemática de Navier-Bernouilli, y puede emplearse para calcular tensiones y desplazamientos sobre una viga o arco de longitud de eje grande comparada con el canto máximo o altura de la sección transversal.

Para escribir las fórmulas de la teoría de Navier-Bernouilli conviene tomar un sistema de coordenadas adecuado para describir la geometría, una viga es de hecho un prisma mecánico sobre el que se pueden considerar las coordenadas (s, y, z) con s la distancia a lo largo del eje de la viga y (y, z) las coordenadas sobre la sección transversal. Para el caso de arcos este sistema de coordenadas es curvilíneo, aunque para vigas de eje recto puede tomarse como cartesiano (y en ese caso s se nombra como x). Para una viga de sección recta la tensión en el caso de flexión compuesta desviada, la tensión viene dada por la fórmula de Navier:

$$\sigma(x, y, z) = \frac{N_x(x)}{A} + \frac{zI_z - yI_{yz}}{I_zI_y - I_{yz}^2}M_y(x) - \frac{yI_y - zI_{yz}}{I_zI_y - I_{yz}^2}M_z(x)$$

Ecuación 2.5

Donde:

I_y, I_z

Son los segundos momentos de área (momentos de inercia) según los ejes Y y Z.

I_{yz}

Es el momento de área mixto o producto de inercia según los ejes Z e Y.

$M_y(x), M_z(x)$ Son los momentos flectores según las direcciones Y y Z, que en general variarán según la coordenada x.

$N_x(x)$ Es el esfuerzo axial a lo largo del eje

Si las direcciones de los ejes de coordenadas (y , z) se toman coincidentes con las [dirección principal , direcciones principales de inercia] entonces los productos de inercia se anulan y la ecuación anterior se simplifica notablemente. Además si se considera el caso de flexión simple no-desviada las tensiones según el eje son simplemente:

$$\sigma(x, y, z) = -\frac{yM_z(x)}{I_z} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Por otro lado, en este mismo caso de flexión simple no desviada, el campo de desplazamientos, en la hipótesis de Bernoulli, viene dada por la ecuación de la curva elástica:

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = \frac{M_z(x)}{EI_z} \quad \Rightarrow \quad \frac{d^4w(x)}{dx^4} = \frac{q_L(x)}{EI_z} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

$w(x)$ Representa las cargas a lo largo del eje de la viga.

$M_z(x)$ El módulo de elasticidad del material.

I_z El segundo momento de inercia de la sección transversal.

E Representa el momento flector a lo largo de la ordenada x .

$q_L(x)$ Representa la flecha, o desplazamiento vertical, respecto de la posición inicial sin cargas.

2.5.6 TEORÍA DE TIMOSHENKO.

Esquema de deformación de una viga que ilustra la diferencia entre la teoría de Timoshenko y la teoría de Euler-Bernouilli: en la primera θ_i y dw/dx_i no tienen necesariamente que coincidir, mientras que en la segunda son iguales.

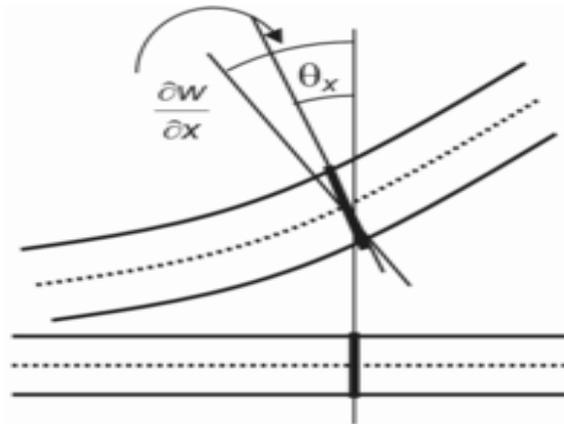


Figura 2.21.- Esquema de deformación de una viga

La diferencia fundamental entre la teoría de Euler-Bernouilli y la teoría de Timoshenko es que en la primera el giro relativo de la sección se aproxima mediante la derivada del desplazamiento vertical, esto constituye una aproximación válida sólo para piezas largas en relación a las dimensiones de la sección transversal, y entonces sucede que las deformaciones debidas al esfuerzo cortante son despreciables frente a las deformaciones ocasionadas por el momento flector.

