

7
zej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

REFORZAMIENTO DE RESINA
POLIESTER CON FIBRA NATURAL

TESIS MANCOMUNADA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A N :
MIGUEL ANGEL AMADOR SANTIAGO
FRANCISCO JOSE GARCIA ZETINA



MEXICO, D. F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

INDICE

	Pág.
PRESENTACION	1
1) INTRODUCCION	4
1.1) Materiales Compuestos.	4
1.1 A) Introducci3n.	4
1.1 B) Comp3sitos fibrosos.	7
1.1 C) Comp3sitos laminares.	10
1.1 D) Comp3sitos particulados.	11
1.2) Pol3meros (Resinas).	12
1.2 A) Introducci3n.	12
1.2 B) Clasificaci3n.	15
1.2 C) Resina poli3ster.	22
1.3) Fibras naturales (zacate).	31
2) BASES TEORICAS	35
2.1) Tipos de materiales y sus propiedades.	35
2.2) Propiedades mec3nicas de materiales.	38
2.2 A) M3dulo el3stico.	39
2.2 B) Esfuerzo de cedencia.	46
2.2 C) Resistencia mec3nica a la tensi3n.	48
2.2 D) Dureza.	49

2.2 E) Ductilidad.	50
2.2 F) Gráfica de esfuerzo contra deformación.	50
2.3) Prueba de tensión.	53
2.4) Prueba de densidad.	57
2.5) Resinas.	62
2.5 A) Propiedades generales.	62
2.5 B) Propiedades mecánicas.	63
2.6) Compósitos.	70
2.6 A) Propiedades generales.	70
2.6 B) Propiedades mecánicas.	72
2.7) Fibras (características y propiedades).	79
3) DESARROLLO EXPERIMENTAL	81
3.1) Preparación de muestras.	81
3.2) Preparación de moldes.	82
3.3) Pruebas de tensión.	83
3.4) Medición de densidades.	85
4) RESULTADOS Y TRATAMIENTO DE DATOS	87
4.1) Ensayo de tensión.	87
4.2) Picnometría.	96

5) CONCLUSIONES.

102

6) REFERENCIAS.

111

Presentación

A través de la historia, el hombre ha utilizado en su provecho los recursos que le ha ofrecido la naturaleza. Al principio, simplemente los tomaba en su forma natural, limitándose a aplicarlos a sus necesidades primarias (comer, vestir, etc.). Sin embargo, al complicarse los modelos de vida, se hizo inminente el intentar comprender el comportamiento de la naturaleza, de tal forma de generar explicaciones que sirvieran para aprovechar, al máximo, los recursos naturales.

Los materiales, como recurso natural, han estado ligados al hombre desde su origen, siendo su uso una actividad humana fundamental para la elaboración de muchos objetos útiles, así como para la creación de estructuras tales como viviendas, monumentos, etc. Lógicamente, se han buscado combinaciones adecuadas de materiales cuyas propiedades resultantes sean diferentes a las de los componentes, de tal forma que se puedan aplicar en distintos campos. De aquí surgen precisamente los materiales compuestos o compósitos, los cuales combinan las propiedades de ambos componentes, compensando las deficiencias de uno y de otro.

El objetivo del presente trabajo es precisamente la elaboración de un material compuesto, tomando como elemento matriz a la resina poliéster comercial clave M-70, y como material de refuerzo a las fibras de zacate (palma samandoca). Se desarrolló una técnica para la elaboración de muestras y moldes en base a estándares, la cual incluye aspectos como el pulido de la fibra, las cantidades agregadas de elementos necesarios para la polimerización, el corte de las fibras y su mezclado con la resina, uso de moldes de un material adecuado, corte de las muestras ya polimerizadas y su pulido. Una vez elaboradas las muestras se procedió a su caracterización mecánica, que fue el aspecto experimental fundamental en este trabajo. Lógicamente se hicieron solamente algunas pruebas, de tal forma que la caracterización realizada debe considerarse como preliminar.

El trabajo experimental estuvo respaldado por un estudio teórico previo de los distintos materiales utilizados, el cual incluye propiedades generales y comportamiento mecánico, principalmente comportamiento a la tensión que fue la prueba fundamental a la que se sometieron las muestras. Con estos primeros dos capítulos comienza la tesis (introducción y bases teóricas). Posteriormente se detalla el procedimiento experimental (capítulo tres) y se muestran los resultados y tratamiento de datos (capítulo 4). Finalmente se incluyen las conclusiones del trabajo y se compara

Finalmente se incluyen las conclusiones del trabajo y se compara el material elaborado con los resultados de otros trabajos previos.

En general, los resultados obtenidos muestran que existe una concentración y longitud de fibra en el que se alcanza un máximo en la resistencia y rigidez del material, respecto a la resina pura.

1) INTRODUCCION

1.1) MATERIALES COMPUESTOS (COMPOSITOS).

1.1 A) Introducción

Los materiales modernos que poseen combinaciones especialmente útiles de sus propiedades (ligereza, resistencia mecánica, tenacidad, etc.) suelen ser resultado de la mezcla de dos o más componentes muy distintos entre sí. Por ejemplo, uno de éstos puede ser ligero y fuerte, pero demasiado frágil para usarse solo; el otro componente puede ser tenaz y dúctil, pero deficiente en resistencia mecánica.

Cuando se combinan adecuadamente dos de estos materiales, se forma un material denominado " compósito " (término usado como traducción del inglés composite), cuyas propiedades combinan las

cualidades de ambos componentes. Varios compósitos son conocidos por su amplio uso en la vida cotidiana: la madera, el concreto, el papel, etc. (1)

A pesar de que el término compósito tiene una interpretación moderna, el uso de este tipo de materiales es tan antiguo como el uso de la rueda. Por ejemplo, el reforzamiento de materiales con fibras tiene una antigüedad de al menos 5000 años; los pueblos de esas épocas usaban cabellos de caballo para reforzar ladrillos hechos de lodo. El papel y el concreto eran ya conocidos por los antiguos romanos. Además, casi todos los materiales naturales que se relacionan con el soporte de alguna carga, como la madera, el hueso y los músculos, son compósitos.

Sin embargo, la industria de estos materiales es nueva, y ha crecido rápidamente en los últimos 30 años gracias al desarrollo de los compósitos fibrosos, como el GFRP (polímeros reforzados con fibra de vidrio), y el CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbón). Estos compósitos han encontrado un amplio uso en la industria de la construcción de aeronaves y vehículos terrestres, donde han logrado desplazar cada vez más a los metales.

En la formación de estos sólidos compuestos se produce una mezcla de distintas fases (considerando como fase a una porción de material que es homogénea, distinta físicamente y mecánicamente separable, y donde dicho material presenta una composición química y una estructura dadas). Por ejemplo (1), en los taladros utilizados por los dentistas se presenta una mezcla de pequeños cristales de Carburo de Tungsteno rodeados por una capa de Cobalto. Aquí el Cobalto forma una fase policristalina continua, mientras que el Carburo de Tungsteno forma una fase discontinua. Por lo general, suele llamarse matriz a la fase continua, mientras que a la fase discontinua se le conoce como material de refuerzo. Los compósitos tienen una gran importancia dentro de la ingeniería debido a que presentan varias propiedades atractivas que los colocan aparte de los materiales de una sola fase. Por ejemplo, los taladros de los dentistas mencionados anteriormente tienen buenas características abrasivas (debido a la dureza de las partículas de Carburo de Tungsteno), así como una adecuada tenacidad y resistencia al impacto (debida a la matriz de Cobalto). Ni el Carburo de Tungsteno ni el Cobalto presentan, por separado, resistencia a la abrasión y resistencia al impacto; la adecuada combinación de las dos fases es lo que produce un compósito cuyas propiedades son las deseadas. El concepto de un sólido consistente de una fase continua y una fase (o fases) discontinua (s) conduce a una clasificación simple de los diferentes tipos existentes de compósitos (2):

- a) Compósitos Fibrosos
- b) Compósitos Laminares
- c) Compósitos Particulados

1.1 B) Compósitos Fibrosos

La resistencia mecánica de los materiales aumenta de manera notable si al material se le da forma de fibra fina. Los compósitos fibrosos se basan precisamente en este principio; al material de refuerzo se le da forma de fibra, por lo que se espera un aumento en la resistencia del material.

Una gran cantidad de compósitos fibrosos utilizan como matriz a algún polímero. Los polímeros son poco rígidos (a determinadas temperaturas) y bastante dúctiles. Las cerámicas y los vidrios son, por el contrario, materiales rígidos y fuertes, pero muy frágiles. En los compósitos fibrosos se aprovecha la gran dureza de las cerámicas y se evita que se fracturen repentinamente al darles forma de fibra, con lo que la falla del material se vuelve progresiva. Al mezclar la matriz polimérica con las fibras se obtiene un material mucho más resistente y dúctil; la matriz polimérica, la cual es dúctil, protege a las fibras contra fracturas por lo que el compósito presenta una mayor resistencia.

Si las fibras del compósito son alineadas en la dirección de la carga, entonces la dureza y la rigidez del material son un promedio de las correspondientes a la matriz ya la fibra, multiplicadas por su correspondiente composición en el material. Sin embargo, no todas las propiedades del compósito son una combinación lineal de las correspondientes a cada componente.

El mayor atractivo que presentan los compósitos fibrosos radica en el hecho de que, frecuentemente, se obtiene una ganancia extra en la propiedad final del material. La tenacidad es un ejemplo

(1). En el compósito GFRP las tenacidades de sus componentes son bajas, por lo que se podría esperar que la tenacidad del compósito tenga un valor relativamente bajo. Sin embargo, el valor de la tenacidad del compósito es mucho más grande que el obtenido por la combinación lineal de las tenacidades de cada componente.

Analizaremos más adelante las propiedades (Módulo, densidad, etc.) que deben determinarse para obtener una fibra adecuada.

El hueso y la madera son compósitos fibrosos naturales en animales y plantas. El hueso adquiere su fortaleza de la matriz de fosfato cálcico, de composición y dureza idéntica a la del mineral denominado hidroxapatita (2), y debe su tenacidad a las fibras cortas de colágeno (una proteína). Por la importancia que tiene la madera como integrante de estructuras, resulta un ejemplo ideal para ilustrar una de las propiedades universales de los compósitos fibrosos, la Anisotropía o variación de las propiedades físicas según la dirección en que se midan. Si una pieza de madera de aserradero se carga a la tensión en sentido longitudinal, su resistencia es 10 veces mayor que si la carga se ejerce en dirección radial; en otras palabras, su rigidez elástica muestra una anisotropía similar. La explicación de este comportamiento reside en la naturaleza fibrosa de la madera.

1.1 C) Compósitos Laminares

Cuando se necesita que un objeto aplanado (como una tabla) demuestre buenas propiedades en todas direcciones, debe elegirse a un compósito laminar, constituido por la unión de las capas de los dos materiales que intervengan en la manufactura. Un ejemplo es la madera terciada o laminar (triplay) (2)), integrada por hojas de madera sobrepuestas de modo que la dirección longitudinal de cada una esté en ángulo recto con la de las láminas contiguas, ligadas con un polímero termoestable. El compósito resultante tiene propiedades isotrópicas en el plano de una hoja de madera terciada. Cuando un tejido (de algodón, papel, fibras de vidrio, asbesto, etc.) se usa como lámina individual, una técnica similar de ligado produce los plásticos laminados, que poseen la rigidez de un plástico y la excelente resistencia dada por el refuerzo transmitido por el tejido.

En otros tipos de compósitos laminares se emplea una sola capa del segundo material, con objeto de reforzar alguna propiedad deficiente de la capa matriz, o proporcionar un nuevo efecto, como

en el caso de la tira bimetalica, hecha por dos tiras de metales con distintos coeficientes de dilatación térmica, adosadas y ligadas.

1.1 D) Compósitos Particulados

Los compósitos particulados resultan de mezclar sílice, pedacitos de vidrio, o inclusive arena a un polímero durante el procesamiento. Estos materiales resultan mucho menos eficientes para aumentar la dureza. Además, existe solo una pequeña ganancia en rigidez y tenacidad, comparados con los compósitos fibrosos. Su principal atractivo radica en su bajo costo y en su buena resistencia al desgaste. Un ejemplo típico son las superficies de caminos y carreteras que pueden estar hechas de concreto (un compuesto de grava y arena ligadas con cemento).

1.2) POLIMEROS (RESINAS)

1.2 A) Introducción

Los polímeros son macromoléculas de gran complejidad estructural, no sólo a nivel molecular, sino a nivel secundario (disposición de las moléculas entre sí). Debido a ésto, resulta de gran importancia estudiar si las moléculas se encuentran bien estiradas una al lado de otra, o si se encuentran enrolladas independientemente sobre sí mismas; qué le sucede a un conjunto de moléculas gigantes cuando se calienta, se enfría o se estira, qué fuerzas actúan entre moléculas diferentes, etc. La respuestas a todos estos planteamientos se hallan, en último término, en la estructura del material: la naturaleza de los grupos funcionales y sustituyentes, su secuencia en la molécula y su arreglo espacial.

Los polímeros naturales han sido utilizados por el hombre desde hace miles de años, pero no ha sido sino hasta el presente siglo en que él ha aprendido como sintetizarlos.

Las macromoléculas, tanto naturales como hechas por el hombre, deben su gran tamaño al hecho de que son polímeras (del griego: " muchas partes "); es decir, cada una de ellas está formada por muchísimas unidades más simples -todas idénticas o, al menos, químicamente similares-, unidas entre sí de un modo regular. A este proceso de unión de muchas moléculas pequeñas para dar origen a moléculas muy grandes se le conoce como Polimerización. Los compuestos simples con los que se hacen los polímeros se llaman monómeros. Existen diferentes tipos de polimerización, de acuerdo a la forma en que se unan las moléculas. La polimerización por condensación es aquella en la cual las unidades que se repiten están unidas por medio de enlaces de valencia que resultan de la eliminación de grupos sencillos, tales como HOH, HCl, y NH₃. La polimerización por adición es aquella en la cual las unidades que se repiten están unidas por medio de enlaces de valencia asociados con no saturación; por ejemplo, enlaces dobles o triples. (3)

La polimerización debe contar normalmente con la presencia de una pequeña cantidad de catalizador o iniciador. Entre los más comunes se encuentran los peróxidos, que operan rompiéndose para generar un radical libre e iniciar la reacción en cadena (4). El polímero resultante está formado por enormes cadenas de moléculas las cuales son largas y flexibles, parecidas a espaguetis. Dichas cadenas se encuentran arregladas al azar, por lo que no siguen una

regularidad en su estructura tridimensional. En este caso el polímero es amorfo o no cristalino. En otros polímeros puede presentarse una regularidad en la simetría de sus cadenas, lo cual hace que el polímero presente cristalinidad en ciertas regiones, mientras que otras siguen siendo amorfas. Generalmente, un polímero grande no existe totalmente en forma cristalina, ni aún un polímero cuya regularidad estructural hiciera pensar que sería posible. El problema se encuentra en el tamaño de la molécula. Cuando comienza la solidificación, crece la viscosidad del material, lo que obstaculiza el movimiento de las moléculas polímeras y dificulta que encuentren el arreglo regular necesario para la formación del cristal. Se enredan las cadenas; el cambio de la forma de una cadena debe implicar rotaciones en torno a enlaces simples, obstaculizando por un impedimento a las oscilaciones de grupos colgantes. En consecuencia, los polímeros forman sólidos constituidos por zonas de cristalinidad, llamadas cristalitas, alojados en material amorfo. Hablamos entonces de que existe un grado de cristalinidad en los polímeros, el cual está determinado por la cantidad de cristalitas. (4)

A pesar de que los polímeros son materiales que presentan múltiples aplicaciones, como por ejemplo cuando se les utiliza como sustitutos de otros materiales, sería un error pensar que

pueden reemplazar simplemente a materiales tales como los metales. Dicha sustitución requiere de un rediseño, debido a que los polímeros son menos rígidos, menos fuertes y menos tenaces que la mayoría de los metales. Podríamos entonces pensar en utilizar un material compuesto, es decir, un compósito, el cual presentara mayor rigidez y resistencia. Sin embargo, como ya hemos mencionado, los compósitos son anisotrópicos y, debido a que utilizan una matriz polimérica en este caso, sus propiedades dependen de varios factores como la temperatura. El diseño de materiales con polímeros requiere de un adecuado entendimiento de sus propiedades. Más adelante analizaremos dichas propiedades y su efecto en el comportamiento final del material.

1.2 B) Clasificación de Polímeros

Generalmente se conocen cuatro grupos de polímeros de interés :

(1)

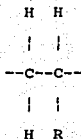
- a) Termoplásticos
- b) Termofijos
- c) Elásticos
- d) Polímeros Naturales

Aunque sus propiedades difieren enormemente, todos los polímeros están formados por moléculas de gran tamaño, como se vio anteriormente. Estas moléculas se encuentran unidas mediante enlaces débiles, ya sea por fuerzas de Van der Waals o por enlaces de Hidrógeno. Pueden presentarse también entrecruzamientos entre las moléculas, lo cual significa un aumento adicional en las fuerzas de enlace. El punto de fusión de los enlaces débiles es bajo, no muy lejos del valor de la temperatura ambiente (en el caso de los polímeros lineales). Los polímeros deben usarse a temperaturas mayores a dicha temperatura de fusión de los enlaces débiles, debido a que se presentan una serie de fenómenos en dicha temperatura, como el "arrastré" (del inglés Creep), y la deformación elástica dependiente del tiempo de carga. Más adelante analizaremos estos fenómenos.

El más común de los polímeros Termoplásticos es el Polietileno. A este tipo de polímeros se les conoce como polímeros lineales; no se presentan entrecruzamientos entre las moléculas. Debido a lo anterior, al calentar el polímero éste tiende a ablandarse; los enlaces secundarios, mediante los cuales se encuentran unidas las moléculas, se funden y el polímero tiende a fluir como un líquido viscoso.

Las moléculas, en los polímeros lineales, presentan un intervalo pesos moleculares, y presentan diferentes estructuras en su arreglo (amorfa o cristalina, como ya vimos). Este intervalo de pesos moleculares y de geometrías significa que los polímeros termoplásticos no tienen un punto de fusión definido, sino que éste cae dentro de dicho intervalo, tal como sucede con los cristales inorgánicos.

En general, la mayoría de los polímeros termoplásticos contienen la siguiente unidad base: (1)

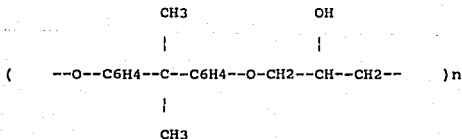


El radical R puede ser simplemente Hidrógeno (como en el polietileno), o -CH₃ (polipropileno), o -Cl (cloruro de polivinilo).

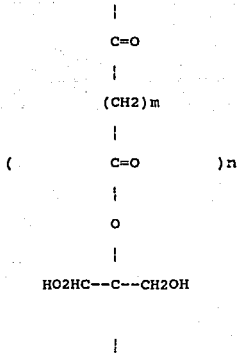
Los polímeros Termofijos, conocidos también como Resinas, resultan de la mezcla de dos componentes (una resina y un endurecedor), los cuales reaccionan y endurecen, ya sea a temperatura ambiente o por calentamiento. El polímero resultante presenta por lo general una gran cantidad de entrecruzamientos, lo cual permite que el polímero tenga una fuerza de unión molecular mayor. Dichos entrecruzamientos se forman durante la polimerización, por lo que la estructura del polímero es casi siempre amorfa. Cuando el polímero es sometido a calentamiento, los enlaces secundarios (Fuerzas de Van der Waals) se funden, y el módulo elástico del polímero disminuye de valor; sin embargo los entrecruzamientos impiden que el polímero se funda y se presente flujo viscoso (como en los polímeros lineales). Al fundirse los

enlaces secundarios, el polímero se convierte en un elastómero, por lo que su comportamiento se rige entonces por el de dichos polímeros, que analizaremos enseguida. Si el polímero se sigue calentando, llega un punto en el que se descompone.

Los polímeros termofijos más comunes son las Resinas epóxicas y las Resinas Poliéster, los cuales son ampliamente usadas como matrices en polímeros reforzados con fibras. Las estructuras generales de ambas son las siguientes: (1)



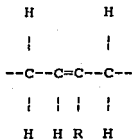
Resina Epóxica



Resina Poliéster

Los Elastómeros, también conocidos como "Hules", son en su mayoría, polímeros lineales con ocasionales entrecruzamientos. A temperatura ambiente, los enlaces secundarios han desaparecido,

por lo que son, precisamente, dichos entrecruzamientos los que mantienen al material unido, sin que se presente flujo viscoso. Los entrecruzamientos permiten además que el material tenga una especie de "memoria" tal que, al someterlo a alguna carga, regrese a su forma original cuando dicha carga sea retirada. Esto permite que el polímero pueda ser deformado en altos porcentajes y sin embargo mantener su forma original. Los elastómeros más comunes presentan la siguiente estructura: (1)



donde R puede ser H, CH₃, o Cl.

Los Polímeros Naturales pueden ser cualquiera de los anteriores tipos de polímeros; la única condición es de que existan en la

naturaleza. Existe una gran cantidad de polímeros naturales: el hule natural, la celulosa, la lignina, los componentes de la madera y paja, así como proteínas (lana y seda). La celulosa es empleada en la fabricación de papel, por ejemplo. De hecho, este tipo de polímeros han sido usados desde hace miles de años por el hombre, y no ha sido sino hasta este siglo, en que el hombre ha conseguido sintetizarlos.

1.2 C) Resina Poliéster

Como vimos anteriormente, las resinas o polímeros termofijos presentan una gran cantidad de enlaces cruzados, formando estructuras tridimensionales, aunque irregulares y rígidas. Una muestra de tal material es esencialmente una sola molécula gigantesca: el calentamiento no la ablanda, puesto que el ablandamiento requiere de la ruptura de enlaces covalentes; el calentamiento, incluso, puede generar enlaces cruzados adicionales, lo que endurece al material aún más (de ahí el nombre de termofijos).

La resina poliéster es fabricada con características diversas y en diferentes presentaciones, es por ello que en ocasiones la

podemos apreciar en un tono amarillo paja, que es el más usual y en otros casos podemos observar que luce tan cristalina como el agua.

Debido a lo anterior, es conveniente seguir en cada caso las recomendaciones del fabricante o distribuidor, pues la forma de preparación de la resina varía con la marca y el tipo de resina.

La resina poliéster es la más versátil y la que mayores aplicaciones tiene de todas las resinas termofijas, pero lo anterior no significa que nos sirva en todos los casos, pues las especificaciones varían conforme a su tipo. A continuación se muestra una tabla que resume los diferentes tipos de resinas poliéster comerciales. (5)

TIPO	CARACTERISTICAS	APLICACIONES
RESINA	GENERALES	MAS FRECUENTES
USO GENERAL (M-70) +	Resina generalmente de color ambarino o amarillo claro, de reactividad media y que ha sido formulada para	Lanchas, case- tas, muebles y artículos decorativos.

el trabajo de moldeo con fibra de vidrio.

RESINA PARA
VACIADOS O
COLADAS (M-30)+

Resina ambarina de baja exo-
termia y contracción mínima,
formulada para vaciados y
coladas de mediano y gran
volumen, con o sin cargas,
como carbonato de calcio,
malaquita, alúmina, etc.

Coladas y
vaciados
artísticos.

RESINA CRISTAL
PARA ENCAPSULA-
DOS O INCLUSIO-
NES (MC-40) +

Resina cristalina de baja
exotermia para encapsulados y
vaciados de pequeño volumen.
Se usa como pigmentos trans-
lúcidos.

Encapsulados
como llaveros,
figuras, pisa-
papeles, etc.

RESINA
FLEXIBLE
(MF-100) +

Resina de color ámbar, de
baja reactividad, que se
combina con la de uso
general a fin de obtener
mayor resistencia y flexi-
bilidad al impacto.

Molduras para
marcos y mue-
bles. Parches
y remiendos de
carrocerías y
lanchas, etc.

Nota: Esta tabla nos muestra únicamente los tipos de resina poliéster que se usan generalmente en encapsulados y recubrimientos, pero aún existe una gran diversidad de poliésteres, como el tixotrópico para la aplicación en superficies verticales; la autoextinguible, para manufacturas sujetas a normas de seguridad; la de alta reactividad, formulada para barniz de madera y la usada en pegamentos, entre otras.

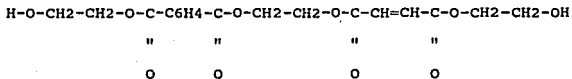
Asimismo, la presentación, además de líquida, puede ser también en polvo o en escamas, como ocurre con algunos tipos especiales de resina utilizadas en procesos industriales y de fundición.

+ Tipo de resina cuyo número de clave corresponde a la clasificación de la Cía. Mexicana de resinas, S.A., lógicamente, esta codificación será diferente en otras marcas, aun cuando el tipo de poliéster corresponda o se asemeje a especificaciones similares.

Polimerización de Resinas

Las resinas polimerizan, como ya se mencionó, en etapas o por condensación. En contraposición con la polimerización por reacción en cadena, ésta no depende de radicales libres que mantienen una reacción en cadena; en cambio, se presentan una serie de etapas esencialmente independientes entre sí.

En la resina poliéster se parte de un compuesto de bajo peso molecular, el cual es obtenido previamente haciendo reaccionar anhídrido ftálico, anhídrido maléico, y un polialcohol, por ejemplo etilén glicol. La molécula que se obtiene es como la siguiente: (6)



donde el grupo reactivo es : --CH=CH--

Esta molécula se mezcla con monómero de estireno, usado como diluyente, el cual tiene la fórmula : $\text{C}_6\text{H}_4\text{-CH=CH}_2$

A esta mezcla final se le conoce como resina poliéster.

A la resina poliéster basta agregarle una sustancia llamada endurecedor o catalizador para que se convierta en una masa compacta y transparente. Al ocurrir la polimerización, la resina, que es un líquido viscoso, se convierte en un compuesto gelatinoso (desprendiendo gran cantidad de calor), hasta llegar a endurecerse y transformarse en un sólido. La reacción de polimerización es irreversible., es decir, el polímero no puede ablandarse con el calor o regresar a su estado líquido inicial. Sin embargo, no en todos los tipos de resinas poliéster el procedimiento se limita

Únicamente a agregarles el catalizador, pues existen algunas muy espesas que requieren de la adición de un diluyente llamado monómero de estireno. Otras, como las de color ambarino requieren, además, de un promotor o acelerador.

A continuación se presentan las características de los compuestos que se utilizan en la polimerización de la resina : (5)

a) El Monómero de Estireno, como ya vimos, se utiliza como diluyente de la resina para reducir la viscosidad de la misma. Es, además, un agente de enlace molecular, es decir, favorece la reacción de polimerización al actuar como agente de enlace entre las moléculas de la resina.

Por lo anterior, es importante que no se confunda al monómero de estireno con otro tipo de solventes o diluyentes - como el thinner y la acetona - pues éstos, en lugar de dar origen al polímero, contribuyen a la degradación del mismo.

La cantidad de monómero que suele agregarse a la resina depende esencialmente de que tan espesa esté ésta (densidad) y de su grado de viscosidad, pero en términos generales se recomienda una concentración de monómero entre un 20 y un 25 % en peso.

Puede utilizarse, además, monómero de metil-metacrilato con lo cual se logra un compuesto resinoso de mayor transparencia. Este

compuesto no debe exceder, en cantidad, a la proporción fijada de monómero de estireno.

El exceso de monómero de estireno en la resina suele producir polímeros muy quebradizos, así como una opacidad mayor en los mismos.

b) El Catalizador o endurecedor es un líquido claro y oleoso, de apariencia turbia. Se agrega a la resina en una proporción entre 1 y 1.5 % en peso. Dicho catalizador tiene la función, como ya vimos, de iniciar la reacción de polimerización.

El tipo de catalizador más comúnmente empleado en la resina poliéster, es el peróxido de metil-etil cetona. (Los peróxidos presentan, en forma genérica, la estructura $R-O-O-R'$).

El catalizador se agrega a la resina en gotas, mezclándolo perfectamente. Al hacer esto el tono del compuesto cambia inmediatamente (previamente debe agregarse el acelerador, con el cual el compuesto adquiere un tono rosado), lo que indica que se ha iniciado la reacción de polimerización, sin embargo, el estado gelatinoso se obtiene hasta que han transcurrido los primeros 10 o 15 minutos, por lo que la resina puede ser vertida en los moldes correspondientes o ser utilizada para la formación de los compósitos.

El exceso de catalizador produce un aumento en la rapidez de la reacción, con gran desarrollo de calor, lo cual puede producir polímeros con grietas o cuarteaduras.

Debe tomarse en cuenta que la temperatura ambiente influye de manera notable en la rapidez de la reacción. Por ejemplo, abajo de los 15 °C la resina prácticamente no reacciona. Por el contrario, cuando la temperatura se eleva, la mezcla polimeriza rápidamente y en breve tiempo solidifica.

c) El Acelerador o promotor es un líquido ligeramente denso y de color rojizo o violeta oscuro, el cual se agrega en gotas a la resina antes de agregar el catalizador. A la resina con acelerador se le conoce como "resina preparada".

El acelerador controla la reacción de polimerización, a temperatura ambiente, de tal forma que puede aumentar o disminuir el tiempo de reacción, de acuerdo a la cantidad que se haya agregado. En el caso de la resina poliéster, la cantidad de acelerador no debe exceder el 1 % para conseguir un polímero transparente. Con esto se alarga el tiempo de gelado por la mínima cantidad de acelerador, pero se reduce la posibilidad de producir un tinte rojizo o coloración dentro de la masa cristalina.

El acelerador debe mezclarse perfectamente con la resina y con anticipación al empleo de ésta. Nunca debe agregarse simultáneamente con el catalizador, debido a que ambos productos forman una mezcla explosiva, sino que deben combinarse en el seno de la mezcla.

Los aceleradores más comúnmente empleados con la resina poliéster, son el Naftenato de Cobalto y el Octoato de Cobalto.

(5)

El exceso de acelerador produce un aumento en el tiempo de endurecimiento, al igual que una mayor generación de calor, lo que genera una contracción de la resina. Como resultado, se forman grietas en el polímero.

Por todo lo anterior, es importante que se ajuste la dosificación de acelerador y catalizador conforme a los porcentajes recomendados.

En las figuras siguientes se muestran algunas de las recomendaciones necesarias para el uso adecuado de las resinas:

(5)

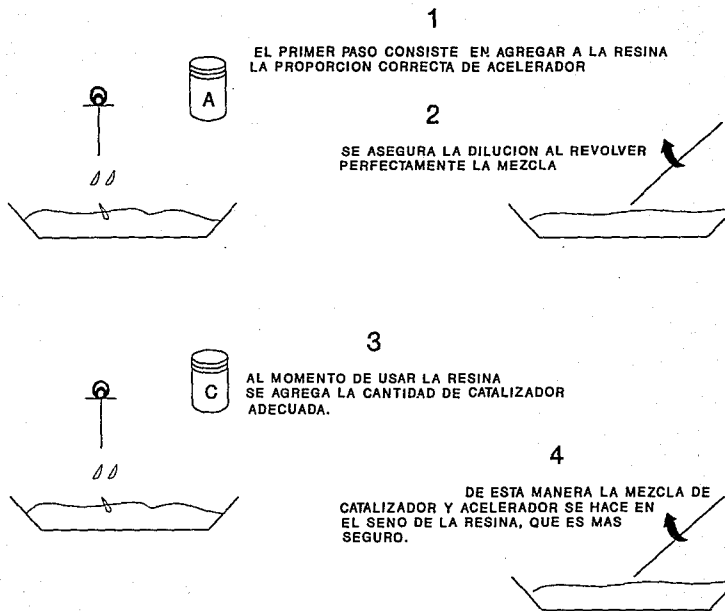
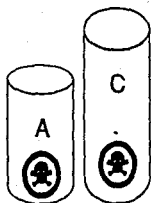
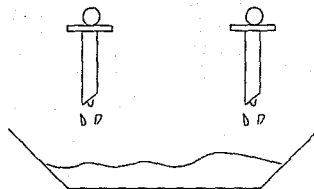


FIG. 1.2.1 COMO AGREGAR LOS ADITIVOS



**NO! ALMACENAR JUNTOS
EL CATALIZADOR Y ACELERADOR**



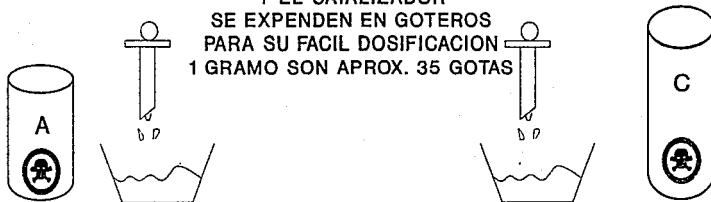
**NUNCA MEZCLARLOS
SIMULTANEAMENTE**



YA QUE PUEDEN EXPLOTAR

FIG. 1.2.2 CUIDADOS EN MANEJO DE ADITIVOS*

**EL ACELERADOR
Y EL CATALIZADOR
SE EXPENDEN EN GOTEROS
PARA SU FACIL DOSIFICACION
1 GRAMO SON APROX. 35 GOTAS**



**NO EXPONER AL SOL A EL CATALIZADOR
NI AL ACELERADOR , O A TEMPERATURAS
MAYORES DE TREINTA GRADOS C**

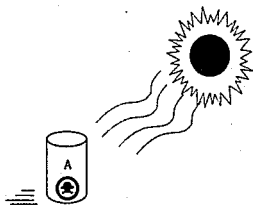


FIG. 1.2.3 CUIDADOS CON ADITIVOS

1.3 FIBRAS NATURALES

Las fibras naturales presentan una riqueza desaprovechada en nuestro país, que cuenta con una variedad envidiable de plantas que producen fibras con potencial en diversas aplicaciones industriales.

Hay dos grandes zonas de producción importantes:

- 1) La zona norte.- Que abarca los estados de San Luis Potosí, Coahuila, Tamaulipas y Nuevo León.
- 2) La zona henequera.- Localizada al sur del país, principalmente en Yucatán que cuenta con 200 mil hectáreas.

En menor aportación tenemos también a los estados de Hidalgo, Querétaro, Durango, Aguascalientes, Sonora y Baja California.

A lo largo de toda esta franja, que se puede observar en la figura 1.3.1, es posible encontrar un número de más de 30 especies distintas de fibras que son explotadas o potencialmente explotables por la industria ixtlera. Las principales fibras de todo este grupo son las siguientes (7) :

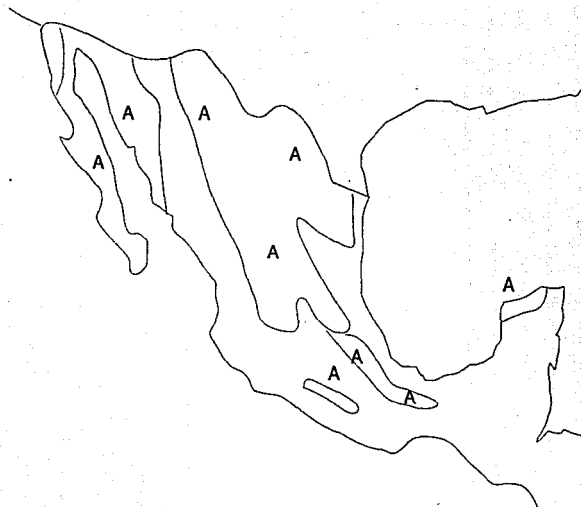


FIG. 1.3.1 PRINCIPALES ZONAS DE PRODUCCION DE FIBRAS NAT.

Especie	Nombre común
1.- OPUNTIA STREPTACANTHA	nopal cardón
2.- AGAVE LECHUGUILLA	lechuguilla
3.- YUCCA FILIFERA	ixtle
4.- HESPERALOE FUNIFERA	samandoca
5.- CALIBANUS HOOKERII	sacamecate
6.- EUPHORBIA ANTISYPHILITICA	candelilla
7.- DASYRILION CEDROSANUM	sotol
8.- FOUQUIERIA SPLENDENS	ocotillo
9.- ACACIA FARNESIANA	huizache
10.- LARREA TRIDENTATA	falsa alcaparra.

Las fibras comerciales se clasifican también en (8):

Duras .- Las fibras duras tienen un alto contenido de lignina en sus paredes y tienen una textura rígida.

Blandas .- Las fibras blandas pueden o no tener lignina son muy flexibles y elásticas.

Además también es importante la clasificación de fibras por el uso al que están destinadas:

1) Fibras textiles.- Que se usan en la manufactura de hilados.

2) Fibras utilizadas en cordelería.

3) Fibras para cepillos de diferentes clases.

4) Fibras para relleno, colchonería o tapicería.

Desde un punto de vista tecnológico, tiene importancia en la industria, la forma de la fibra, su longitud y la estructura de su pared, se presta especial atención a la longitud de la fibra, al grado de recubrimiento entre fibras vecinas y a como están unidas unas con otras. La elasticidad y la conductividad calorífica aumentan cuando el grado de orientación es paralelo a la longitud de la fibra.

Trabajos previos (9) demuestran que al someter a ensayo mecánico de tensión uniaxial a las principales fibras, la que mayor resistencia presentó fue la fibra de samandoca, por tanto es la que usó en el presente trabajo.

FIBRA SAMANDOCA

Su nombre científico es HESPERALOE FUNIFERA TRELEASE y pertenece a la familia de las liliáceas. Su nombre común es samandoca y crece espontáneamente en los llanos arenosos del norte del país (fig 1.3.2), Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas principalmente.

La planta es diferente a la mayoría de las yucas, sus pencas miden de 1.5 a 2 metros de largo por 6 a 8 centímetros de ancho, crecen más o menos erguidas y diseminadas por los rizomas rastreros de la planta en forma separada, o bien en grupos de 2 ó 3, habita principalmente en suelos someros y cálidos arcillosos.

•-DISTRIBUCION DE
PRODUCCION DE
FIBRA SAMANDOCA

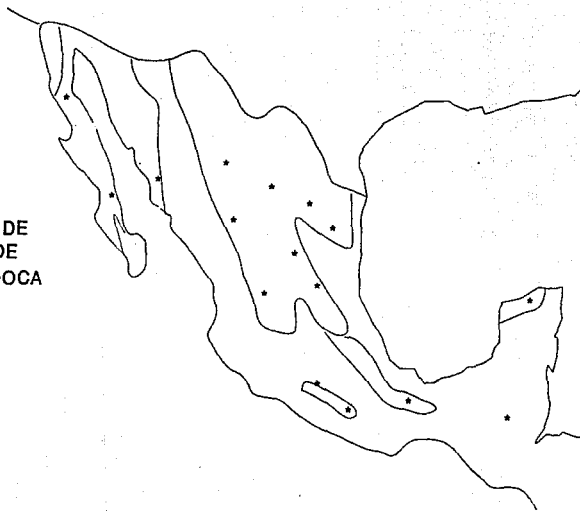


FIG. 1.3.2 DISTRIBUCION DE SAMANDOCA

Su fibra es de color amarillo pálido, de diámetro pequeño pero más o menos uniforme, su superficie es rasposa al tacto ,con muy pocas ramificaciones a lo largo, es bastante flexible y resistente.

La composición estructural de la palma samandoca es la siguiente: (determinada por métodos TAPPI) (9):

Extractos	17.7 %
Lignina	16.7 %
Celulosa	62.51 %
Pentosanas	3.62 %

Solamente presentamos las sustancias representativas en la composición estructural.

2) BASES TEORICAS

2.1) Tipos de Materiales y sus Propiedades.

La selección de un material, para propósitos ingenieriles (construcción, reforzamiento, etc.) requiere de un estricto análisis de sus propiedades, debido a que, en un momento dado, existe una gama muy amplia de materiales a disposición. El material (o combinación de materiales) que se elija, debe combinar adecuadamente sus propiedades, de tal forma que resista en lo posible, todos los factores a los que será sometido. Por ejemplo, el material usado en los aislantes de electrodos, una cerámica, posee una excelente propiedad de aislamiento eléctrico, así como una buena resistencia a la fatiga térmica, a la corrosión y a la oxidación. Por lo tanto, deben conocerse, antes de la elección del material, cuáles son exactamente los factores que afectarán al material en su uso, de tal forma de poder elegir un material con las propiedades adecuadas. La tabla 2.1.1 (11) muestra los diferentes tipos de propiedades a considerar en un material.

Existen diversos criterios para clasificar a los diferentes tipos de materiales: de acuerdo a sus propiedades físicas y/o químicas, a su abundancia en la naturaleza, a su comportamiento

mecánico, a su uso, etc. Los materiales, en ingeniería, generalmente se clasifican como se presenta en la tabla 2.1.2.

(11)

Una vez que se han detallado las propiedades físicas y mecánicas de los materiales disponibles, debe realizarse un estudio económico (precio y disponibilidad), que permita saber que tan factible es su uso.

TABLA 2.1.1

Tipos de Propiedades

- a) Propiedades Económicas.- Precio y disponibilidad.
- b) Propiedades Mecánicas.- Densidad, módulo elástico, humedad, esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo a la tensión, dureza, tenacidad, esfuerzo de fractura, resistencia a la fatiga térmica, esfuerzo de arrastre.
- c) Propiedades no mecánicas.- Propiedades térmicas, ópticas, magnéticas, eléctricas.
- d) Propiedades de superficie.- Oxidación y corrosión, fricción, abrasión y desgaste.
- e) Propiedades de producción.- Facilidad en la manufactura, fabricación, unión, terminado.
- f) Propiedades estéticas.- Apariencia, textura.

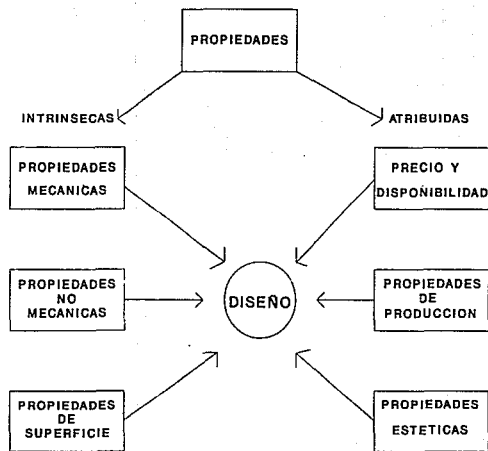


FIG. 2.1.1 EFECTO DE LAS PROPIEDADES DE MATERIALES EN EL CAMINO DE SU DISEÑO

TABLA 2.1.2

Tipos de Materiales

a) Metales y Aleaciones.- Fierro y aceros, aluminio y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, níquel y sus aleaciones, titanio y sus aleaciones.

b) Polímeros.- Polietileno (PE), Polimetilmetacrilato (PMMA), nylon, poliestireno (PS), poliuretano (PU), cloruro de polivinilo (PVC), hules, resinas.

c) Cerámicos y vidrios.- Alúmina (Al_2O_3), magnesia (MgO), sílice (SiO_2), carburo de silicio (SiC), cemento y concreto.

d) Compósitos.- Madera, fibra de vidrio (GFRP), polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), polímeros con cargas.

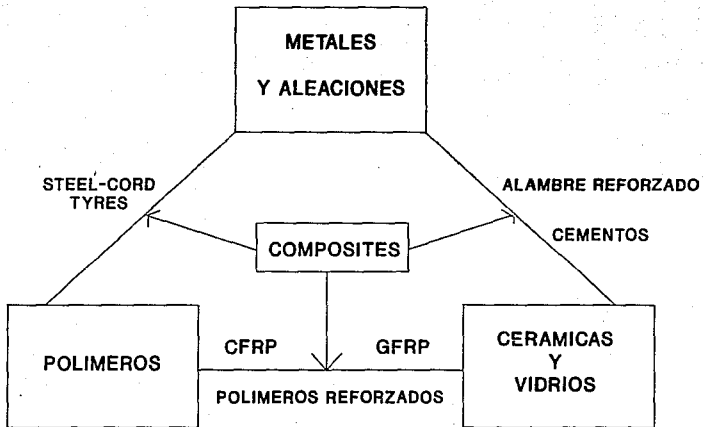


FIG. 2.1.2 TIPOS DE MATERIALES Y SUS INTERRELACIONES.

2.2) Propiedades Mecánicas de materiales

Analizaremos a continuación un ejemplo que ilustre las propiedades mecánicas de un material: (11) un destornillador común tiene una varilla central cuya punta termina en forma de hoja. Tanto la varilla como la hoja están hechas de acero al carbón, un metal, debido a que éste presenta un módulo elevado. El módulo mide la resistencia del material a la deflexión elástica o a doblarse. Si la varilla estuviera hecha de algún polímero, como el polietileno, podría doblarse fácilmente. El módulo es una propiedad que sirve como criterio en la selección de un material para esta aplicación, pero no es la única. La varilla debe tener un esfuerzo de cedencia elevado, ya que si no, se deformaría permanentemente (plásticamente) al darle vueltas cuando se aprieta un tornillo (los malos destornilladores se deforman debido a esta causa). La hoja del destornillador debe tener una gran dureza, de otra forma será mellada o perforada por el material del que está hecha la cabeza del tornillo. Finalmente, el material, tanto de la varilla como el de la hoja, debe ser resistente a la fractura. El vidrio, por ejemplo, tiene un módulo, un esfuerzo de cedencia y una dureza elevados, pero es demasiado frágil, por lo que se fractura con facilidad. Lo anterior es debido a que su tenacidad es baja. En el acero, la tenacidad es alta, por lo que tiende a doblarse en vez de fracturarse.

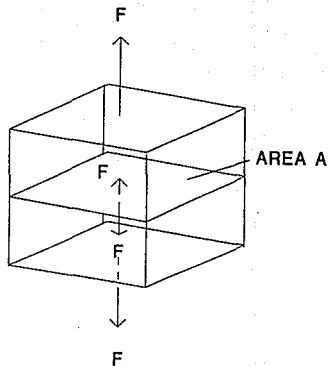
El mango del destornillador está hecho de algún polímero o plástico, como el polimetilmetacrilato (PMMA). Debido a que presenta una sección más grande que la varilla, no necesita de una gran resistencia (módulo elevado) a la fuerza de giro. Además, existen otras propiedades que lo hacen adecuado para esta función: su fabricación es sencilla, se moldea fácilmente, y su costo es bajo.

Este ejemplo nos ilustra claramente la necesidad de tener un material con una adecuada combinación de sus propiedades, tal que resista lo mejor posible los factores a los que será sometido.

A continuación analizaremos con más detalle las propiedades anteriores.

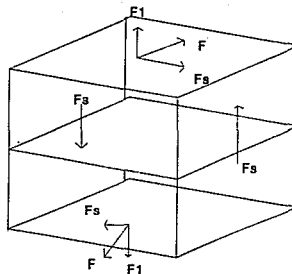
2.2 A) Módulo elástico

El módulo mide la resistencia de un material a deformarse elásticamente. Un material con un módulo bajo sufrirá grandes deflexiones si se le somete a alguna carga, lo cual es deseable en artículos tales como resortes, cojines, etc. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones mecánicas en ingeniería, requieren de materiales con módulos elevados.