En la teoría de Timoshenko, donde no se desprecian las deformaciones debidas al cortante y por tanto es válida también para vigas cortas, la ecuación de la curva elástica viene dada por el sistema de ecuaciones más complejo.

$$\begin{cases} G \left(\frac{dw}{dx} - \theta_z \right) = \frac{V_y}{A} & \text{Ecuación 2.8} \\ E \left(\frac{d\theta_z}{dx} \right) = \frac{M_z}{I_z} & \text{Ecuación 2.9} \end{cases}$$

Derivando la primera de las dos ecuaciones anteriores y substituyendo en ella la segunda llegamos a la ecuación de la curva elástica incluyendo el efecto del esfuerzo cortante.

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{1}{GA} \frac{dV_y}{dx} + \frac{M_z}{EI_z}$$

Ecuación 2.10

2.5.7 FLEXIÓN EN PLACAS Y LÁMINAS.

Una placa es un elemento estructural que puede presentar flexión en dos direcciones perpendiculares. Existen dos hipótesis cinemáticas comunes para representar la flexión de placas y láminas:

- La hipótesis de Love-Kirchhoff
- La hipótesis de Reissner-Mindlin.

Siendo la primera el análogo para placas de la hipótesis de Navier-Bernouilli y el segundo el análogo de la hipótesis de Timoshenko.

2.5.8 TEORÍA DE LOVE-KIRCHHOFF.

La teoría de placas de Love-Kirchhoff es la que se deriva de la hipótesis cinemática de Love-Kirchhoff para las mismas y es análoga a la hipótesis de Navier-Bernouilli para vigas y por tanto tiene limitaciones similares, y es adecuada sólo cuando el espesor de la placa es suficientemente pequeño en relación a su largo y ancho.

Para un placa de espesor constante h emplearemos un sistema de coordenadas cartesianas con (x, y) según el plano que contiene a la placa, y el eje z se tomará según la dirección perpendicular a la placa (tomando $z = 0$ en el plano medio).

$$\sigma_x(x, y, z) = \frac{m_x z}{I_b} \quad \sigma_y(x, y, z) = \frac{m_y z}{I_b}$$

Ecuación 2.11

Donde:

$$I_b = h^3/12$$

Es el segundo momento de área por unidad de ancho.

$$m_x, m_y = h^3/12$$

Son los momentos flectores por unidad de ancho, que pueden relacionarse con el campo de desplazamientos verticales $w(x,y)$ mediante las siguientes ecuaciones.

$$m_x = -D \left[\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right] \quad m_y = -D \left[\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} \right]$$

Ecuación 2.12

Para encontrar la flecha que aparece en la ecuación anterior es necesario resolver una ecuación en derivadas parciales que es el análogo bidimensional a la ecuación de la curva elástica:

$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} = \frac{q_S(x,y)}{D}$$

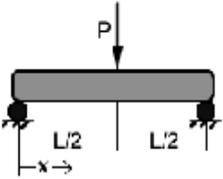
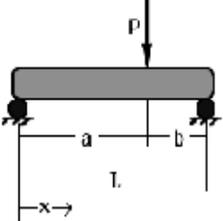
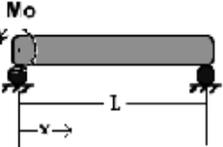
Ecuación 2.13

El factor: $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu)}$ se llama rigidez.