ESFUERZO DE TENSION

$$T = F/A$$



ESFUERZO DE CORTE $T = F_s/A$
 ESFUERZO DE TENSION $T = F_1/A$

FIGS. 2.2.1 Y 2.2.2 DEFINICION DE ESFUERZO

El módulo es característico de cada material, por lo que debe determinarse con la mayor exactitud posible en materiales de reciente descubrimiento. Además, es también un reflejo de la frecuencia natural de vibración de una estructura (11). Un material con un módulo bajo presenta una frecuencia natural menor que uno cuyo módulo sea alto.

Antes de seguir analizando el módulo elástico, es importante definir los siguientes conceptos: (11)

Esfuerzo

El esfuerzo se define como la fuerza que se aplica sobre una determinada sección de área. Por ejemplo, al aplicar una fuerza F perpendicularmente a una de las caras de un bloque cúbico, ésta se transmite a través del bloque y es balanceada por una fuerza de igual magnitud pero en sentido contrario (si no fuera así, el bloque se movería). Se dice entonces que el bloque se encuentra en un estado de esfuerzo. La intensidad de dicho esfuerzo se calcula dividiendo la fuerza aplicada entre el área, en este caso una de las caras del bloque:

$$\sigma = F/A$$

En este caso particular, el esfuerzo generado es de tensión, y se muestra esquemáticamente en la figura 2.2.1. (11)

Generalmente se consideran cuatro los estados de esfuerzo existentes: (11)

a) Tensión o compresión simple, dependiendo del sentido en que se aplique la fuerza. Como ya vimos, este tipo de esfuerzo se genera al aplicar una fuerza perpendicular y en ángulo recto, a la cara de un cuerpo. Si el cuerpo es jalado, el estado generado es de tensión. Si es empujado, es de compresión.

b) Tensión biaxial. Un cuerpo esférico sometido a presión interna presenta, en su capa externa, un esfuerzo en dos direcciones.

c) Presión hidrostática. Ocurre en las profundidades del mar, donde un cuerpo es sometido a compresión por todos sus lados.

d) Cortante, cuando la fuerza aplicada es paralela al área.

En la figura 2.2.3 (11) se muestran los diferentes tipos de esfuerzos mencionados.

Lógicamente, un cuerpo puede estar sometido, al mismo tiempo, a una combinación de diferentes tipos de esfuerzos. Por ejemplo, cuando una fuerza actúa en ángulo sobre una de las caras, dicha fuerza puede descomponerse en una componente paralela y otra normal a la superficie. La componente normal causa un esfuerzo de tensión, mientras que la paralela, uno de esfuerzo cortante.

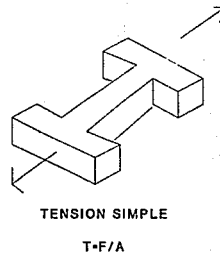
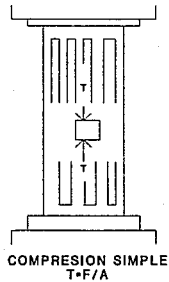
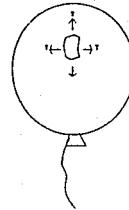
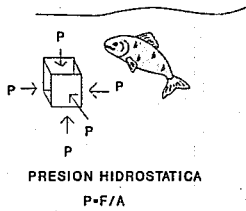


FIG. 2.2.3 ESFUERZOS COMUNES

Esto se ilustra en la figura 2.2.2. (11)

La unidad normal del esfuerzo es el megapascal (MPa). Un MPa equivale a $1E6 \text{ Nw/m}^2$ ($1E6 \text{ Pa}$).

Deformación

Los materiales responden al esfuerzo deformándose. Un material rígido, como el acero, se deforma muy poco al ser sometido a un esfuerzo determinado. Por el contrario, un material blando, como el polietileno, se deforma mucho más. El módulo elástico es la propiedad que nos describe que tan rígido es un material, entendiéndose por rigidez a la resistencia que ofrece un cuerpo a cambiar su forma.

De acuerdo al tipo de esfuerzo que se aplique es la deformación que se presenta. Por ejemplo, un esfuerzo de tensión genera una deformación por tensión. Si un cubo de lado l se deforma, al aplicársele un esfuerzo σ , una cantidad μ paralela al esfuerzo de tensión, se define como deformación nominal por tensión como:

$$\epsilon = \mu/l$$

Cuando la deformación ocurre de esta manera, el cubo se adelgaza en la dirección perpendicular a donde se aplica el esfuerzo. La relación entre la cantidad deformada en la dirección del esfuerzo

y la correspondiente a la dirección perpendicular del mismo, se define como relación de Poisson (ν) :

$$\text{deformación lateral} = - \nu \text{ deformación por tensión}$$

En la figura 2.2.4 (11) se muestran los diferentes tipos de deformación, de acuerdo al esfuerzo aplicado.

La deformación es adimensional, debido a que relaciona dos magnitudes iguales en dimensión.

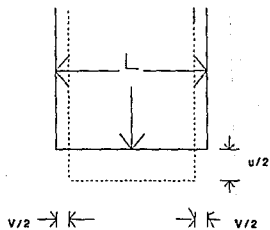
Ley de Hooke

La ley de Hooke establece que, a deformaciones pequeñas, la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

donde E, la constante de proporcionalidad, es llamada Módulo de Young. Aunque la relación anterior es aplicada a tensión, se tienen relaciones similares para los otros tipos de esfuerzo.

El módulo es de hecho la pendiente de la línea recta que se forma en una gráfica de esfuerzo contra deformación. Esta condición de linealidad ocurre a deformaciones muy pequeñas (alrededor de 0.001), después de lo cual el comportamiento deja de

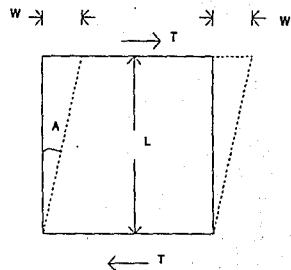


DEFORMACION NOMINAL LATERAL

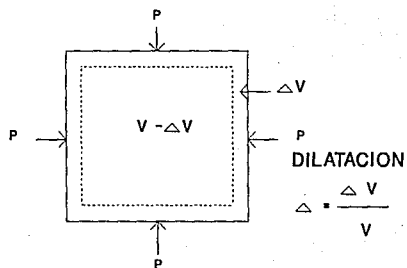
$$E_n = V/L$$

RELACION DE POISSON

$$V = \frac{\text{DEFORMACION LATERAL}}{\text{DEFORMACION POR TENSION}}$$



DEFORMACION INGENIERIL DE CORTE
 $\gamma = w/L \cdot \tan A$



DILATAcion

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V}$$

FIG. 2.2.4 DEFINICION DE DEFORMACION

ser elástico y se convierte en comportamiento plástico, es decir, la deformación en el material se vuelve permanente. En el caso de algunos sólidos, como los hules, el comportamiento elástico se extiende a deformaciones mucho más grandes (alrededor de 4 o 5); sin embargo, dicho comportamiento ya no es lineal después de una deformación de aproximadamente 0.01.

Una manera muy simple de calcular el módulo de Young para un material, es someter a éste a un esfuerzo determinado y medir la deformación producida. El módulo será entonces el resultado de dividir el esfuerzo entre la deformación. Sin embargo, esta forma de obtener el módulo es muy inexacta, debido a que, si el módulo es muy grande, la deformación será muy pequeña y, por lo tanto, difícil de cuantificar con precisión.

Existen otros métodos mucho más confiables, como el medir la frecuencia natural de vibración del material, al cual se le da forma de varilla y se le soporta en los extremos. Se coloca en la mitad de la varilla una carga pesada de masa M. Como la frecuencia de oscilación de una varilla (f) está dada por: (11)

$$f = (1/2\pi) (3\pi E d^4 / (4l^3 M))^{1/2}$$

de donde : $E = (16\pi M l^3 f^2 / (3 d^4))$

Otro método consiste en medir la velocidad del sonido en el material, debido a que la velocidad de las ondas longitudinales depende del módulo de Young. (11)

El módulo de Young tiene las mismas unidades que el esfuerzo, que, como ya vimos, pueden ser MPa.

La figura 2.2.5 (11) muestra los valores de los módulos de los distintos tipos de materiales. Recordemos que entre más rígido es un material, su módulo es mayor, y mientras más blando sea, su módulo disminuye. Por ejemplo, el diamante presenta el módulo más grande en la tabla (alrededor de 10 GPa), mientras que los polímeros y los hules se encuentran al fondo de la tabla, con módulos tan bajos como 10 GPa.

La explicación de porqué algunos materiales son más rígidos que otros (su módulo es mayor), se encuentra en la estructura del material, y en la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidos a sus átomos, es decir, finalmente tenemos que analizar al material desde su nivel atómico.

Como sabemos, existen dos tipos de fuerzas mediante las cuales se mantienen unidos los átomos: los enlaces primarios (iónico, covalente, metálico), los cuales son relativamente fuertes, y los enlaces secundarios (fuerzas de Van der Waals y puentes de Hidrógeno), los cuales son relativamente débiles. Los átomos en

las cerámicas y en los metales están unidos mediante enlaces primarios; es por ello que presentan un módulo elevado. Por su parte, las moléculas poliméricas se encuentran unidas mediante fuerzas de Van der Waals, lo cual mantiene al material como sólido, aunque su módulo es bajo debido a que son enlaces débiles.

Respecto a la estructura interna del material, casi todos los metales y cerámicas están formados por pequeños cristales en los cuales los átomos están arreglados en forma regular y continua. Los polímeros, a diferencia de los anteriores, presentan por lo general una estructura amorfa, aunque puede existir cierto grado de cristalinidad en la macromolécula. Analizaremos más adelante la estructura de los polímeros con más detalle, pues es la que nos interesa.

2.2 B) Esfuerzo de cedencia

Los materiales sólidos presentan, en su comportamiento mecánico, un límite elástico. Antes de este límite el material se comporta de acuerdo a la ley de Hooke, y la gráfica de esfuerzo contra deformación muestra una línea recta de pendiente E . Como ya vimos, en esta zona el material puede regresar a su forma original al retirar la carga aplicada. Después del límite elástico, pueden ocurrir dos cosas : o se rompe el material o se comporta plásticamente. En materiales muy frágiles como el vidrio y el

cemento, se presenta la fractura, ya sea inmediata o progresivamente. En el caso de materiales que se deforman plásticamente, éstos presentarán deformaciones permanentes.

Al esfuerzo que corresponde al límite elástico se le conoce como Esfuerzo de cedencia. Dicho esfuerzo resulta de vital importancia en el diseño de estructuras tales como vigas, puentes, etc.

En la figura 2.2.6 (11) se muestra una gráfica esfuerzo-deformación de un material que presenta un comportamiento de acuerdo a la ley de Hooke, es decir, un comportamiento lineal. La mayoría de los sólidos presentan dicho comportamiento a valores muy pequeños de deformación (alrededor del 0.1%). Como ya vimos, la pendiente de la línea recta es el módulo elástico E. El área bajo la curva corresponde a la energía elástica almacenada por unidad de volumen (U): (11)

$$\text{Area} = U = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon.$$

Puede darse el caso de que el material se siga comportando elásticamente aunque la ley de Hooke ya no se cumpla, es decir, el material presenta un comportamiento elástico no lineal. En la

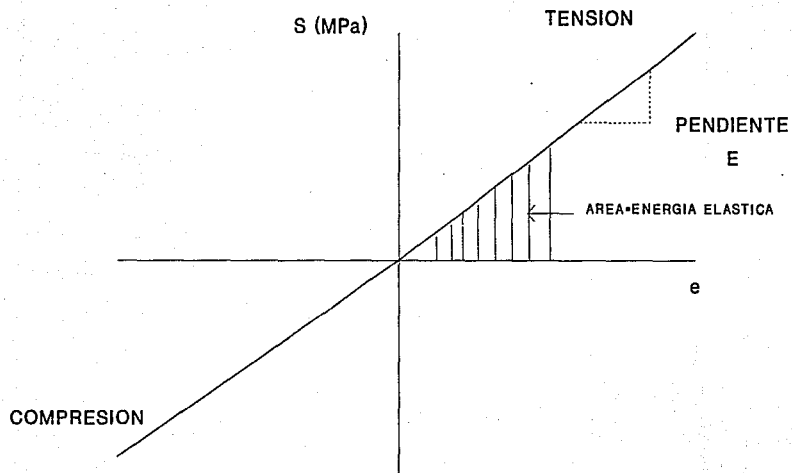


FIG. 2.2.6 COMPORTAMIENTO LINEAL DE UN SOLIDO ELASTICO

figura 2.2.7 (11) se muestra precisamente este comportamiento. Un ejemplo típico de estos materiales son los hules, los cuales pueden deformarse elásticamente en grandes porcentajes. En este caso, el valor del módulo de Young se considera como el que corresponde al principio de la curva, es decir, a deformaciones pequeñas, donde se supone que existe comportamiento lineal.

2.2 C) Resistencia mecánica a la tensión

Una vez que se ha excedido el límite elástico del material, éste puede fracturarse o deformarse plásticamente (a menos que sea un hule). En el segundo caso el material cambia su forma permanentemente, aunque el volumen se conserva. El comportamiento plástico del material se manifiesta, gráficamente, como no lineal. Eventualmente, el material se vuelve inestable y alcanza un valor máximo en la gráfica esfuerzo-deformación. A este valor se le conoce como Resistencia máxima a la tensión. En este punto, el material presenta un " encuellamiento " en su forma. Dicho " cuello de botella " aumenta rápidamente, lo que provoca que la carga aplicada disminuya al aumentar la deformación. El comportamiento anterior permanece hasta la fractura del material (la cual se presenta en medio, en el cuello de botella). Las dos piezas producidas por el rompimiento presentan una longitud total ligeramente menor a la longitud correspondiente al momento exacto

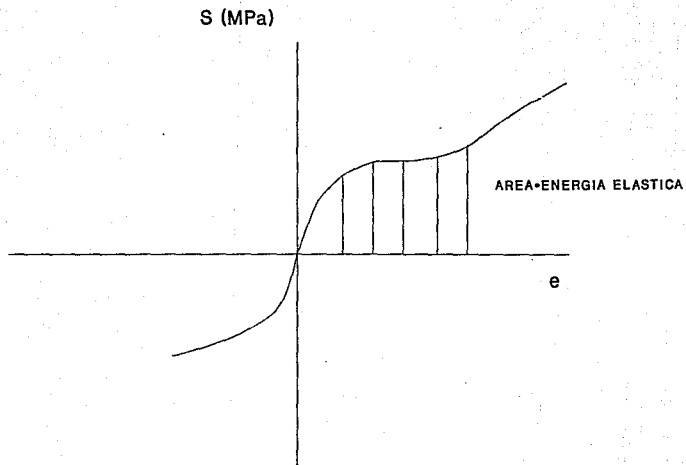


FIG. 2.27 COMPORTAMIENTO NO LINEAL DE UN SOLIDO ELASTICO

de la ruptura, debido a que, poco antes de la ruptura, el material sigue estirándose. Lo anterior puede observarse en la gráfica 2.2.8. (11)

En el caso de que el material sea sometido a compresión, la curva resultante es simplemente el reverso de la curva correspondiente a tensión, a deformaciones pequeñas, aunque a deformaciones mayores difieren notablemente.

2.2 D) Dureza

Se entiende por dureza la resistencia que un material presenta a ser perforado o mellado. Existe una prueba, conocida como " prueba de dureza ", la cual consiste en someter al material a un " perforador " que se inserta en él. Entonces se hace funcionar al perforador, el cual se mueve dentro de la hendidura. Se define como dureza real al cociente entre la carga aplicada (F) y el área A' proyectada de la hendidura (luego de retirar el perforador) : (11) $H = F/A$

De la relación anterior podemos hallar el valor del esfuerzo de cedencia (σ_y): $H = 3\sigma_y$

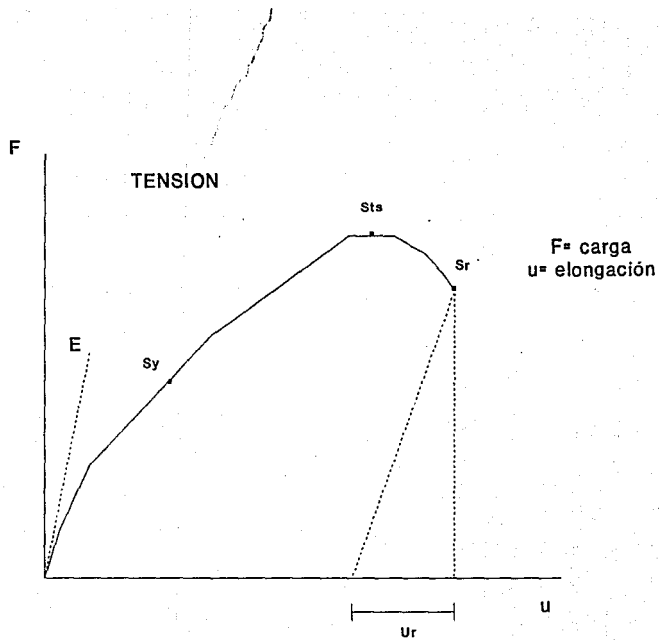


FIG 2.2.8 CURVA CARGA-ELONGACION PARA UN MATERIAL DUCTIL

2.2 E) Ductilidad

Un material dúctil es aquél que admite grandes deformaciones mecánicas en frío sin llegar a romperse. La ductilidad depende de la resistencia del material a la tensión. Desde luego existe un grado de ductilidad en cada material, el cual puede calcularse de la siguiente forma : (11)

$$\%D = ((l-l_0)/l_0) * 100$$

donde l_0 corresponde a la longitud inicial de la muestra sometida a la prueba de tensión, y l a la longitud de la muestra al terminar la prueba. En materiales frágiles el porcentaje de ductilidad es muy bajo. De hecho, este porcentaje nos sirve para determinar si un material es frágil o dúctil. Generalmente se considera dúctil al material si el porcentaje es mayor al 10%.
(12)

2.2 F) Gráfica Esfuerzo-Deformación

Los datos generados en una prueba de tensión (carga aplicada a la muestra y su consecuente elongación) deben transformarse a valores de esfuerzo y deformación, los cuales fueron definidos

con anterioridad, y entonces graficarse. Existen dos tipos de gráficas esfuerzo-deformación, dependiendo del área transversal y la longitud de la muestra que se tomen. Cuando dichos valores corresponden al área y longitud iniciales de la muestra (A_0 y l_0), al esfuerzo y deformación obtenidos se les denomina ingenieriles o de ingeniería. Es decir, el esfuerzo (σ_i) y la deformación (ϵ_i) ingenieriles se definen como : (12)

$$\sigma_i = F/A_0$$

$$\epsilon_i = (l - l_0)/l_0$$

donde F es la carga aplicada en Newtons y l es la longitud puntual de la muestra.

Durante la deformación elástica, se produce solamente un cambio ligero en el volumen de la muestra; durante la deformación plástica, sin embargo, el volumen se mantiene constante. Lo anterior puede establecerse, matemáticamente, como sigue : (12)

$$A_0 \cdot l_0 = A_i \cdot l_i = \text{constante}$$

Cuando la muestra se estira, su área transversal disminuye. Durante la deformación elástica esta disminución es despreciable, pero durante la deformación plástica sí es de considerarse. Por esta razón, se prefiere redefinir los conceptos de esfuerzo y deformación, surgiendo así las definiciones de esfuerzo y deformación reales, aplicables en la zona plástica.

El esfuerzo real se define como la relación entre la carga y el área instantánea de la muestra : $\sigma = P/A_i$.

La deformación real se define como la integral de la relación entre un cambio diferencial en la longitud de la muestra y la longitud instantánea de la misma. La deformación real producida en una muestra de longitud inicial l_0 y longitud instantánea o puntual l_i , se calcula mediante la integración de la relación anterior : $\epsilon_r = \ln (l_i/l_0)$ (12)

Las diferencias entre ambas gráficas son las siguientes : el esfuerzo real no alcanza un valor máximo, en el punto de máxima resistencia α la tensión, como en el caso del esfuerzo ingenieril, sino que sigue aumentando respecto a la deformación y alcanza un máximo en el punto de ruptura. Las gráficas son muy parecidas en el inicio, es decir, en la zona elástica, aunque poco a poco van separándose conforme aumenta la deformación.

Al aplicar las relaciones anteriores a los datos de una prueba de compresión, la gráfica resultante difiere notablemente de la correspondiente a la prueba de tensión (ésto resulta incongruente, pues si es el mismo material, las gráficas deberían ser iguales pero orientadas en diferentes cuadrantes).

2.3) Prueba de Tensión

El ensayo o prueba de tensión muestra el comportamiento elástico y/o plástico de un material. Los equipos utilizados para tal fin son estándares. Las dimensiones de las muestras del material problema también siguen un estándar.

Una vez que la muestra ha sido sometida a la prueba, el equipo nos proporciona, como resultado de la misma, una gráfica de carga aplicada (en Nw , por ejemplo) contra elongación producida (en mm , por ejemplo). Los puntos de esta gráfica son convertidos a esfuerzo y deformación ingenieriles mediante las siguientes relaciones:

$$\sigma_i = F/A_0$$

$$\epsilon_i = (l - l_0)/l_0$$

donde F es la carga aplicada (en Nw), A_0 la sección transversal de la muestra al inicio de la prueba, l_0 la longitud de la muestra al inicio de la prueba, y l la longitud puntual de la muestra. Debido a que A_0 y l_0 son constantes, la gráfica esfuerzo-deformación resultante será idéntica a la gráfica carga-elongación, sin embargo ahora está estandarizada, por lo que se pueden comparar las diferentes muestras, sin importar sus dimensiones. En este tipo de gráfica puede observarse claramente la formación del mencionado "cuello de botella" que se forma en el material, y que se refleja al alcanzar la curva un máximo, mientras que si usamos los valores de esfuerzo y deformación reales, la gráfica resultante será muy parecida a la anterior sólo a deformaciones pequeñas, y al ir aumentando la deformación el esfuerzo tiende a seguir aumentando, por lo que nunca alcanza un máximo.

Los datos que podemos obtener de una gráfica esfuerzo-deformación son los siguientes : (11)

- Esfuerzo de cedencia (σ_y), que corresponde al punto donde termina la zona lineal (ley de Hooke) o elástica y comienza la plástica. Se manifiesta por un cambio brusco en la pendiente de la curva. Sin embargo, hay materiales que no tienen un punto de cedencia definido, pues ceden progresivamente y no instantáneamente. En este caso se toma como deformación permanente al valor de 0.1% , y se traza una línea paralela a la región lineal (elástica) de la curva. El punto donde dicha línea corte a la

curva se considera como el punto de cedencia.

- Módulo elástico (E), que corresponde a la pendiente de la zona lineal de la curva. Puede calcularse realizando una regresión lineal de los puntos anteriores al punto de cedencia.

- Esfuerzo de tensión (σ_{ts}), el cual corresponde al punto máximo de la curva.

- Punto de fractura, el cual corresponde al punto final de la curva, que es donde ha ocurrido la falla del material.

- Ductilidad, que se calcula como : $(l_f - l_0)/l_0$, donde l_f corresponde a la longitud de la muestra después de la fractura.

Lo anterior puede observarse en la figura 2.3.1 (11)

El comportamiento a la prueba de tensión es característico de cada material, por lo que podemos clasificar a los materiales, de acuerdo a su gráfica esfuerzo-deformación, en: (13)

- Frágiles, en los cuales el esfuerzo de tensión y el de ruptura son el mismo.

- Dúctiles, en los cuales se presenta una zona de fluencia o estiramiento en frío.

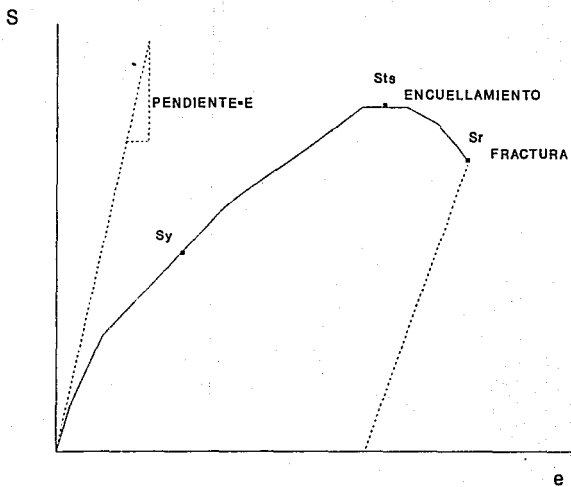
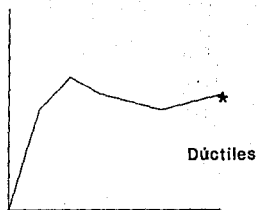


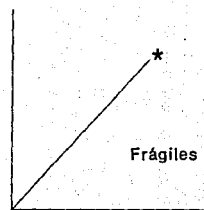
FIG. 2.3.1 CURVA ESFUERZO-DEFORMACION

- Elastómeros, los cuales presentan un comportamiento elástico no lineal.

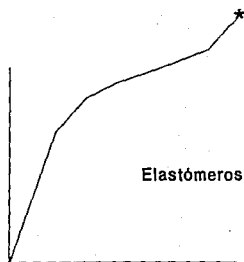
Esta clasificación puede observarse en la figura 2.3.2 (13)



Dúctiles



Frágiles



Elastómeros

Fig. 2.3.2 Tipos de materiales

2.4 PRUEBA DE DENSIDAD

Recordemos que la densidad, es la cantidad de masa por unidad de volumen. El valor de la cantidad de masa, es relativamente fácil obtenerlo, con la ayuda de una balanza analítica se obtienen datos con bastante exactitud.

El problema principal en esta prueba es la obtención de volúmenes de muestras, que aunque tienen una forma bastante regular en sus dimensiones, es bastante difícil obtener un valor lo suficientemente confiable de volumen por métodos ordinarios, como por ejemplo usando un vernier y calculando el volumen con una fórmula adecuada etc.

El uso de un picnómetro resuelve el problema de manera sencilla. Este aparato hace uso del principio de 2 volúmenes conocidos de gas, así como también se conocen ambas presiones, ambos recipientes están separados solamente por una válvula cerrada y que luego se abre para igualar ambas presiones de las cámaras.

Un esquema sencillo de el sistema lo muestra la figura 2.4.1 .

(14)

Ahora asumimos lo siguiente:

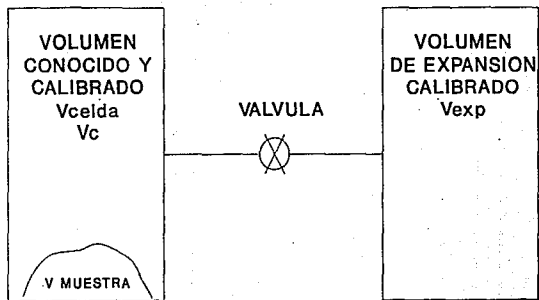


FIG. 2.4.1 ESQUEMA PICNOMETRO

Presión ambiente = P_a

Temperatura ambiente = T_a

a estas condiciones tenemos:

Volumen de celda = V_c

Volumen cámara expansión = V_{exp} .

Ahora se carga a una presión más o menos elevada que llamaremos P_1 a la cámara que contiene la muestra, teniendo la válvula cerrada y hacemos un balance de masa alrededor de la muestra:

$$P_1(V_c - V_{muestra}) = N_c R T_a \quad (1)$$

donde :

N_c = número de moles del gas

R = Cte. de gases ideales

T_a = Ambiente

Ahora hacemos otro balance en la cámara de expansión:

$$P_a V_{exp} = N_e R T_a \quad (2)$$

donde:

N_e = número de moles de gas en la cámara de expansión.

Cuando la válvula es abierta, la presión P_1 , decaerá hasta un valor intermedio P_2 (entre P_1 y P_a). Y por tanto la ecuación del

balance de masa queda de la siguiente manera:

$$P2 (Vc - Vmuestra + Vexp) = NcRTa + NeRTa \quad (3)$$

Utilizamos (1) y (2) y substituyendo en (3) tenemos:

$$P2 (Vc - Vmuestra + Vexp) = P1 (Vc - Vmuestra + PaVexp) \quad (4)$$

rearrreglando de la siguiente manera:

$$(P2-P1)(Vc - Vmuestra) = (Pa-P2)Vexp \quad (5)$$

entonces:

$$Vc - Vmuestra = \frac{Pa-P2}{P2-P1} Vexp \quad (6)$$

restando a ambos componentes del denominador Pa queda de la siguiente manera:

$$-Vmuestra = -Vc + \frac{Vexp (Pa-P2)}{(P2-Pa) - (P1-Pa)} \quad (7)$$

Ahora dividamos entre (Pa-P2) arriba y abajo del cociente, además multiplicando toda la ecuación por -1:

$$V_{muestra} = V_c - \frac{V_{exp}}{(P_1 - P_a)} - 1 \frac{V_{exp}}{(P_a - P_2)} \quad (8)$$

Rearreglando:

$$V_{muestra} = V_c - \frac{V_{exp}}{(P_1 - P_a)} - \frac{V_{exp}}{(P_2 - P_a)} \quad (9)$$

Hasta aquí ; P1, P2 y Pa estan expresadas en presiones absolutas, de ahora en adelante haremos uso de las presiones de válvula.

$$P_{1g} = P_1 - P_a \quad (10)$$

g=gauge

$$P_{2g} = P_2 - P_a \quad (11)$$

sustituyendo las nuevas presiones en nuestra ecuacion, queda de la siguiente manera:

$$V_{muestra} = V_c - \frac{V_{exp}}{P_{1g}} - \frac{V_{exp}}{P_{2g}} \quad (12)$$

Esta es nuestra ecuación de trabajo, ahora solo queda conocer con bastante exactitud los 2 volúmenes de las cámaras de muestra y de expansión, así como las presiones manométricas.

El picnómetro multivolumen 1305 usado en esta parte resuelve ambos problemas a la vez, ya que tiene procedimientos de calibración para conocer con extrema exactitud ambos volúmenes, además de que tiene una pantalla digital y válvulas integradas para controlar de manera eficaz las presiones que se requieran.

Por último el gas que se utilizó para el llenado de las cámaras fue un gas inerte de rápida penetración a los poros como lo es el HELIO.

2.5) RESINAS

2.5 A) Propiedades de Resinas

Se estudiaron anteriormente, de manera general, las propiedades características de los polímeros, tales como la estructura y el ordenamiento molecular. En el caso de las resinas, las cadenas poliméricas no presentan un ordenamiento determinado, por lo que se consideran amorfas, es decir, su grado de cristalinidad es nulo o muy pequeño. Esto se debe a que las cadenas presentan una gran cantidad de entrecruzamientos, los cuales son enlaces covalentes que mantienen unidas a las cadenas poliméricas, además de los enlaces de Van der Waals. Esto puede verse en la figura 2.5.1 (11)

Las propiedades de los polímeros dependen fundamentalmente de la temperatura. Al calentar un polímero los enlaces de Van der Waals desaparecen progresivamente. En el caso de los polímeros lineales esto provoca flujo viscoso, es decir, el polímero funde. Esto no sucede en el caso de las resinas y los hules debido a los entrecruzamientos, los cuales mantienen unidas a las cadenas poliméricas. Sin embargo, la desaparición de los enlaces de Van der Waals produce nuevos espacios donde las cadenas pueden moverse, lo que vuelve al polímero más elástico. Esto se refleja, entre otras cosas, en una caída del módulo elástico al aumentar la temperatura.

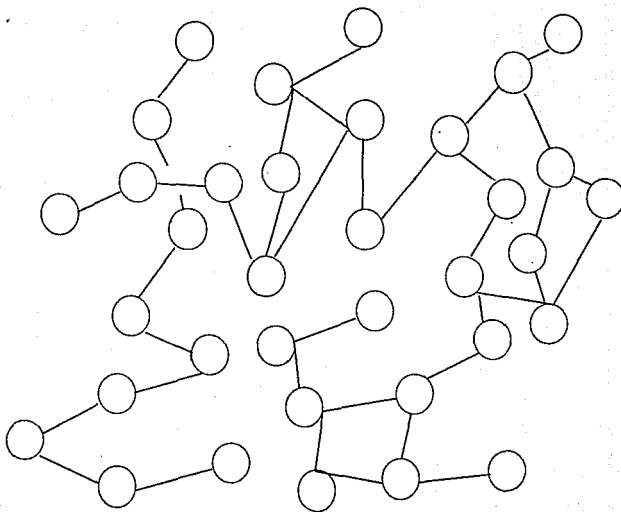


FIG. 2.5.1 ENTRECruzAMIENTOS DE CADENAS POLIMERICAS

A la temperatura en que desaparecen los enlaces de Van der Waals se le conoce como temperatura de transición vítrea (Tg). En el caso de los polímeros lineales, la fundición del material ocurre a Tg. Los elastómeros, por lo general, presentan una Tg menor a la temperatura ambiente, de aquí su gran elasticidad. Por su parte, las resinas presentan generalmente valores de Tg mayores a la temperatura ambiente. Debido a esto, son rígidas a temperatura ambiente (y frágiles), mientras que si se calientan arriba de Tg, su comportamiento tiende a ser elastomérico.

2.5 B) Propiedades Mecánicas de Resinas

Como se mencionó anteriormente, las propiedades de las resinas dependen de la temperatura. El módulo elástico es una de ellas. A bajas temperaturas, el módulo es alto, por lo que la resina tiende a ser más rígida y frágil. A temperaturas elevadas, el módulo disminuye y el material se vuelve más elástico. Recordemos que la rigidez de un material se define como la resistencia a la deformación elástica, mientras que la resistencia mecánica se define como la resistencia a la deformación plástica o a la fractura.

Debido a lo anterior, los polímeros presentan un espectro en su comportamiento mecánico, que va desde el comportamiento quebradizo, comportamiento altamente elástico (hule), y finalmente

flujo viscoso o descomposición del material (en el caso de resinas) a temperaturas muy elevadas.

El estado mecánico de un polímero depende de su temperatura de transición vítrea (T_g), que definimos como la temperatura a la cual desaparecen los enlaces secundarios, por lo que el polímero se comporta como un elastómero (en el caso de las resinas). Debido a que, en las resinas, T_g tiene valores elevados, estos polímeros se comportan como materiales quebradizos, a temperatura ambiente. Por lo tanto, deben definirse, lo más exactamente posible, las condiciones a las que trabajará el polímero.

El valor de T_g será entonces un parámetro muy importante, el cual definirá los límites de las diferentes zonas del espectro mecánico. En una gráfica módulo-temperatura, se pueden observar dichas zonas (ver figura 2.5.2). Una resina presenta, fundamentalmente, cuatro zonas de deformación : (1)

- Régimen vítreo (quebradizo), con módulos elevados.
- Régimen de transición vítrea, donde el módulo cae notablemente.
- Régimen elastomérico, con módulos bajos.
- Régimen de descomposición.

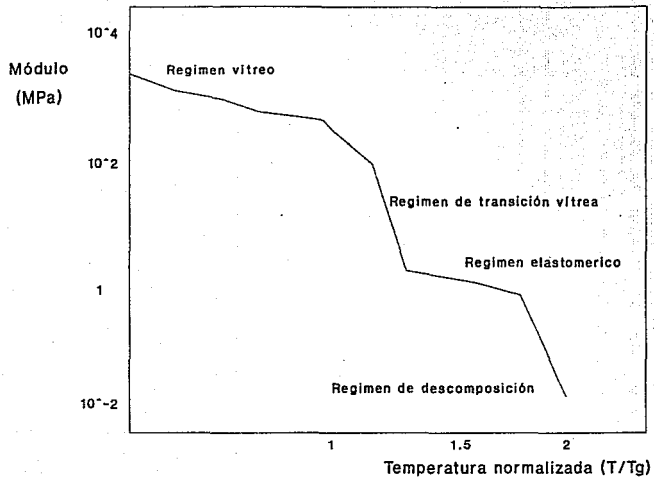


Fig. 2.5.2 Zonas mecánicas de una resina.

Además de T_g , el módulo depende también del tiempo de carga : cuando el polímero es sometido a alguna carga, la deformación que sufre va aumentando con el tiempo. Entonces, es necesario incluir dichas dependencias en la definición de módulo de Young : (1)

$$E = \sigma / \epsilon(T,t)$$

donde T es la temperatura y t el tiempo de carga.

Abajo del valor de T_g , las moléculas poliméricas se encuentran fuertemente unidas. Al someter al material a alguna carga, los enlaces que mantienen unidas a dichas moléculas se estiran, produciendo una deformación elástica. Los enlaces que sufren este estiramiento son los secundarios (fuerzas de Van der Waals).

El módulo del polímero es un promedio de la rigidez de los enlaces moleculares (tanto secundarios como primarios). Este promedio no es aritmético, debido a que, aún si los enlaces covalentes fueran completamente rígidos, el material se deformaría debido a que se estirarían los enlaces secundarios. Asumiendo entonces que existe deformación en cada tipo de enlace, puede calcularse matemáticamente el valor del módulo elástico con la siguiente relación : (1)

$$E = 1 / (f/E_1 + (1-f)/E_2)$$

donde f es la fracción de enlaces covalentes, los cuales son rígidos, E_1 es su módulo, $1-f$ es la fracción de enlaces secundarios, los cuales son débiles, y E_2 es su módulo. En el caso específico en que $f = 1$, el polímero presenta un 100% de entrecruzamientos, por lo que E_1 corresponde al diamante, el cual es 1000 GPa. Si $f = 0$, no existen entrecruzamientos, por lo que E_2 corresponde a un polímero simple como la parafina, cuyo valor es 1 GPa. Sustituyendo esta información en la ecuación anterior, obtenemos :

$$E = 1 / (f/1000 + (1-f)) \quad \text{GPa}$$

La figura 2.5.3 (1) nos muestra la función anterior graficada.

En el caso de las resinas, las cuales presentan una gran cantidad de entrecruzamientos, f toma valores tan altos como 0.75 para el cual E toma el valor de 8 GPa.

Al aumentar la temperatura e ir alcanzando el valor de T_g , los enlaces secundarios comienzan a desaparecer, lo que produce espacios libres por donde las cadenas poliméricas pueden moverse. Esto se refleja en una notable disminución en el valor del módulo. Entonces, al someter al polímero a alguna carga, las cadenas poliméricas "resbalan" a través de los espacios libres, pues ya no existen los enlaces secundarios que podían estirarse para disipar el exceso de energía. Sin embargo, existen partes en las que no

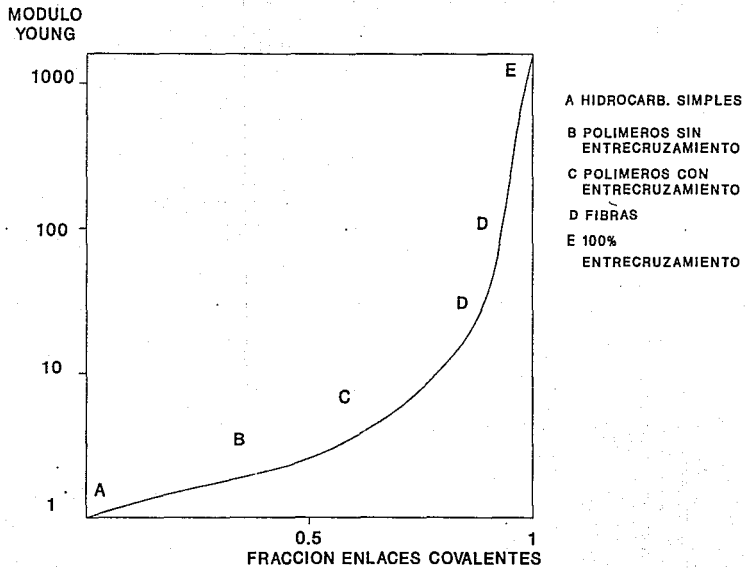


FIG. 2.5.3 VARIACION DEL MODULO DE YOUNG

ocurre este desplazamiento de las cadenas, pues las cadenas poliméricas se encuentran unidas mediante entrecruzamientos. Estos enlaces permiten al polímero poder regresar a su forma original, una vez quitada la carga. Es por esto que las resinas no funden en valores cercanos a T_g , puesto que existen muchos entrecruzamientos que lo impiden, lo que no sucede en los polímeros lineales, donde al no existir tales entrecruzamientos, pueden deslizarse las cadenas poliméricas, y gradualmente el polímero se funde.

Los entrecruzamientos actúan entonces como una especie de "memoria", la cual mantiene la forma del polímero. Mientras el esfuerzo aplicado tiende a ordenar, mediante estiramiento, las cadenas poliméricas, los entrecruzamientos tienden a regresar al estado de desorden. El módulo disminuye notablemente en este régimen, alrededor de un factor de 1000 respecto al módulo del régimen vítreo. (1)

En el caso de los hules, éstos presentan sólo un número limitado de entrecruzamientos, los cuales, sin embargo al ser enlaces covalentes muy fuertes, impiden que el material funda. Esto hace que los hules se comporten como elastómeros puros, capaces de lograr elongaciones elásticas de hasta 300% (1) o más. Esto no ocurre en las resinas, debido al gran número de entrecruzamientos que presentan. Al aumentar el número de entrecruzamientos, disminuyen los espacios libres dejados por los enlaces

secundarios, por lo que las cadenas poliméricas no pueden desplazarse y disminuye considerablemente la elasticidad. Debido a esto, las resinas son mucho más rígidas que los elastómeros puros, aún a valores mayores a T_g .

Al aumentar considerablemente la temperatura (arriba de $1.4T_g$), los enlaces secundarios han desaparecido totalmente, y, en el caso de los polímeros lineales, el estado del material cambia al de líquido viscoso. Es en este punto en el cual dichos polímeros pueden ser moldeados.

En el caso de las resinas, no ocurre un cambio de estado. Si el polímero alcanza temperaturas muy elevadas, el exceso de energía térmica es mayor a la energía de cohesión de las cadenas poliméricas, causando degradación en éstas. Ocurre entonces la descomposición del material. Es por ello que se recomienda no exceder temperaturas de $1.5T_g$ cuando se trabaja con polímeros.

Una vez analizado el módulo elástico de las resinas, y por lo tanto su rigidez, pasaremos a analizar la resistencia mecánica.

Uno de los parámetros que indica si un material presenta una adecuada resistencia mecánica, es el esfuerzo correspondiente al límite elástico, en el cual comienzan a producirse deformaciones permanentes (deformación plástica) o bien ocurre la propagación de pequeñas fracturas, lo que conduce a la ruptura del

material.

Abajo de $0.75T_g$ los polímeros tienden a ser frágiles o quebradizos. (1) Los polímeros generalmente presentan grietas en su superficie, causadas por diversos factores, como abrasión o ataque del medio ambiente. Entonces, al aplicar un esfuerzo σ al polímero, éste causará una pequeña fractura si se cumple lo siguiente : (1)

$$\sigma = KIC / (\sqrt{a})$$

donde KIC se denomina la tenacidad de fractura del polímero. En la mayoría de los polímeros, KIC toma el valor de $1 \text{ MPam}^{0.5}$, y el tamaño de la grieta es, típicamente, de sólo unas micras. Entonces, el esfuerzo en la fractura, en el régimen vítreo, es de aproximadamente de 100 MPa. Sin embargo, si existen grietas en el interior del material o regiones de concentración de esfuerzos, dicho valor disminuye considerablemente.

Aproximadamente a 50°C abajo de T_g , los polímeros comienzan a presentar comportamiento plástico: en vez de fracturarse el polímero, al llegar al punto de esfuerzo máximo en su resistencia mecánica, comienza a "estirarse en frío". Este comportamiento se puede observar muy claramente en un polímero lineal. En el caso de las resinas no se presenta este comportamiento plástico, debido a los entrecruzamientos. Su comportamiento es elástico al ser

sometida a alguna carga, y al llegar al punto de máximo esfuerzo, ocurre la fractura, aún a valores cercanos a T_g , y a valores mayores que ésta.

La resistencia mecánica de los polímeros depende, además de la temperatura, de la velocidad de deformación. Al aumentar ésta, la fractura del polímero tiende a ocurrir a valores menores de esfuerzo.

2.6) COMPOSITOS

2.6 A) Propiedades de Compósitos

Los compósitos hechos de polímero y fibra resultan ser más resistentes que los polímeros ordinarios. La baja resistencia que presentan las resinas puede ser incrementada enormemente al reforzarlas con una fibra. Esto se debe a que las fibras actúan como " obstáculos " para la propagación de las fracturas en la matriz.

Sin embargo, lo anterior es válido en la medida en que las fracturas se propaguen en sentido perpendicular a la fibra, ya que de otra forma la propagación no será detenida. Esto se debe a que los compósitos presentan Anisotropía, es decir, sus propiedades

físicas cambian de acuerdo a la dirección en que se midan.

Si bien los compósitos presentan propiedades diferentes a las de la matriz y al material de refuerzo, siguen dependiendo de los mismos factores, tales como la temperatura, el tiempo de carga y la velocidad de deformación. Dependiendo de la concentración de fibra, el compósito tenderá a parecerse, en su comportamiento, ya sea a la resina (a bajas concentraciones de fibra), o a la fibra (a elevadas concentraciones de fibra). Sin embargo, existe una concentración determinada en la cual las propiedades del material serán muy diferentes a las de sus componentes. En dicha concentración, las propiedades resultantes serán las deseadas, en cuanto a mayor resistencia, rigidez y tenacidad.

El aumento en la rigidez del material, respecto a la matriz, se debe a que la fibra en sí es mucho más rígida que el polímero. Esto se traduce en un aumento en el módulo elástico. El aumento en la resistencia mecánica, se manifiesta por su parte en un aumento en el valor del esfuerzo que el material puede soportar antes de presentar deformación permanente. Finalmente, el aumento en la tenacidad se manifiesta en una mayor resistencia a la fractura, debido a que las fibras impiden la propagación de fisuras en el material.

Este aumento en las propiedades del compósito no resulta de una combinación lineal de las propiedades de cada componente. El gran

atractivo de los compósitos radica en el hecho de que se obtiene una ganancia extra en las propiedades, debido a la presencia de una interfase polímero-fibra.

2.6 B) Propiedades Mecánicas

Los compósitos fibrosos presentan un aumento en el valor del módulo elástico, respecto a la matriz. El módulo elástico puede calcularse matemáticamente si suponemos que se aplica un esfuerzo determinado al compósito, el cual contiene un volumen V_f de fibras, paralelo a la dirección de las fibras. Asumiendo que la deformación producida tanto en la matriz como en las fibras es la misma, el esfuerzo producido en el compósito es: (1)

$$\begin{aligned}\sigma &= V_f \cdot \sigma_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \\ &= E_f \cdot V_f \cdot \epsilon_n + E_m \cdot (1 - V_f) \cdot \epsilon_n\end{aligned}$$

debido a que $E_c = \sigma / \epsilon_n$ (donde E_c es el módulo del compósito), entonces :

$$E_c = V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m$$

En el caso de que el esfuerzo se aplique perpendicularmente a la dirección de las fibras, el valor del módulo disminuirá

considerablemente. Esto se debe a las propiedades anisotrópicas del material. En este caso, se asume que el esfuerzo aplicado es el mismo tanto en la matriz como en las fibras. Entonces, el valor de la deformación producida es :

$$\begin{aligned} \epsilon_n &= V_f \cdot \epsilon_{nf} + (1 - V_f) \cdot \epsilon_{nm} \\ &= (V_f \cdot \sigma / E_f) + ((1 - V_f) / E_m) \cdot \sigma \end{aligned}$$

debido a que $E_c = \sigma / \epsilon_n$:

$$E_c = 1 / ((V_f / E_f) + (1 - V_f) / E_m)$$

En la figura 2.6.1 (1) se puede observar el comportamiento anisotrópico de los compósitos fibrosos, el cual explica el que el módulo tenga un valor mayor al aplicar el esfuerzo en la dirección paralela a las fibras, que cuando se aplica en forma perpendicular a las mismas.