2.5.9 TEORÍA DE REISSNER-MINDLIN.

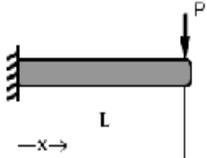
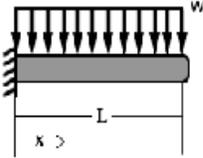
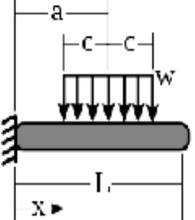
La teoría de Reissner-Mindlin es el análogo para placas de la teoría de Timoshenko para vigas. Así en esta teoría, a diferencia de la teoría más aproximada de Love-Kirchhoff, el vector normal al plano medio de la placa una vez deformada la placa no tiene por qué coincidir con el vector normal a la superficie media deformada.

Tabla 2.9.- Vigas con soportes simples

Tipo de carga	Pendiente	Deformación	Curva elástica
<p>Viga con carga concentrada P a media longitud</p> 	$\theta_1 = -\theta_2 = -\frac{PL^2}{16EI}$	$y_{max} = \frac{-PL^3}{48EI}$ <p>para $x = \frac{L}{2}$</p>	$y = -\frac{Px}{16EI} \left(1 - \frac{4x^2}{3L^2}\right) \quad x < \frac{L}{2}$
<p>Viga con carga concentrada en cualquier longitud</p> 	$\theta_1 = \frac{-Fab(L+b)}{6EIL}$	$y_{max} = \frac{-P}{9EI} \frac{b}{\sqrt{3I}} (L^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}$ <p>para $x = \sqrt{\frac{L^2 - b^2}{3}}$</p>	$y = -\frac{PLbx}{6EI} \left(1 - \frac{b^2 - x^2}{L^2}\right) \quad x < a$
<p>Viga con carga distribuida constante sobre toda su longitud</p>	$\theta_{max} = \frac{-wL^3}{24EI}$	$y_{max} = \frac{-5wL^4}{384EI}$	$y = \frac{-wx}{24EI} (x^3 - 2Lx^2 + L^3)$
<p>Viga con momento aplicado al inicio</p> 	$\theta_1 = -\frac{M_0L}{3EI}$ $\theta_2 = \frac{M_0L}{6EI}$	$y_{max} = \frac{M_0L^2}{9\sqrt{3}EI}$ <p>para $x = L \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$</p>	$y = -\frac{M_0L}{6EI} (L-x) \left(1 - \frac{(L-x)^2}{L^2}\right)$

Fuente: (http://es.wikipedia.org/wiki/Pendientes_y_deformaciones_en_vigas)

Tabla 2.10.- Vigas empotradas.

Tipo de carga	Pendiente	Deformación	Curva elástica
<p>Ménsula con carga concentrada al extremo</p> 	$\theta_{max} = \frac{-PL^2}{2EI}$	$y_{max} = \frac{-PL^3}{3EI}$	$y = \frac{-Px^2}{6EI} (3L - x)$
<p>Ménsula con carga concentrada en un punto intermedio (a una distancia a del extremo empotrado)</p>	$\theta_{max} = \frac{-Pa^2}{2EI}$	$y_{max} = -Pa^2 \frac{3L - a}{6EI}$	$y = \frac{-Px^2}{6EI} (3a - x)$ cuando $x < a$ $y = \frac{-Pa^2}{6EI} (3x - a)$ cuando $x > a$
<p>Ménsula con carga distribuida constante sobre toda su longitud</p> 	$\theta_{max} = \frac{-wL^3}{6EI}$	$y_{max} = \frac{-wL^4}{8EI}$	$y = \frac{-wx^2}{24EI} (x^2 - 4Lx + 6L^2)$
<p>Ménsula con carga distribuida constante sobre parte de su longitud</p> 	$\theta_{max} = \frac{-w}{6EI} (a^3 - 15c^3 + 3ac(a + c))$	$y_{max} = \frac{-wca^2}{3EI} \left(L(3 + \frac{c^2}{a^2}) - a(1 + \frac{c^2}{a^2}) \right)$	

Fuente: (http://es.wikipedia.org/wiki/Pendientes_y_deformaciones_en_vigas)

2.5.10 CURVA ELÁSTICA.

La curva elástica ó elástica, es la deformada por flexión del eje longitudinal de una viga recta, la cual se debe a la aplicación de cargas transversales en el plano xy sobre la viga.