Si las fibras se colocaran perpendicularmente unas a otras, en vez de solamente en una dirección, de tal forma que formaran una malla o tejido, el material se vuelve más isotrópico, por lo que el módulo no cambia tanto cuando el esfuerzo se aplica en cualquier dirección. Este tipo de compósitos (laminares) vuelven más homogéneo al material, respecto a su comportamiento, al igual que los compósitos particulados. Sin embargo, para evitar un

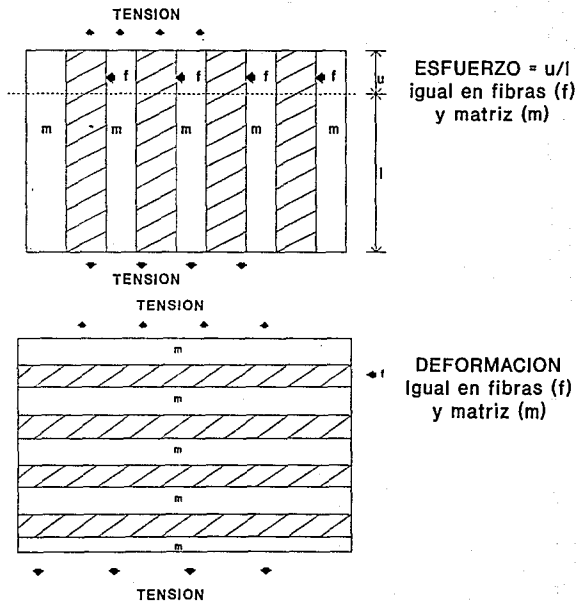


FIG. 2.6.1 ANISOTROPIA EN COMPOSITOS FIBROSOS

aumento en la concentración de fibra, debe disminuirse la cantidad de fibras que se encuentran alineadas en una misma dirección. Esto provoca que no se alcancen módulos tan elevados como en los compósitos fibrosos, en una dirección determinada.

La mayoría de los compósitos fibrosos están hechos de una matriz polimérica, la cual es dúctil, reforzada con fibras, las cuales son mucho más frágiles pero más resistentes. En la figura 2.6.2 (1) puede observarse el comportamiento mecánico de la fibra, la matriz polimérica y el compósito fibroso. En este último, el comportamiento inicial es lineal (con pendiente igual al módulo elástico) hasta que la matriz llega a su punto de cedencia. A partir de este momento, la mayoría de la carga aplicada es soportada por las fibras, las cuales continúan estirándose hasta la fractura de las fibras. Cuando esto ocurre, el esfuerzo cae hasta el valor correspondiente al esfuerzo de cedencia de la matriz. Finalmente, al ocurrir la fractura de la matriz, el compósito se rompe.

En el punto máximo de la gráfica, las fibras comienzan a romperse mientras que la matriz se encuentra dentro de su zona plástica, por lo que el esfuerzo que corresponde a la resistencia máxima a la tensión está dado por el esfuerzo de cedencia de la matriz σ_m y el esfuerzo en la fractura de las fibras σ_f , de acuerdo a la regla de las mezclas :

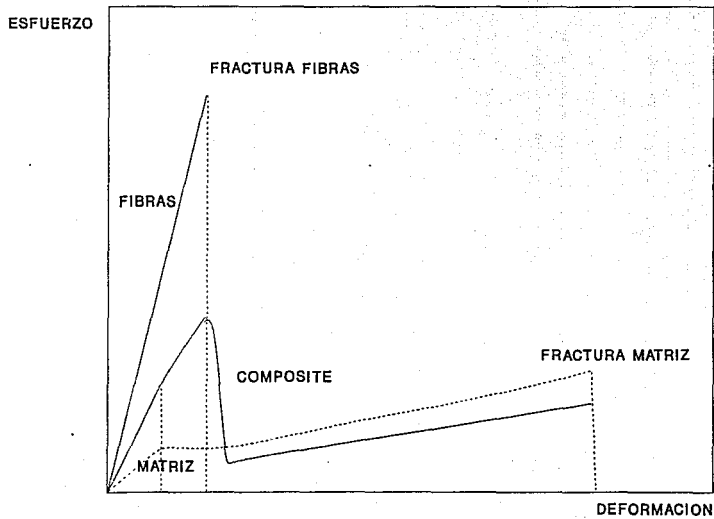


FIG. 2.6.2 COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO MECANICO

$$\sigma_{ts} = V_f \sigma_{fm} + (1 - V_f) \sigma_{off}$$

Una vez que las fibras se han fracturado por completo, se alcanza un nuevo punto máximo en la fractura de la matriz.

Existe una concentración óptima de fibra, en la cual la resistencia del material es máxima. De igual forma, existe una concentración mínima de fibra, por encima de la cual se presenta un aumento en la resistencia del compósito.

En muchas aplicaciones de los compósitos fibrosos, por ejemplo en materiales comprimidos, es conveniente usar fibras continuas. Sin embargo, si las fibras son cortadas en longitudes iguales (lo cual es conveniente en operaciones de moldeo), la resistencia es casi la misma que en las fibras continuas. En este caso, debe existir también una longitud mínima arriba de la cual la resistencia aumente. Así mismo, debe existir un valor máximo en el cual se consiga una resistencia máxima en el compósito.

La longitud máxima de la fibra puede obtenerse del siguiente análisis : (1)

Consideremos el máximo esfuerzo que puede soportar el compósito con la fibra cortada en pedacitos de igual longitud. La matriz tiene un esfuerzo de cedencia σ_{my} , el cual corresponde aproximadamente al doble del valor del esfuerzo cortante aplicado

sobre la fibra, σ_{ms} . La fuerza axial transmitida a una fibra de diámetro d sobre un pequeño segmento δx de su longitud es :

$$\delta F = \pi * d * \sigma_{ms} * \delta x$$

Esto puede observarse en la figura 2.6.3 (1)

La fuerza sobre la fibra se incrementa desde cero hasta un valor final de :

$$F = \int_0^x \pi d \sigma_{ms} dx$$

$$= \pi * d * \sigma_{ms} * x$$

a una distancia x del final. La fuerza a la cual se romperá la fibra es :

$$F_c = (\pi * d)^2 * \sigma_{ff} / 4$$

Igualando ambas fuerzas, encontramos que la fibra se romperá a una distancia X_c del final dada por :

$$X_c = (d * \sigma_{ff}) / (4 * \sigma_{ms})$$

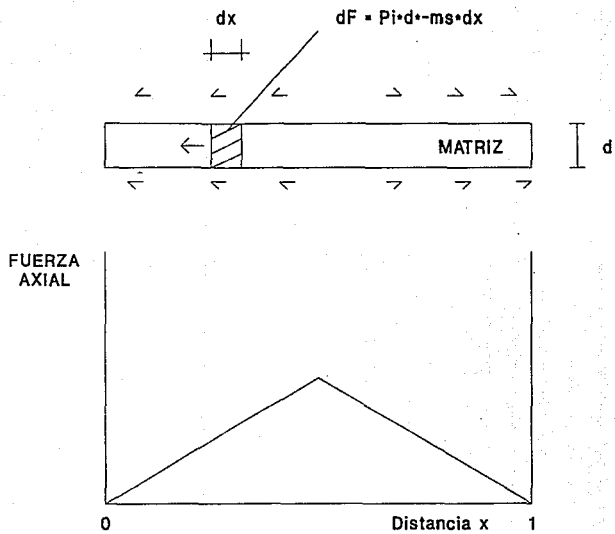


FIG. 2.6.3 ESFUERZO CORTANTE EN UNA FIBRA

Si la longitud de la fibra es menor a $2X_c$, las fibras no se romperán, pero la carga que soportan es menor de la que pudieran soportar. Si la longitud es mayor a $2X_c$, no se gana nada en cuanto a resistencia debido a la longitud extra.

La longitud óptima de fibra se obtiene cortando las fibras a una longitud de $2X_c$. El esfuerzo promedio que actúa sobre la fibra es entonces $\sigma_{ff}/2$, y el esfuerzo correspondiente al punto de máxima resistencia del material a la tensión, es :

$$\sigma_{ts} = (V_f * \sigma_{ff}/2) + (1 - V_f) * \sigma_{my}$$

Este valor del esfuerzo corresponde a más de la mitad del correspondiente a un compuesto con fibra continua, si todos los pedacitos de fibra estuvieran orientados en la dirección de la carga. Como esto es imposible, las contribuciones de las fibras a la rigidez y a la resistencia disminuyen.

Respecto a la tenacidad de los compósitos fibrosos, recordemos que ésta es una medida de la energía absorbida por unidad de área de fisuras existentes. Si las fisuras se propagan a través de la matriz (tenacidad G_{mc}) y las fibras (tenacidad G_{fc}), de acuerdo a la regla de las mezclas, la tenacidad del compuesto es : (1)

$$G_c = V_f * G_{fc} + (1 - V_f) * G_{mc}$$

Sin embargo, por lo general no sucede así. Vimos anteriormente que si la longitud de las fibras es menor a $2X_c$, éstas no se romperán. En vez de romperse, las fibras se mueven al irse propagando las fisuras. Al moverse, las fibras están absorbiendo energía, lo que aumenta el valor de la tenacidad.

Para obtener un valor elevado en la tenacidad de los compósitos deben usarse fibras muy resistentes cuando la matriz es muy poco resistente.

2.7 PROPIEDADES DE LAS FIBRAS

En general existen dos clases de fibras para elaborar compósitos, las hay sintéticas y naturales.

Las fibras naturales presentan características muy regulares que se enuncian:

Durabilidad

Fuerza de tensión a los cabos

Finura

Uniformidad

Flexibilidad

Resistencia a la tensión

Estas características se califican en una escala que va de el número 1 (menor) hasta el número 5 (mayor) (8). La especie de fibra utilizada en el presente trabajo está catalogada con grado 4.

La figura 2.7.1 nos presenta la curva de esfuerzo contra deformación típica de una fibra de palma samandoca y el módulo de Young experimental encontrado después de varios ensayos.

Como se observa en la gráfica, la fibra sola sigue la ley de Hook :

$$\text{Esfuerzo} = S * E$$

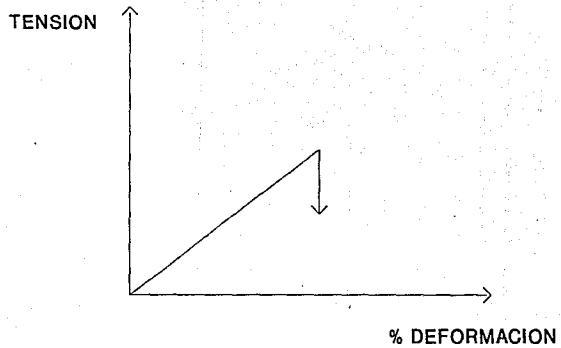


FIG. 2.7.1 COMPORTAMIENTO MECANICO DE UNA FIBRA

S = Módulo de Young

E = Deformación elástica

Las fibras sintéticas que pueden incluir a fibras de carbono, fibras de vidrio y fibras orgánicas como kevlar, presentan un comportamiento idéntico a las naturales cuando se someten a esfuerzos de tensión, ver figura 2.7.2.

Las fibras sintéticas presentan características muy similares entre sí, lo que se nota en la siguiente tabla (25):

	Carbono PAN (1)	Vidrio E	Kevlar 40
Diámetro μm	7-9	7-8	11
Densidad Kg/m ³	1.95E3	2.56E3	1.45E3
Módulo Young GN/m ²	390	76	125
Resist. a fricción	2.2	1.4	2.8
	GN/m ²		

Además las fibras presentan una estabilidad térmica aceptable dentro del rango de temperatura manejado.

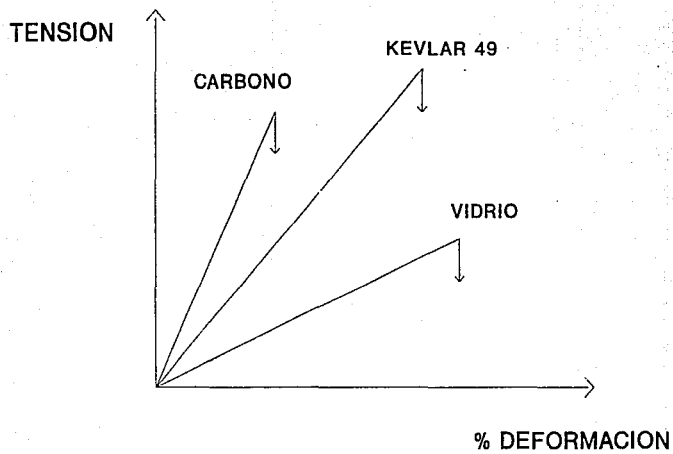


FIG. 2.7.2 COMPORTAMIENTO MECANICO DE FIBRAS SINTETICAS

3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1.- Preparacion de probetas.

Las probetas en estudio fueron elaboradas utilizando una mezcla de resina poliéster y monómero de estireno al 25% en volumen como diluyente. A esta mezcla se le agrega un acelerador (Naftenato de cobalto) y un catalizador (metil-etil cetona), en una proporción del 1% en volumen.

Acto seguido se realizó una serie de variaciones en el contenido de fibra samandoca (zacate). El zacate utilizado en la preparación de las probetas fue sometido a su vez a un pulido de su superficie, de tal forma que se eliminaran totalmente las pequeñas asperezas que trae consigo la fibra para asegurarse que la superficie de la fibra sea lo más homogénea posible y no presente una deficiente adherencia con la resina.

El pulido consistió básicamente en frotar pequeñas cantidades de fibra con un papel poroso, de atrás hacia adelante repetidas veces hasta observar una superficie totalmente lisa.

La fibra fue cortada en diferentes longitudes y se mezcla luego con la proporción adecuada de resina, procurando que la mezcla sea lo mas homogénea posible, esto es revolviendo perfectamente. Luego se vacía en los moldes de silicón para que la mezcla polimerize.

Dicho proceso tarda aproximadamente 2 días.

A continuación se presenta una tabla que contiene las variaciones de tamaño y % en peso de fibra utilizados:

% en peso

cms	1	5	7.5	10
0.5	X	X	X	X
1.0	X	X	X	X
1.5	X	X	X	X
2.0	X	X	X	X

Como experimento preliminar se realizó también una serie de muestras de resina pura, mezclada únicamente con el diluyente, acelerador y catalizador en las proporciones antes indicadas.

3.2.- PREPARACION DE MOLDES

Los moldes que se recomiendan para este tipo de muestras son los fabricados con silicón, pues presentan ciertas ventajas de gran utilidad para el tipo de probetas utilizadas (5):

- 1.- Vulcanización rápida del molde
- 2.- El molde puede ser usado varias veces
- 3.- Agente desmoldante de fácil obtención (grasa automotriz)
- 4.- Ya vulcanizado es flexible, lo que facilita el desmolde de las probetas polimerizadas.

Primeramente se elaboraron cuidadosamente varias réplicas de las muestras en aluminio, para este fin se siguieron las medidas y forma que se encuentran en la norma ASTM D 1708 (fig 3.2.1) (10)

A continuación las muestras fueron recubiertas con silicón comercial cuidando de no dejar espacios vacíos. Una vez que vulcaniza totalmente el silicón, se retira el aluminio y obtenemos finalmente los moldes que se utilizarán para vaciar las mezclas de resina con fibra. El tiempo de vulcanizado del silicón es de 2 días aproximadamente. Hay que cuidar que exista una ventilación adecuada, de tal forma que estemos seguros que al desprender el aluminio no se rompa el molde.

3.3.- ENSAYO MECANICO DE TENSION

Una vez que se obtienen las probetas, se procede a someterlas a la prueba de tensión. La maquina utilizada para tal efecto es la siguiente:

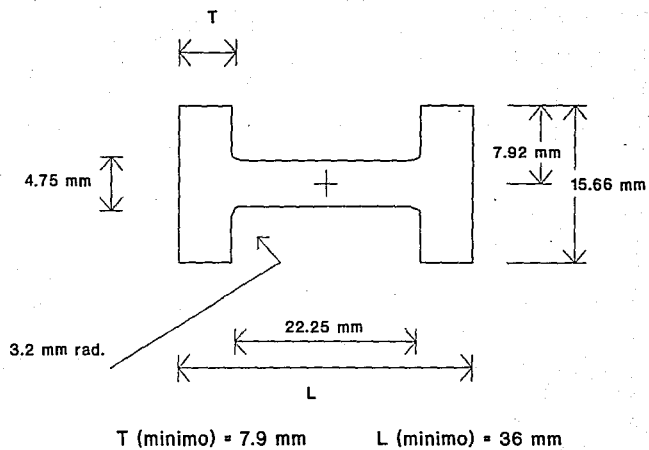


FIG 3.2.1 MEDIDAS DE PROBETAS

Máquina Universal De Pruebas Mecánicas

Marca Adamel Lhomargy Modelo DY.22

Este aparato mide la resistencia de un material a la aplicación gradual de una fuerza, ya sea de tensión o compresión. Un dispositivo simple de este tipo nos lo muestra la fig. 3.3.1

La probeta en estudio se fija con las pinzas colocadas en la pared superior e inferior de la máquina, asegurándose que la probeta quede en el centro de ambas pinzas. Se aplica entonces una fuerza de tensión, llamada carga, la cual se mide en decanewtons (daN). Previamente ha sido fijada la velocidad de deformación, medida en mm/min.

La máquina tiene integrado un extensómetro digital el cual nos presenta en pantalla la deformación (en mm) que va sufriendo la muestra a que se le aplica la carga, pudiéndose tomar la lectura de los pares de datos de carga y de deformación. Con estos datos la maquina va elaborando una gráfica de carga contra deformación, la cual es la base para obtener posteriormente gráficas de esfuerzo contra deformación. El papel utilizado para graficar presenta diferentes escalas de acuerdo a las constantes que se fijen para la prueba (velocidad del papel y velocidad de la plumilla graficadora).

Además, la máquina es capaz de realizar pruebas de compresion, fatiga, etc.

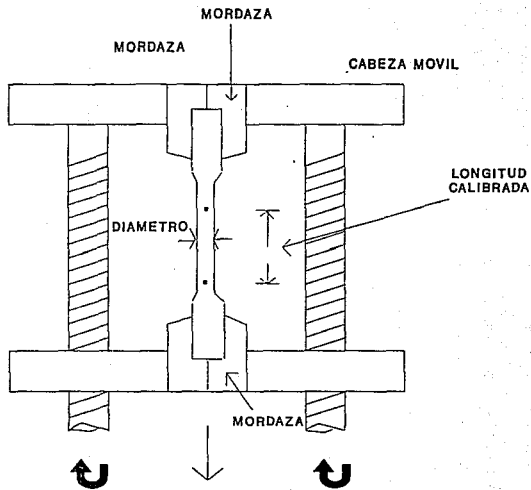


FIG 3.3.1 MECANISMO DE TENSION

3.4.- MEDICION DE DENSIDADES

Para obtener la densidad se le realizó a cada muestra 2 mediciones separadas, por un lado la obtención de la masa con ayuda de una balanza analítica capaz de proporcionar una exactitud de 3 cifras decimales.

El volumen de las muestras pesadas, fue determinado mediante el uso de un picnómetro, el siguiente:

Nombre Picnómetro Multivolumen
Marca Micromeritics
Modelo 1305

El cual consiste en dos cámaras, ambas de volumen calibrado y conocido y unidas por una válvula que se abre y cierra para dejar pasar un gas inerte a presión desde una cámara a otra.

Las muestras de los compósitos se cortan en pequeños pedazos de aproximadamente $1.5 \times 1.5 \times 2$ cm para colocarlos en la cámara de presión. A continuación se hace pasar el gas inerte a una presión de alrededor de 20 psi y se toma la lectura de la presión en la pantalla digital, después se abre la válvula que une a las 2 cámaras, ya estabilizadas ambas presiones, se toma la segunda lectura. Esta operación se repite varias veces hasta contar con varios pares de datos lo suficientemente aceptables, para

calcular volúmenes que ya no difieran entre sí demasiado.

Por lo general son necesarios 5 pares de datos de presiones para obtener resultados satisfactorios.

La siguiente tabla nos muestra la distribución de tamaños de fibra y porcentaje de fibra utilizados en estas determinaciones:

	% FIBRA		
cms.	5	7.5	10
0.5	X	X	X
1.0	X	X	X
1.5	X	X	X

Por cada % de fibra y tamaño utilizado se usaron 4 diferentes muestras para obtener un volumen mas representativo y confiable.

Después solo resta dividir la masa de cada muestra entre el volumen obtenido y así obtenemos la densidad.

4) RESULTADOS Y TRATAMIENTO DE DATOS

4.1) Resultados de las pruebas mecánicas y tratamiento de datos

La máquina universal de pruebas mecánicas proporciona, como resultados de la prueba de tensión, gráficas de carga aplicada contra elongación producida, para cada muestra. Estas gráficas deben transformarse a gráficas de esfuerzo contra deformación, aplicando las fórmulas correspondientes. En el caso de esfuerzo y deformación ingenieriles, dichas fórmulas son :

$$\sigma_n = F/A_0$$

donde F = carga aplicada (en Nw), A₀ = área transversal de la muestra (en mm²) y σ_n = esfuerzo ingenieril (en MPa).

$$\epsilon_n = dl/l_0$$

donde dl = elongación producida (en mm) = l-l₀, l₀ = longitud inicial de la muestra, l = longitud puntual de la muestra y ϵ_n = deformación ingenieril.

Las dimensiones de la muestra corresponden a las de la parte sobre la que se aplica el esfuerzo, es decir, no se consideran las agarraderas de los extremos. Entonces, el área transversal (A₀)

resulta de multiplicar el espesor (e) y el ancho (a) de dicha parte de la muestra. La longitud (l₀) se toma como la distancia existente entre las agarraderas. En la tabla 4.1.1 se muestra un ejemplo de las dimensiones de una muestra, así como los valores de las constantes de la máquina y el punto de ruptura.

Debido a que resulta impráctico transformar cada punto de la gráfica experimental a valores de esfuerzo y deformación, se utilizó un programa especial el cual consta de una tarjeta digitalizadora sobre la cual se coloca la gráfica a analizar, y de una pluma especial que lee cada punto de la gráfica. El programa necesita que se fijen dos puntos, a partir de los cuales se escalan los demás. Por conveniencia, el primer punto se elige como el origen de la gráfica. Para saber con exactitud dicho punto, se debe considerar lo siguiente :

Antes de efectuar la prueba de tensión se fijan 3 constantes : ganancia, K y V (en mm/min), las cuales están relacionadas con la velocidad de la plumilla, la velocidad del papel y la velocidad de deformación, respectivamente. La relación K/V multiplicada por la elongación producida en un punto determinado, nos proporciona el número de mm que recorrió el papel desde el inicio de la prueba hasta el punto en que ocurrió la elongación. Como conocemos el último punto de la gráfica, es decir el punto de ruptura, se toma esta elongación y obtenemos el número total de mm que recorrió el papel :

TABLA 4.1.1

1) RESINA

NS	Th (mm)	L (mm)	A (mm)	LDM (DaN)	EM (mm)	C (mm/min)
1	3.8	23	6	41.4	1.58	K = 10
2	3.8	21	7	42.6	1.91	
3	3.5	24	5	43.5	9.06	G = 2.0
4	3.9	21.8	6	44.5	2.87	
5	3.5	23	5.5	40.8	1.62	SR = 0.5
6	3.8	24	6.2	42.5	5.5	(1 - 5)
7	3.5	21	5.5	51.2	4.15	
8	4.5	23	5.5	52.2	5.73	SR = 0.4
9	4	24	6.1	42.7	3.68	(6)
10	4	22	5.6	42.8	5	
11	3.2	22	6.1	35.8	4.81	SR = 0.2
12	4.5	25	5	47.4	10.1	(7 - 12)

2) RESINA CON FIBRA : 1 % & 0.5 cm

NS	Th (mm)	L (mm)	A (mm)	LDM (DaN)	EM (mm)	C (mm/min)
1	4	22.5	6	42	1.58	K = 10
2	5.5	23	6	54.8	1.57	
3	5.8	24.4	5.15	96.8	1.11	G = 2
4	4.6	23.3	5.5	75.5	1.03	
5	4.4	23	6.6	93	0.97	SR = 0.2
6	5.5	23.5	6.3	78.1	1	(1 - 2)
						SR = 0.1
						(3 - 6)

Donde: NS: número muestra; Th: espesor; L: longitud; A: área transv.;
 LDM: carga máxima; EM: elongación máxima; C: constantes de máquina;
 K: vel. papel; G: ganacia; SR: vel. deformación.

$$\text{mm papel} = (K/V) * \text{elongación total}$$

Con una regla se mide, a partir del punto donde está la elongación total, el número de mm anterior y éste será el punto de elongación cero.

El segundo punto está dado por el punto de ruptura de la muestra en la gráfica. Este punto se transforma a valores de esfuerzo y deformación con las fórmulas mencionadas anteriormente. Se alimenta entonces el programa con los puntos fijados anteriormente y los demás son generados por el programa, en valores de esfuerzo y deformación.

Los puntos generados por el programa pueden ser entonces graficados. La gráfica resultante es de esfuerzo contra deformación ingenieriles. Para transformar los puntos a esfuerzo y deformación reales, se aplican las siguientes fórmulas :

$$\sigma_r = \sigma_n(1 + \epsilon_n)$$

$$\epsilon_r = \ln(1 + \epsilon_n)$$

Ejemplo :

Para la combinación de 5% de fibra y 0.5 cm de longitud, la muestra 5 generó una gráfica cuyo punto de ruptura fue en una

carga de 858 Nw y una elongación de 0.62 mm. Las constantes de la máquina fueron : $gan = 2$, $K = 10$ y $V = 0.1$ mm/min.

Para calcular el punto de origen, se aplica el procedimiento indicado anteriormente. Entonces, los mm totales que recorrió el papel durante la prueba son :

$$\text{mm papel} = (10/0.1) * 0.62 = 62 \text{ mm}$$

Se miden entonces, a partir del punto de ruptura, 62 mm y éste será el cero en elongación. El cero en carga se obtiene de la escala del papel. Como la ganancia está relacionada con la velocidad de la plumilla graficadora, y ésta a su vez lo está con la carga, la escala correspondiente es de 25 Nw por cada cuadro. Como el valor de la carga en la ruptura es de 858 Nw, se cuenta hacia abajo, a partir de éste valor, hasta llegar al cero en carga (es decir, en el eje Y).

El segundo punto se obtiene convirtiendo la carga y la elongación a esfuerzo y deformación. La muestra 5 tiene como dimensiones : $e = 4.6$ mm, $a = 5$ mm y $l_0 = 23.5$ mm. Entonces :

$$\sigma_n = 858 / (4.6 * 5) = 37.3 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_n = (0.62 / 23.5) * 100 = 2.64 \%$$

Con estos dos puntos se generan los demás mediante el programa. Este programa está basado en simples reglas de tres. Es decir, si medimos en el eje X (deformación) un punto determinado en mm de papel, para saber la deformación correspondiente se aplica la siguiente regla, para este ejemplo :

$$\epsilon_{\text{puntual}} = (2.64/62) * X_{\text{mm}}$$

Lo mismo se aplica en el eje Y (esfuerzo).

Los valores correspondientes al esfuerzo y deformación reales son :

$$\sigma_r = 37.3 * (1 + 2.64 e^{-2}) = 38.3 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_r = \text{Ln} (1 + 2.64e^{-2}) = 2.6 e^{-2} = 2.6 \%$$

La graficación de los puntos se hizo en Lotus, el cual puede ser importado en Word Perfect, y en Harvard Graphics. El Lotus tiene la ventaja de importar los puntos generados en el programa.

Para cada combinación de longitud y contenido de fibra se elaboraron, en promedio, 10 muestras. Como se tuvieron 18 combinaciones diferentes, se generaron un total de 180 gráficas, aproximadamente. Debido a ésto, se realizó un análisis preliminar, de tal manera de elegir solamente las muestras más

representativas. De esta forma, de las 10 gráficas existentes para cada combinación, se eligieron las tres más representativas. El criterio de discriminación se basó en la comparación de las gráficas y ver cuáles se parecían más entre sí. Se calcularon módulos preliminares mediante regresión lineal de los primeros puntos de la gráfica, y también fueron comparados. Finalmente, se compararon los puntos de ruptura.

Las tres gráficas elegidas para cada combinación se tomaron como las representativas para la caracterización final del material.

Debido a que, tanto la carga como la elongación, se dividen entre cantidades constantes, la forma de la nueva gráfica será la misma, aunque es independiente de las dimensiones de las muestras. Esto es muy importante pues dichas gráficas se utilizaron como comparación entre las diferentes muestras, de tal forma de elegir las más representativas.

Las gráficas de esfuerzo contra deformación nos muestran el comportamiento del material a la tensión. Como estudiamos anteriormente, existen varios parámetros importantes que se obtienen de la gráfica. En primer lugar deben delimitarse las diferentes zonas del espectro mecánico. El comportamiento general del compuesto muestra una primera zona aparentemente lineal; posteriormente se forma una zona plana, es decir, de pendiente cero. Pasando esta zona, la curva vuelve a presentar un comportamiento lineal, aunque después se comporta como no lineal

hasta llegar al punto de ruptura.

De la primera zona lineal puede obtenerse una pendiente por regresión lineal. Esta pendiente corresponde a un primer módulo elástico. Pasando la zona de pendiente cero, es necesario determinar hasta que punto el comportamiento de la segunda zona es elástico, pues, en esta zona, el comportamiento lineal se da solo al principio, para después comportarse como no lineal hasta la ruptura. Para determinar el punto en el cual termina la zona elástica, es decir, el punto de cedencia, se consideró lo siguiente :

El módulo elástico está definido como $E = \sigma/\epsilon$, por lo que puede aplicarse tal definición a cada punto de la gráfica. Una vez obtenidos los módulos puntuales, podemos graficar el inverso del módulo contra el % de deformación. La gráfica resultante alcanza un máximo en el punto donde ocurre un cambio brusco en la pendiente. Este punto corresponde al punto de cedencia del material.

Una vez conocido el límite de la zona elástica, puede obtenerse el módulo elástico mediante la regresión lineal de los puntos anteriores al punto de cedencia.

Pasando el punto de cedencia, el material sufre deformación plástica. En esta zona plástica la gráfica alcanza un valor

máximo. Este punto corresponde a la resistencia máxima a la tensión.

Finalmente, el último punto de la gráfica corresponde a la fractura o ruptura del material.

A continuación se muestran las gráficas elaboradas para algunas de las combinaciones. Recordemos que las combinaciones son : Resina pura y compósitos con contenido de fibra de 1, 5, 7.5 y 10 %, y longitud de fibra de 0.5, 1, 1.5 y 2 cm. (En el caso del compósito de 0.5 cm de longitud de fibra, se probó también la concentración de 15 %), lo que da un total de 18 combinaciones diferentes. Debido a la gran cantidad de gráficas generadas, se muestran solamente las correspondientes a las siguientes combinaciones : resina pura, 1 % y 2 cm, 5 % y 1.5 cm, 7.5 % y 1 cm, 10 % y 0.5 cm, 15 % y 0.5 cm. En cada combinación las gráficas elaboradas fueron las siguientes :

- Gráfica comparativa de esfuerzo contra deformación para las tres muestras elegidas como representativas de cada combinación. En esta gráfica puede observarse la dispersión entre los puntos de las diferentes muestras. En general, el comportamiento de las muestras de cada combinación es muy similar entre sí, lo que da una gran confiabilidad al experimento. En caso de no ser así, dicha prueba se repitió. (Gráficas No. 1 de cada combinación)

- Gráfica de esfuerzo contra deformación ingenieril y real, de una muestra en particular. Se eligió una de las tres muestras y de su gráfica se obtuvieron los parámetros mecánicos. (Gráficas No. 2 de cada combinación).

- Gráfica de inverso del módulo contra ϵ de deformación, de una muestra en particular. De la misma muestra seleccionada se elaboró esta gráfica para hallar el punto de cedencia. (Gráfica No. 3 de cada combinación)

Cabe señalar que se tenía previsto trabajar con la concentración de fibra del 15 %. Sin embargo, los resultados de la prueba de tensión mostraron que, en dicha concentración, el compósito tiende a comportarse como fibra sola. Debido a ésto, se tomó como concentración máxima el valor de 10 %, en la cual el comportamiento sigue siendo una combinación de la resina y la fibra.

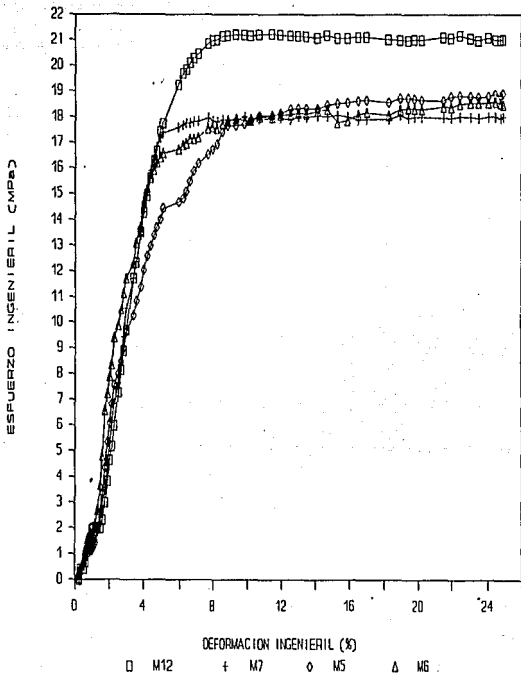
Al final de las gráficas se anexa una tabla que contiene los parámetros mecánicos de las 18 diferentes combinaciones (módulos elásticos, puntos de cedencia, puntos de ruptura, etc.

COMBINACION 1

RESINA PURA

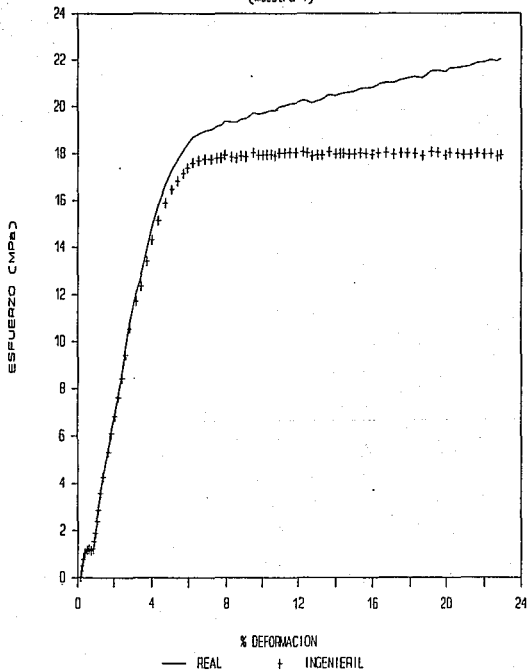
- 1) Gráfica de esfuerzo contra deformación comparativa entre diferentes muestras
- 2) Gráfica de esfuerzo contra deformación para una muestra en particular
- 3) Gráfica de inverso del módulo contra deformación para una muestra en particular

RESINA PURA

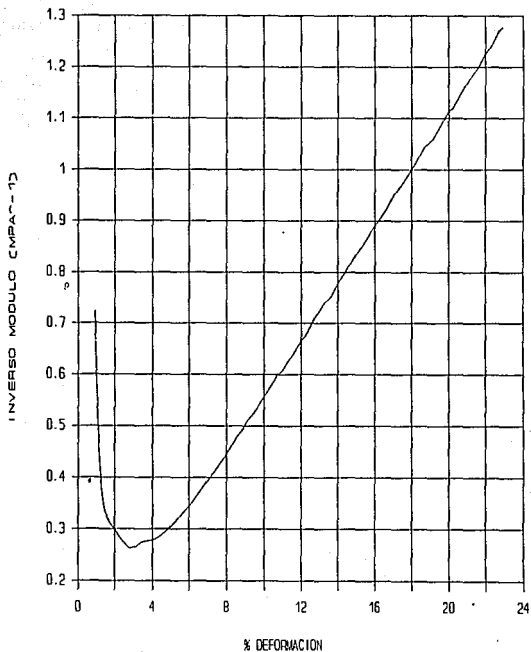


PRUEBA DE TENSION EN RESINA PURA

(Muestra 7)



PRUEBA DE TENSION EN RESINA PURA

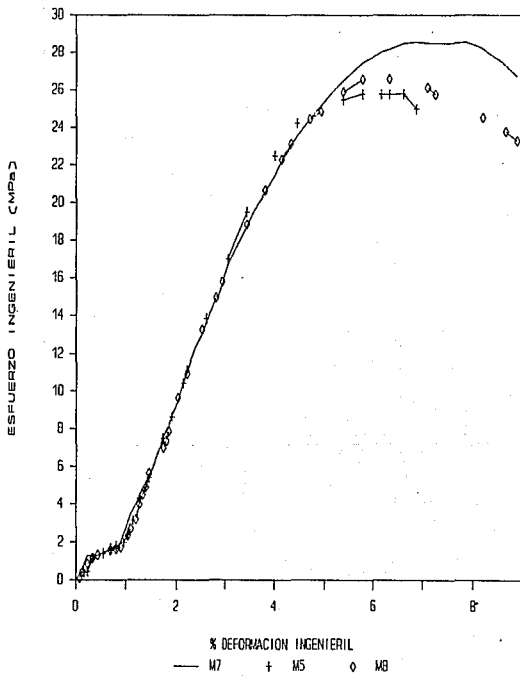


COMBINACION 2

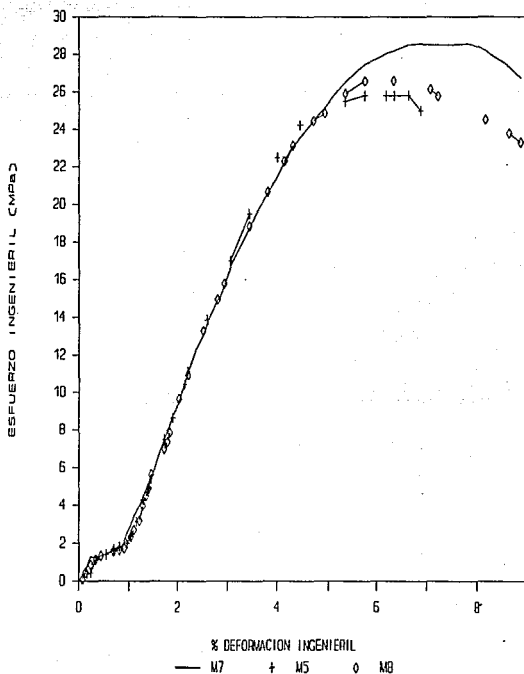
RESINA CON FIBRA AL 1% (LONGITUD = 2 cm)

- 1) Gráfica de esfuerzo contra deformación comparativa entre diferentes muestras
- 2) Gráfica de esfuerzo contra deformación para una muestra en particular
- 3) Gráfica de inverso del módulo contra deformación para una muestra en particular

RESINA CON FIBRA AL 1% (L= 2cm)

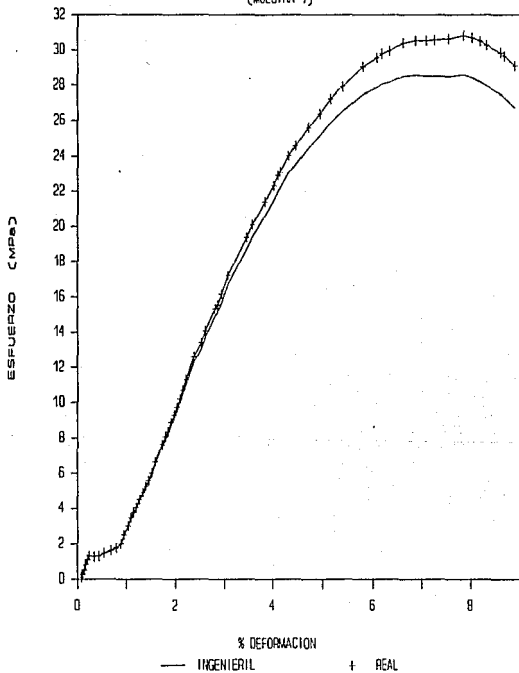


RESINA CON FIBRA AL 1% (L= 2cm)



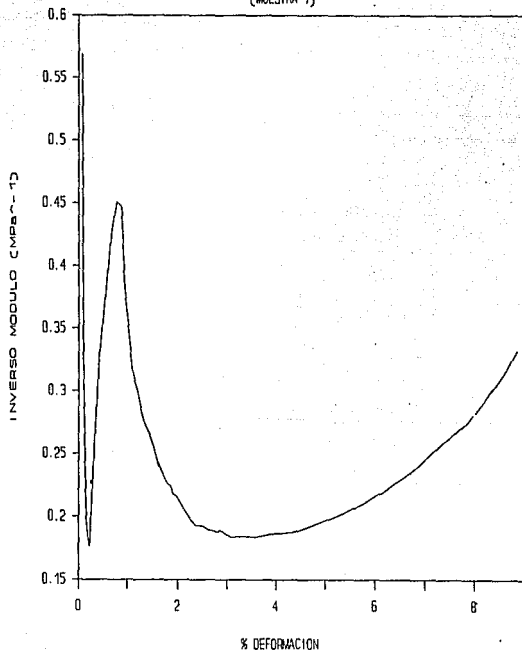
RESINA CON FIBRA AL 1% (L= 2cm)

(MUESTRA 7)



RESINA CON FIBRA AL 1% (L= 2cm)

(MUESTRA 7)

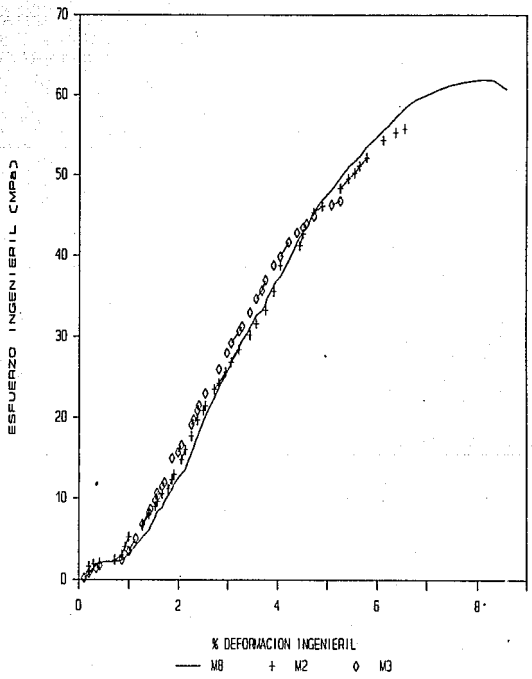


COMBINACION 3

RESINA CON FIBRA AL 5% (LONGITUD = 1.5 cm)

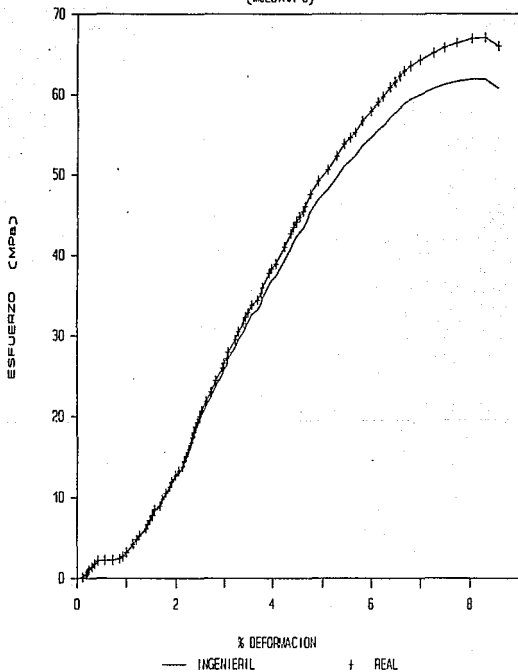
- 1) Gráfica de esfuerzo contra deformación comparativa entre diferentes muestras
- 2) Gráfica de esfuerzo contra deformación para una muestra en particular
- 3) Gráfica de inverso del módulo contra deformación para una muestra en particular

RESINA CON FIBRA AL 5% (L= 1.5 cm)



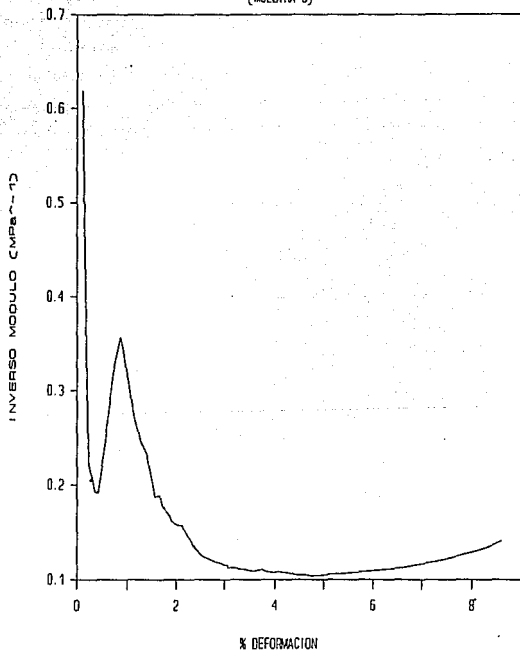
RESINA CON FIBRA AL 5% (L= 1.5 cm)

(MUESTRA 8)



RESINA CON FIBRA AL 5% (L= 1.5 cm)

(MUESTRA B)

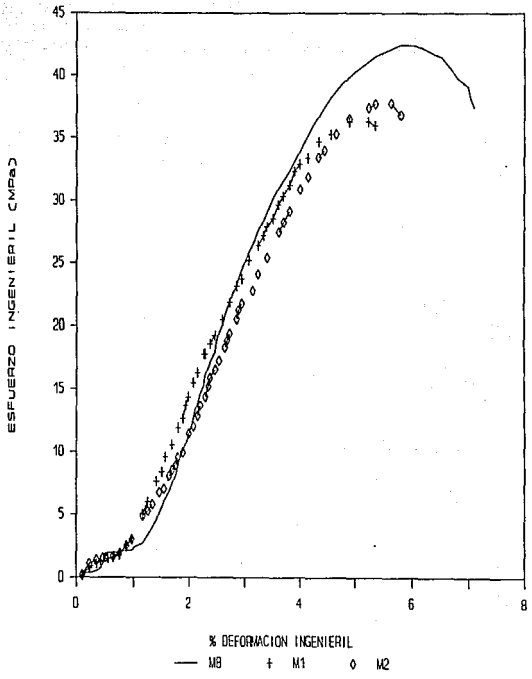


COMBINACION 4

RESINA CON FIBRA AL 7.5% (LONGITUD = 1 cm)