2.5.11 ECUACIÓN DE LA ELÁSTICA.

La ecuación de la elástica es la ecuación diferencial que, para una viga de eje recto, permite encontrar la forma concreta de la curva elástica. Concretamente la ecuación de la elástica es una ecuación para el campo de desplazamientos que sufre el eje de la viga desde su forma recta original a la forma curvada o flectada final. Para una viga de material elástico lineal sometido a pequeñas deformaciones la ecuación diferencial de la elástica viene dada por:

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = \frac{M_z(x)}{EI_z}$$

Ecuación 2.14

Donde:

$v(x)$ Representa la flecha, ordenada (eje y) o desplazamiento vertical, respecto de la posición sin cargas.

x La abscisa (eje X) sobre la viga.

$M_z(x)$ El momento flector sobre la abscisa x .

I_z El momento de inercia o momento de segundo orden, de la sección transversal.

E El módulo de elasticidad del material.

La ecuación (2.10) constituye sólo una aproximación, en la que se ha supuesto que las deformaciones son muy pequeñas con respecto a las dimensiones de la viga y, por tanto, se ha aproximado el giro de una sección de la viga con la

derivada primera de la flecha. Para deformaciones mayores se obtiene la ecuación más exacta (2.11):

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = \frac{M_z(x)}{EI_z} \left[1 + \left(\frac{dv(x)}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}$$

Ecuación 2.15

La ecuación de la elástica (2.10) puede ser reescrita en función de la carga distribuida $q(x)$ sobre la viga:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI_z \frac{d^2v(x)}{dx^2} \right) = q(x)$$

Ecuación 2.16

Esta última ecuación es interesante porque su generalización a elementos bidimensionales es precisamente la ecuación fundamental de gobierno de placas o ecuación de Lagrange para placas delgadas:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left[EI_{pl} \left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right) \right] = q(x,y)$$

Ecuación 2.17

Donde EI_{pl} es la rigidez de una placa delgada en flexión.

2.5.12 CÁLCULO DE DEFORMACIONES EN VIGAS.

2.5.12.1 Método de integración.

Éste método consiste en la integración de la ecuación descrita en la sección anterior. Es necesario obtener primero la ley de variación del momento flector para la viga estudiada, tal como se hizo en el ejemplo anterior. Una vez conocida la ley de momentos flectores, se procede por integración directa.

Si se conoce para un punto concreto, digamos por ejemplo $x = a$, el desplazamiento vertical y el ángulo girado por la curva elástica alrededor de ese punto respecto a la posición original entonces:

$$v(x) = v_a + \theta_a(x - a) + \int_a^x ds \int_a^s d\bar{s} \frac{M_z(\bar{s})}{EI}$$

Ecuación 2.18

El llamado método del área-momento, es en realidad una versión en términos geométricos del método de integración. De acuerdo con esta versión la doble integral en la ecuación anterior puede calcularse del siguiente modo:

- Se calcula la superficie del área bajo la curva Mz/EI .
- Se calcula la distancia centroide del área anterior medida a partir del eje de la viga.
- La segunda integral buscada es el producto de las dos magnitudes anteriores.

2.5.12.2 Método de superposición.

El método de superposición usa el principio de superposición de la teoría de la elasticidad lineal. El método de superposición consiste en descomponer el problema inicial de cálculo de vigas en problemas o casos más simples, que sumados o "superpuestos" son equivalentes al problema original. Puesto que para los casos más sencillos existen tablas y fórmulas de pendientes y deformaciones en vigas al descomponer el problema original como combinaciones de los casos más simples recogidos en las tablas, la solución del problema puede ser calculada sumando resultados de estas tablas y fórmulas.