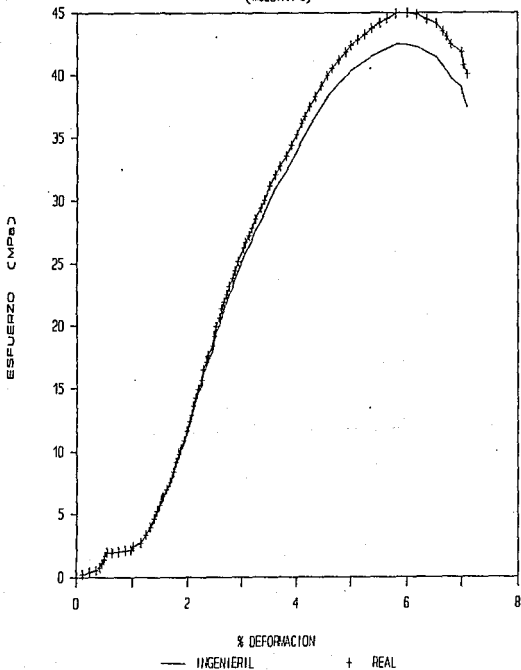
- 1) Gráfica de esfuerzo contra deformación comparativa entre diferentes muestras
- 2) Gráfica de esfuerzo contra deformación para una muestra en particular
- 3) Gráfica de inverso del módulo contra deformación para una muestra en particular

RESINA CON FIBRA AL 7.5% (L= 1 cm)



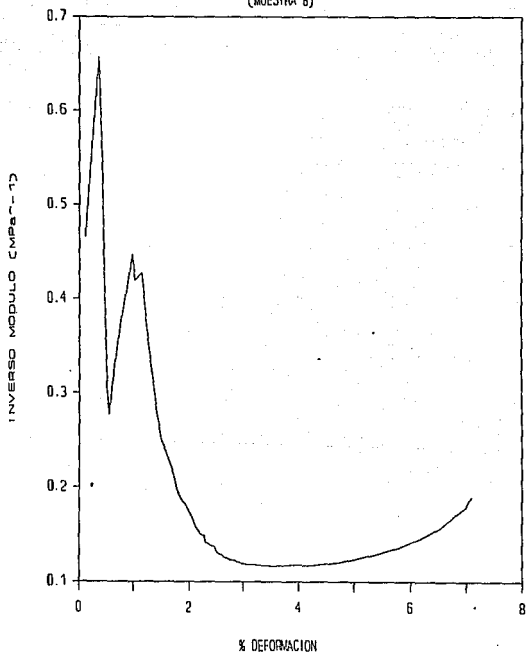
RESINA CON FIBRA AL 7.5% (L= 1 cm)

(MUESTRA B)



RESINA CON FIBRA AL 7.5% (L= 1 cm)

(MUESTRA 8)

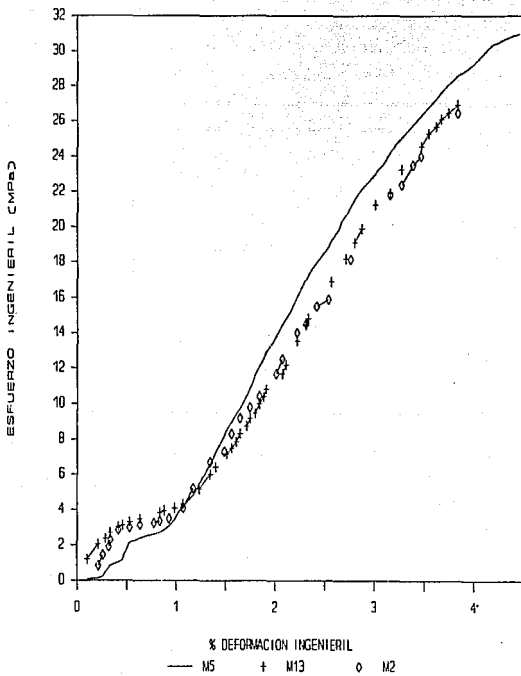


COMBINACION 5

RESINA CON FIBRA AL 10% (LONGITUD = 0.5 cm)

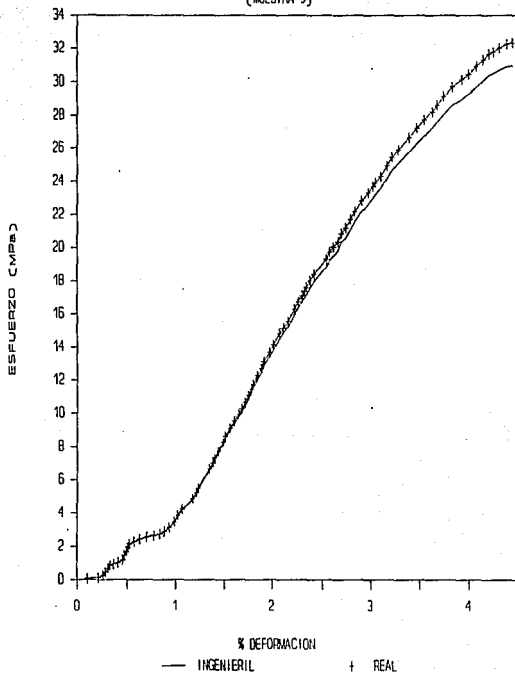
- 1) Gráfica de esfuerzo contra deformación comparativa entre diferentes muestras
- 2) Gráfica de esfuerzo contra deformación para una muestra en particular
- 3) Gráfica de inverso del módulo contra deformación para una muestra en particular

RESINA CON FIBRA AL 10 % (L= 0.5 cm)



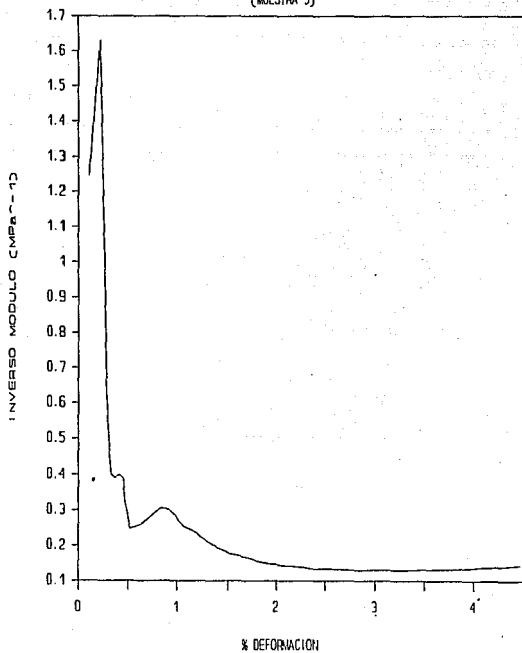
RESINA CON FIBRA AL 10 % (L= 0.5 cm)

(MUESTRA 5)



RESINA CON FIBRA AL 10 % (L= 0.5 cm)

(MUESTRA 5)

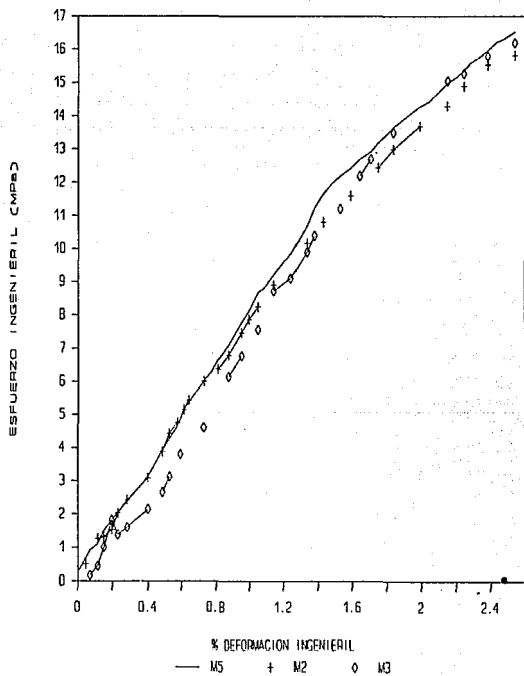


COMBINACION 6

RESINA CON FIBRA AL 15% (LONGITUD = 0.5 cm)

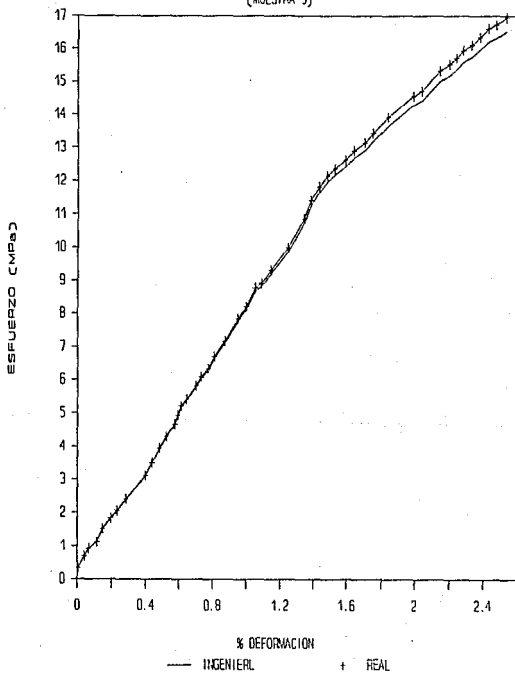
- 1) Gráfica de esfuerzo contra deformación comparativa entre diferentes muestras
- 2) Gráfica de esfuerzo contra deformación para una muestra en particular
- 3) Gráfica de inverso del módulo contra deformación para una muestra en particular

RESINA CON FIBRA AL 15% (L= 0.5 cm)



RESINA CON FIBRA AL 15% (L= 0.5 cm)

(MUESTRA 5)



RESINA CON FIBRA AL 15% (L= 0.5 cm)

(MUESTRA 5)

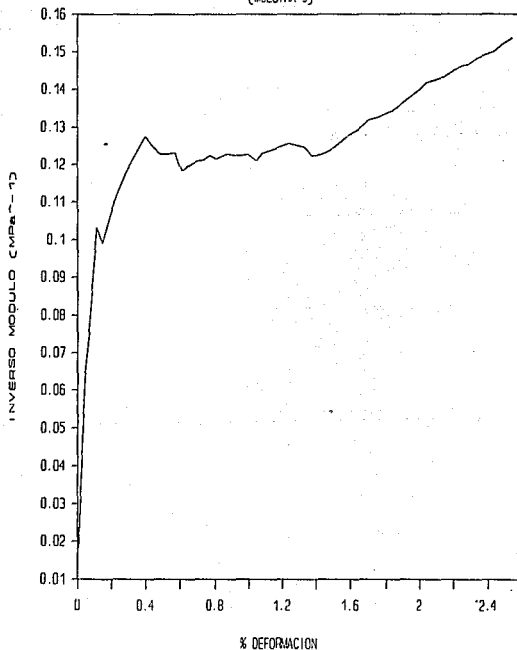


TABLA COMPARATIVA DE LOS PARAMETROS MECANICOS OBTENIDOS PARA CADA COMBINACION RESINA - FIBRA.

FL (cm)	% F	SR (mm/min)	FS (MPa)	FE(%)	YS (MPa)	YE(%)	EM1 (MPa)	EM2 (MPa)
RESINA	0.00	0.4	18.0	23.0	Elástico	Elástico	3.7	5.75
0.5	1.00	0.1	30.0	4.5	0.33	0.2	6.3	7.1
0.5	5.00	0.1	40.0	3.5	0.71	0.6	5.3	10.2
0.5	7.50	0.2	29.5	5.5	3.20	1.0	5.85	5.5
0.5	10.00	0.1	31.0	4.5	0.14	0.2	6.18	7.65
0.5	15.00	0.1	16.5	2.6	3.12	0.3	====	7.6
1.0	1.00	0.1	30.33	6.8	1.10	1.0	3.8	7.7
1.0	5.00	0.1	41.7	6.5	3.40	1.0	4.6	10.3
1.0	7.50	0.2	37.5	7.1	2.50	1.0	7.5	8.75
1.0	10.00	0.2	32.3	4.7	2.20	0.8	4.4	9.1
1.5	1.00	0.2	33.0	7.6	3.00	0.7	6.67	10.9
1.5	5.00	0.2	60.8	8.6	3.20	0.95	6.7	12.3
1.5	7.50	0.2	21.4	9.2	1.10	1.1	3.0	5.12
1.5	10.00	0.1	30.0	5.3	2.50	1.1	4.6	7.3
2.0	1.00	0.2	26.7	8.9	2.00	0.8	7.7	6.1
2.0	5.00	0.2	36.7	5.3	0.47	0.8	6.17	12.0
2.0	7.50	0.2	25.5	4.9	2.00	1.0	4.5	6.5
2.0	10.00	0.2	15.8	2.4	1.00	0.5	8.5	7.0

NOTA: FL: longitud de fibra; %F : porcentaje de fibra en la resina
 SR: velocidad de deformación
 FS, FE : esfuerzo en la fractura; deformación en la fractura
 YS, YE : esfuerzo de cedencia; deformación en la cedencia
 EM1, EM2: módulos elásticos 1 y 2

De los resultados presentados en la tabla final, se pueden elaborar gráficas comparativas entre las diferentes combinaciones. Estas gráficas nos permitirán deducir la concentración y la longitud de fibras óptimas, en donde la resistencia y el módulo elástico alcanzan un valor máximo.

Los grupos de gráficas comparativas elaboradas fueron:

-Esfuerzo en la ruptura contra % de contenido de fibra, a longitud constante.

-Módulo elástico contra % de contenido de fibra, a longitud constante.

-Esfuerzo de ruptura contra longitud de fibra, a % de contenido de fibra constante.

-Módulo elástico contra longitud de fibra, a % de contenido de fibra constante.

Cada grupo consta de cuatro gráficas, numeradas del 1 al 4.

De acuerdo con estas gráficas, los valores en los cuales tanto el módulo elástico como la resistencia mecánica alcanzan un valor máximo, son: 5 % de contenido de fibra y 1.5 cm de longitud.

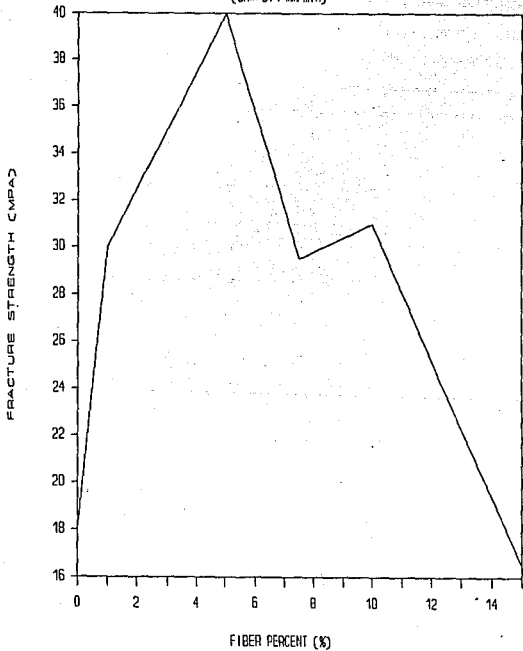
GRUPO 1

Gráficas comparativas de Esfuerzo de Ruptura contra
% de contenido de fibra a longitud de fibra constante.

- 1) Longitud de fibra = 0.5 cm
- 2) Longitud de fibra = 1.0 cm
- 3) Longitud de fibra = 1.5 cm
- 4) Longitud de fibra = 2.0 cm

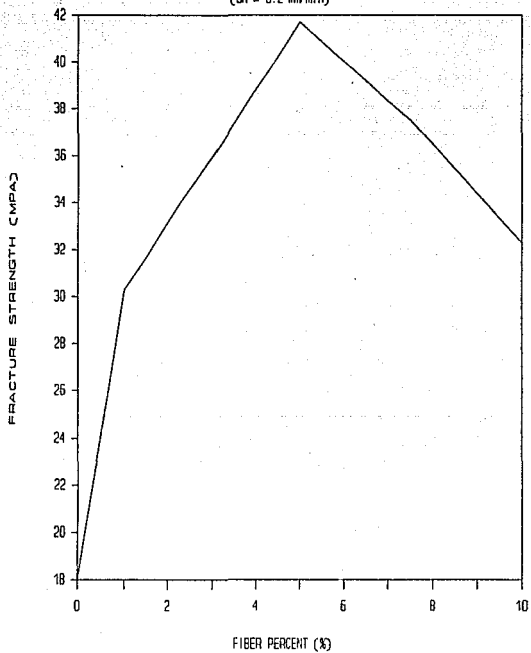
RESIN-FIBER (L= 0.5 cm)

(SR= 0.1 mm/min)



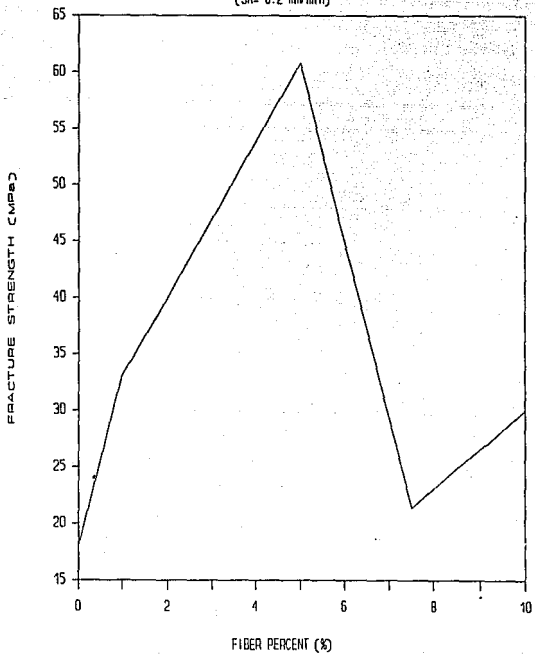
RESIN-FIBER (L= 1 cm)

(SR = 0.2 mm/min)



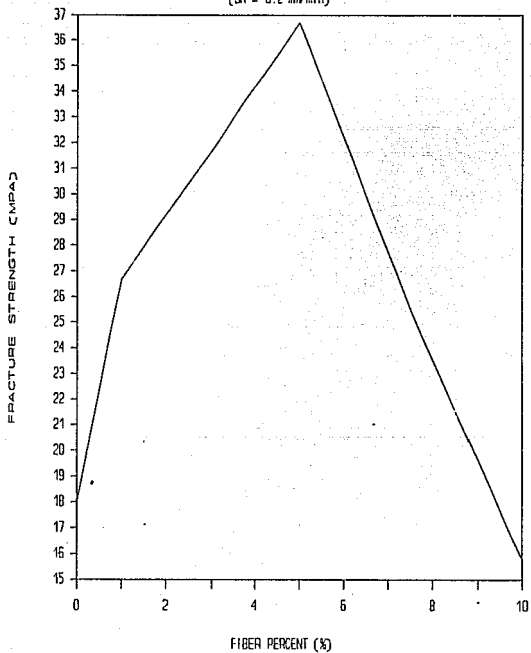
RESIN-FIBER (L= 1.5 cm)

(SR= 0.2 mm/min)



RESIN-FIBER (L= 2 cm)

(SR = 0.2 mm/min)



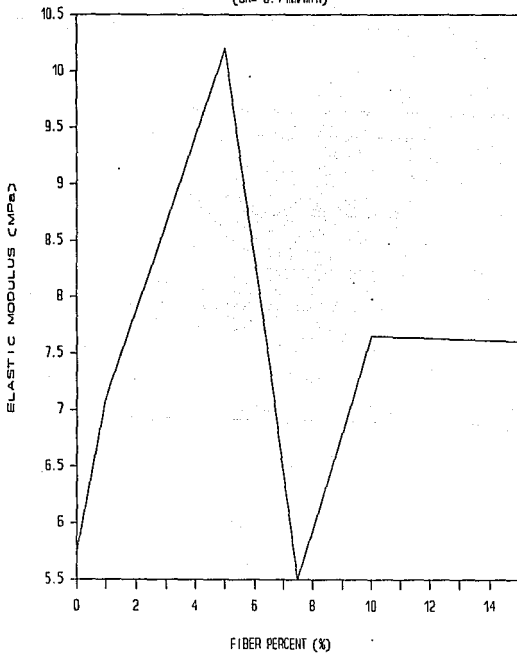
GRUPO 2

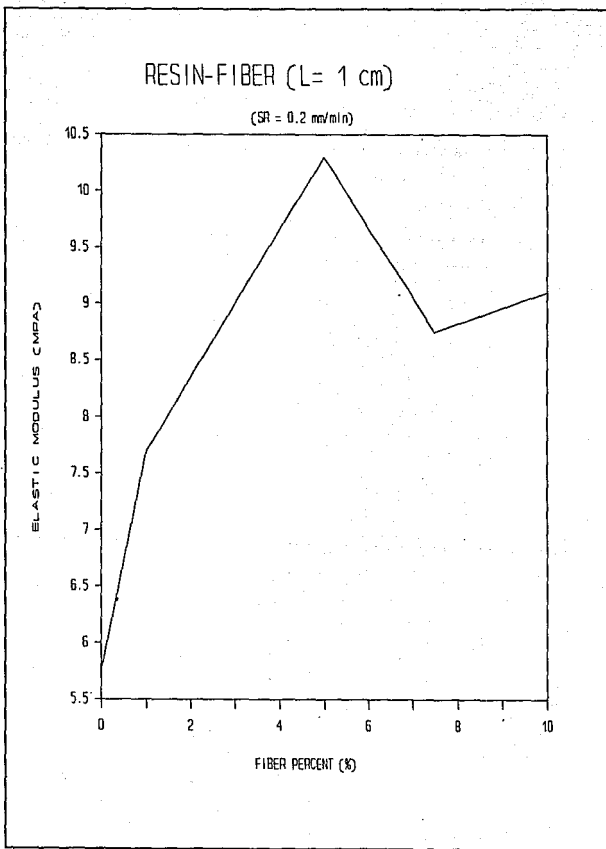
Gráficas comparativas de Módulo Elástico contra
% de contenido de fibra a longitud de fibra constante.

- 1) Longitud de fibra = 0.5 cm
- 2) Longitud de fibra = 1.0 cm
- 3) Longitud de fibra = 1.5 cm
- 4) Longitud de fibra = 2.0 cm

RESIN-FIBER (L= 0.5. cm)

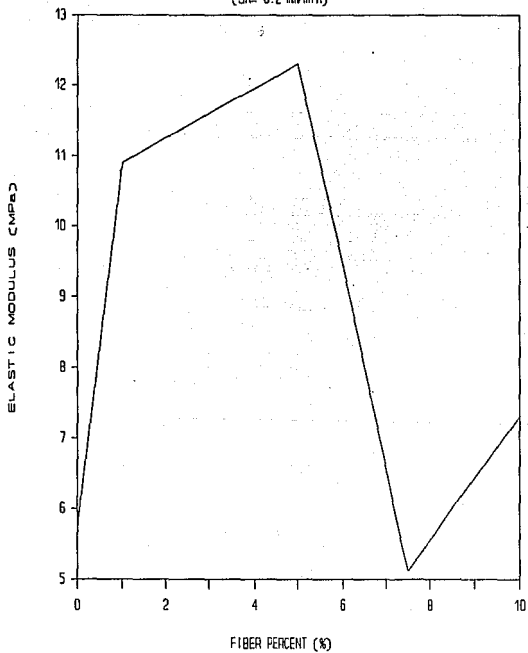
(SR= 0.1 mm/min)





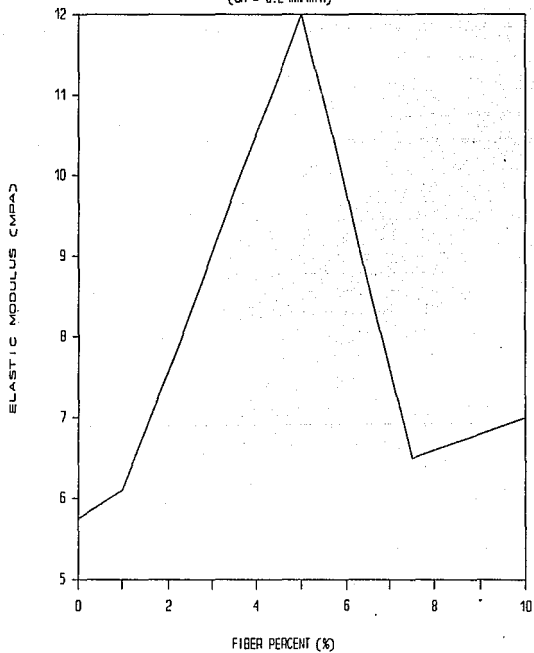
RESIN-FIBER (L= 1.5 cm)

(SR= 0.2 mm/min)



RESIN-FIBER (L= 2 cm)

(SR = 0.2 mm/min)



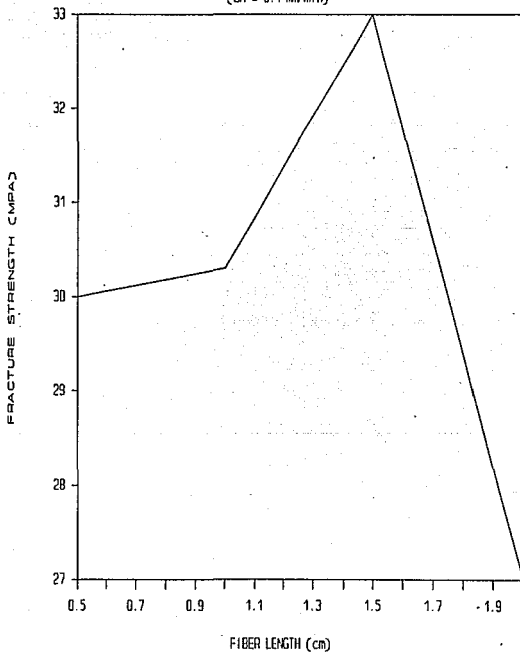
GRUPO 3

Gráficas comparativas de Esfuerzo de Ruptura contra longitud de fibra a % de contenido de fibra constante.

- 1) % de fibra = 1
- 2) % de fibra = 5
- 3) % de fibra = 7.5
- 4) % de fibra = 10

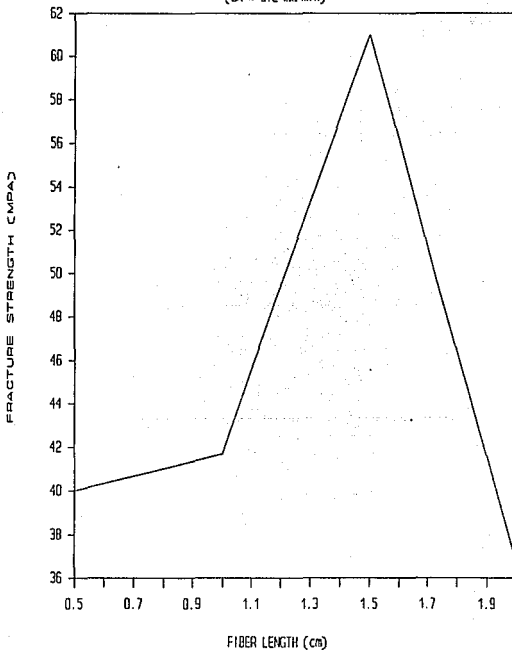
RESIN-FIBER (1 %)

(SR = 0.1 mm/min)



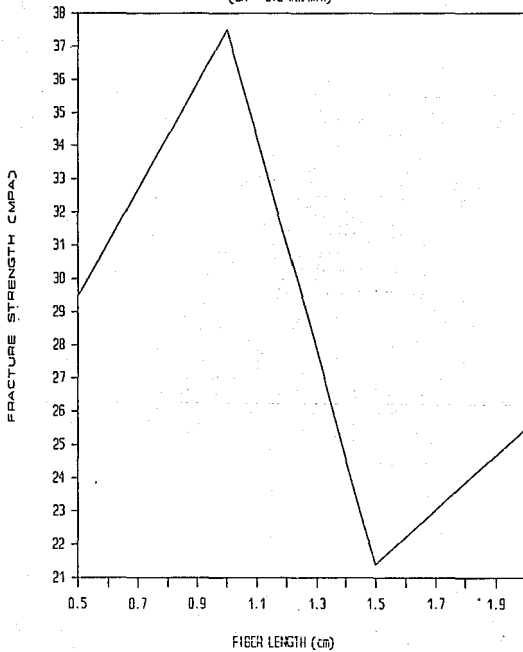
RESIN-FIBER (5 %)

(SP = 0.2 mm/min)



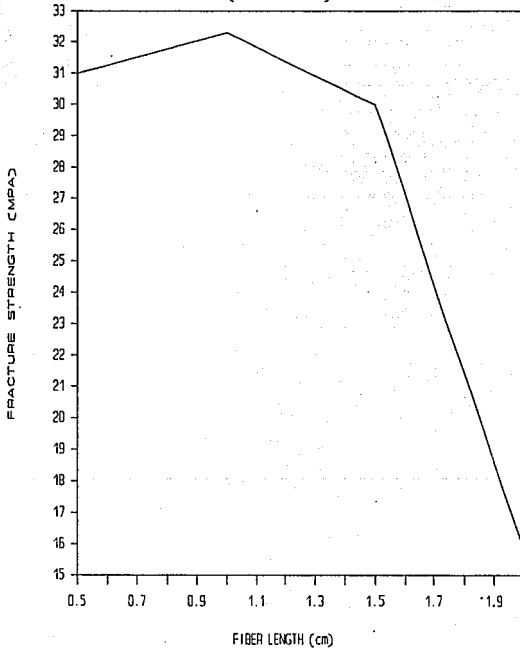
RESIN-FIBER (7.5 %)

(SR = 0.2 mm/min)



RESIN-FIBER (10 %)

(SR = 0.2 mm/min)



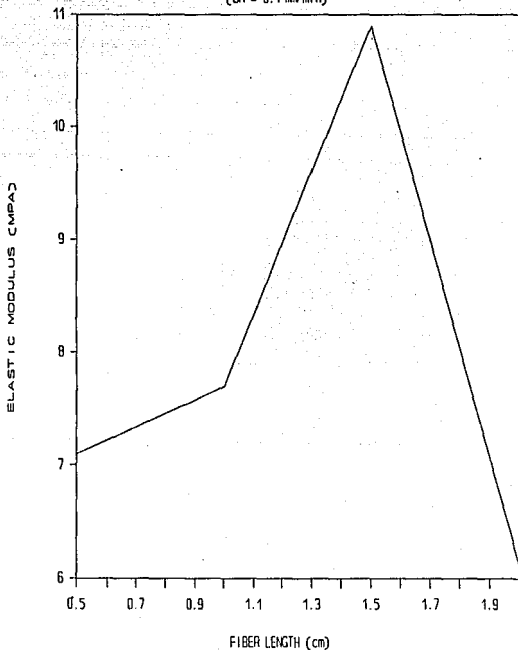
GRUPO 4

Gráficas comparativas de Módulo Elástico contra longitud de fibra a % de contenido de fibra constante.

- 1) % de fibra = 1
- 2) % de fibra = 5
- 3) % de fibra = 7.5
- 4) % de fibra = 10

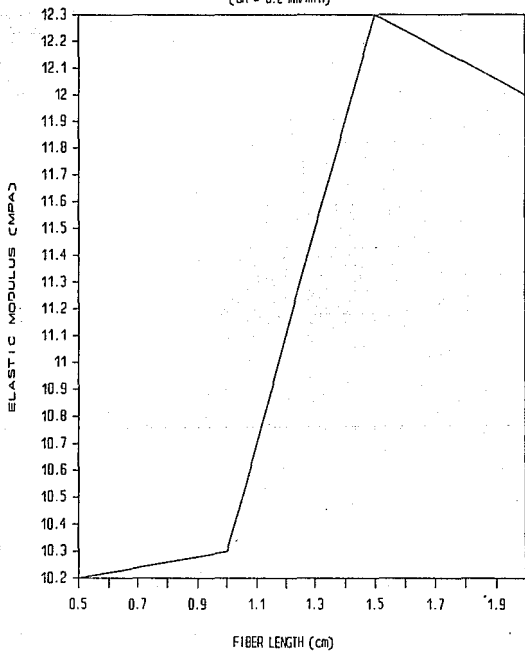
RESIN-FIBER (1%)

(SR = 0.1 mm/min)



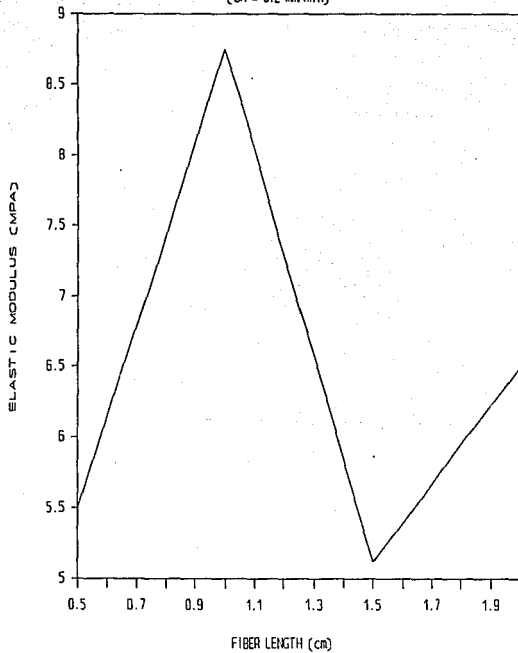
RESIN-FIBER (5 %)

(SR = 0.2 mm/min)



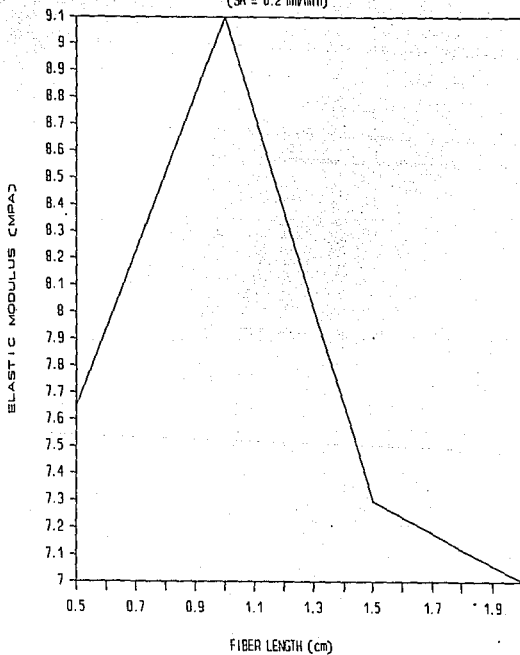
RESIN-FIBER (7.5 %)

(SR = 0.2 mm/min)



RESIN-FIBER (10 %)

(SR = 0.2 mm/min)



4.2 RESULTADOS DE ENSAYO DE PICNOMETRIA

Una vez realizadas las pruebas de tensión y de observarse que los compósitos muestran un aumento en la resistencia a la tensión en las muestras que contienen alrededor de 5% en fibra, se tomó ese pequeño grupo de muestras para realizar el estudio de comportamiento de su densidad.

De cada tipo de compósito con diferente longitud y porcentaje de fibra, una vez que se tenía su caracterización mecánica, se tomaron 4 pequeños fragmentos diferentes y a continuación se pesaron con extremo cuidado en una balanza analítica, después de esto, con la ayuda de el picnómetro antes descrito se obtuvieron las presiones necesarias para la utilización de la correlación correspondiente para el cálculo de el volumen de cada pequeña muestra.

La siguiente tabla nos muestra las combinaciones de tamaño y % de fibra que se utilizaron.

% fibra	long. fibra (cms.)	% fibra	long. fibra (cms.)
5%	0.5	10	0.5
5%	1.0	10	1.0
5%	1.5	10	1.0

7.5	0.5
7.5	1.0
7.5	1.5

Las tablas que se presentan a continuación son un ejemplo de los datos que se obtuvieron en cada muestra sometida a el ensayo de picnometría, además se mencionan las constantes necesarias en el cálculo de los volúmenes de las muestras.

$$V_{muestra} = V_{celda} - \frac{V_{exp}}{\frac{P1}{P2} - 1} \quad (cc)$$

P1 y P2 dadas en atmósferas.

Vcelda = 8.086 cc Vexp = 6.111 cc obtenidos en la maquina por calibración con volúmenes conocidos.

MUESTRAS CON FIBRA DE 0.5 cms. DE LONGITUD

Contenido de fibra 5% Peso de la muestra = 0.4866 g

P1	P2	VOLUMEN
19.6	10.938	0.3692
19.66	10.974	0.3652
19.649	10.967	0.3666
19.642	10.961	0.3699
19.593	10.935	0.3678
19.62	10.949	0.3695

Volumen promedio = 0.3680 cc

masa 0.4866 g

Densidad = $\frac{\text{masa}}{\text{vol.}}$ = $\frac{0.4866 \text{ g}}{0.368 \text{ cc}}$ = 1.322 g/cc

vol. 0.368 cc

Contenido de fibra 5% Peso de la muestra = 0.5921 g

P1	P2	VOLUMEN
19.626	10.898	0.4556
19.576	10.871	0.4544
19.601	10.883	0.4571
19.631	10.901	0.4552
19.59	10.876	0.4580
19.618	10.892	0.4581

Volumen promedio = 0.4564 cc

Densidad = 1.2973 g/cc

Contenido de fibra 5% Peso de la muestra = 0.6044 g

P1	P2	VOLUMEN
19.605	10.888	0.453
19.565	10.869	0.447
19.611	10.894	0.448
19.624	10.901	0.449
19.584	10.875	0.455
19.599	10.887	0.449

Volumen promedio = 0.4505 cc

Densidad = 1.3416 g/cc

Contenido de fibra 5% Peso de la muestra = 0.6136 g

P1	P2	VOLUMEN
19.585	10.867	0.4686
19.600	10.876	0.4675
19.581	10.863	0.4714
19.630	10.886	0.4748
19.613	10.887	0.4773

Volumen promedio = 0.4719 cc

Densidad = 1.3002 g/cc

En resumen, a este compósito se obtuvieron los siguientes valores de volumen y densidad:

Muestra	masa	volumen	densidad
1	0.4866	0.3680	1.322
2	0.5921	0.4564	1.2973
3	0.6044	0.4505	1.3216
4	0.6136	0.4719	1.3002

DENSIDAD PROMEDIO = 1.3152

A cada uno de los diferentes compósitos de la tabla de las combinaciones de tamaño-porcentaje se les realizó el mismo tratamiento, como resultado de ello presentamos la siguiente tabla 4.2.1, que resume los valores obtenidos de volumen y densidad.

TABLA 4.2.1

tamaño	0.5 cms	1.0 cms	1.5 cms
5	1.315	1.317	1.312
7.5	1.295	1.295	1.290
10	1.272	1.263	1.268

TRATAMIENTO

La gráfica 4.2.1 nos muestra claramente la tendencia de los resultados.

Ya sabemos que estos compósitos fueron los que mayor reforzamiento tuvieron y por lo tanto los que mayor resistencia a la tensión presentaron, ahora observamos que, como es de esperarse, a medida que aumenta la cantidad de fibra en los compósitos, sucede que ocurre una disminución en el peso de la mezcla y por lo tanto existe una disminución también en la densidad. Aunque los valores no son muy marcados, si es posible observar la tendencia en la gráfica.

Por otro lado si observamos los puntos de la gráfica en forma vertical, es decir, tomando % de fibra constante, observamos que también disminuye la densidad, esto se debe a que al aumentar el tamaño de la fibra, el compósito ocupa más espacio, aunque pesan igual, la densidad se ve afectada pues el cociente masa sobre volumen disminuye su valor. Es obvio que la fibra ocupa más volumen si está cortada en trozos de longitud grande, que si está cortada en trozos de longitud pequeña y como consecuencia el volumen del compósito aumenta también.

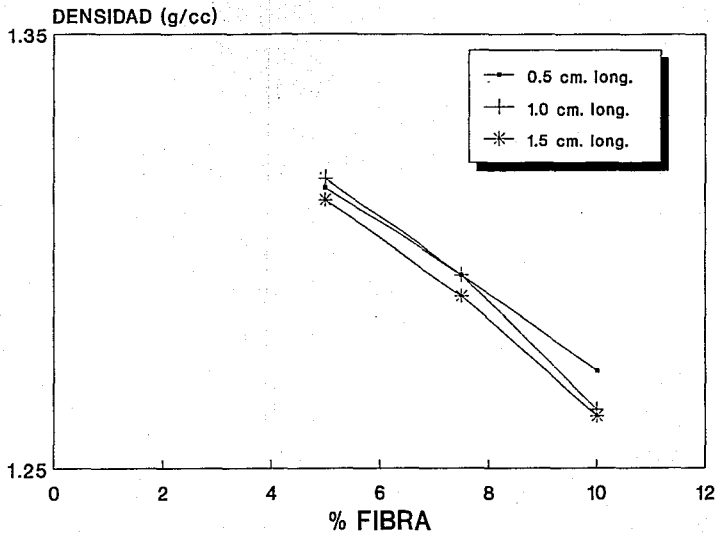


FIG. 4.2.1 DENSIDAD DE COMPOSITES

5) CONCLUSIONES

El hecho de que en la gráfica de esfuerzo contra deformación, en el caso de la resina pura, se presenten dos diferentes zonas elásticas, se debe a la existencia tanto de enlaces secundarios como de entrecruzamientos. Como se mencionó en las bases teóricas, las cadenas poliméricas de la matriz se encuentran unidas mediante enlaces secundarios (débiles) o fuerzas de Van der Waals, los cuales desaparecen cuando la temperatura del polímero es superior a la Tg. El valor de Tg para la resina poliéster es de aproximadamente 67°C, y la temperatura de trabajo fue la ambiente, es decir, alrededor de 21°C, por lo que la resina siguió teniendo dichos enlaces secundarios. Al someter a la resina a alguna carga, son precisamente estos enlaces débiles los que se "estiran" primero, produciendo un comportamiento elástico. Esta primera zona lineal está caracterizada por un módulo 1. Cuando la carga aplicada es tal que rompe los enlaces secundarios, el módulo disminuye su valor considerablemente, lo cual se observa en la gráfica como una zona de pendiente cero.

Una vez que han desaparecido los enlaces secundarios, las cadenas poliméricas continúan unidas gracias a los entrecruzamientos. Al seguir aumentando la carga, dichos entrecruzamientos son los que ahora se estirarán. Esto se refleja

en una nueva zona elástica en la gráfica, la cual, sin embargo, es no lineal. Esta segunda zona elástica está caracterizada por un módulo 2, el cual se obtiene considerando como lineal el comportamiento de los primeros puntos de la gráfica en esta zona. Debido a que los entrecruzamientos son enlaces fuertes, es decir, más rígidos, el módulo 2 tiende a ser mayor que el módulo 1.

Al analizar la gráfica de inverso del módulo contra por ciento de deformación para esta segunda zona, puede observarse que, aunque se tiende a alcanzar un máximo, nunca se llega a éste. Esto indica que no existe zona plástica en la resina, es decir, se comporta siempre elásticamente (aunque sea no lineal) hasta el punto de ruptura.

En los compósitos elaborados persiste el comportamiento mencionado anteriormente (el de presentar dos zonas elásticas), siempre y cuando la concentración de la fibra sea menor al 15 % en peso. Sin embargo, analizando la segunda zona elástica encontramos que, a diferencia de la resina sola, los compósitos sí presentan un aparente punto de cedencia, de acuerdo a las gráficas de $1/E$ contra % de deformación, en donde se alcanza un máximo que indica una notable caída en el valor del módulo. Esta característica es muy notable puesto que ni la resina ni la fibra presentan, por sí solas, deformación plástica, solamente el compósito. Esto es debido, probablemente, al aumento en la tenacidad del material, el cual se produce por una mayor absorción de energía. Como se

mencionó anteriormente en las bases teóricas, los pedacitos de fibra dentro de la matriz tienden a desplazarse cuando se aplica la carga, debido a que absorben energía del medio, lo que se refleja en un aumento en la tenacidad del material (capacidad de absorber energía antes de la fractura). El desplazamiento de los pedacitos de fibra es permanente, por lo que se produce un aparente punto de cedencia o deformación permanente en el compósito.

Los pedacitos de fibra comienzan a moverse a valores bajos de carga, lo que se manifiesta en un punto de cedencia bastante bajo (en deformaciones inferiores al 1 % y esfuerzos inferiores a 1 MPa). Sin embargo, al aumentar la longitud de los pedacitos de fibra, el movimiento de éstos tiende a disminuir. Entonces la fibra, al no desplazarse tanto, tiende a soportar más la carga aplicada. Al llegar al valor óptimo en la longitud de fibra, el movimiento se hace casi nulo y la fibra tiende a soportar toda la carga, rompiéndose finalmente a la mitad de su longitud en el punto de fractura de la fibra. Esto puede observarse en el aumento en el valor del punto de cedencia al incrementarse la longitud de la fibra.

Cabe señalar que a un contenido mayor que el 15 % de fibra el compósito tiende a comportarse prácticamente como si fuera fibra sola. Debido a esto, desaparece la primera zona elástica característica de la resina y puede observarse una curva prácticamente lineal. En la gráfica de $1/E$ contra % de

deformación, se observa que la curva no alcanza nunca un valor máximo, sino que tiende a mantenerse constante. Esto indica que el módulo (es decir, la pendiente) tiende a mantenerse constante, por lo que el comportamiento será elástico hasta la ruptura y no existirá punto de cedencia. El comportamiento anterior es típico de la fibra sola, es decir, de un material rígido que se fractura antes de deformarse plásticamente.

Otro cambio notable en los compósitos, respecto a la matriz, es la elasticidad, la cual disminuye considerablemente en los compósitos. Mientras que en la resina se obtuvieron deformaciones de entre 20 y 24 %, en los compósitos las deformaciones disminuyeron hasta valores inferiores al 9 %. Esto se debe a la presencia de la fibra, la cual es mucho más rígida que la resina. El aumento en la rigidez del material se manifiesta en un aumento en el valor del módulo elástico. Al aumentar el porcentaje de fibra en la resina, el valor del módulo se va incrementando hasta un valor máximo, luego del cual comienza a disminuir. Lo mismo ocurre si se incrementa la longitud de la fibra.

Respecto a la resistencia mecánica del compósito, se analizaron los esfuerzos correspondientes a la ruptura del material en vez de los esfuerzos correspondientes a la resistencia máxima a la tensión, ya que son muy parecidos. Esto se debe a que, al ser la resina un material mucho más rígido que un hule, no presenta punto de cedencia, por lo que el punto de máxima resistencia y el punto

de fractura son prácticamente los mismos. Esto puede observarse en las gráficas, en donde al alcanzar el esfuerzo un valor máximo, el compósito se fractura en ese mismo valor, aunque a una deformación mayor.

El análisis de los puntos de ruptura, muestra que al aumentar la concentración de la fibra y su longitud, se tiende a alcanzar un máximo, en cuanto a resistencia del material.

Tanto en el caso del módulo como en el de la resistencia mecánica, los valores óptimos de contenido y longitud de fibra fueron de 5 % y 1.5 cm. En este compósito, el módulo aumentó a más del doble respecto a la resina sola (de 5 a 12 MPa), y el punto máximo de resistencia aumentó en más del triple del valor de la resina (de 18 a 61 MPa). Como puede notarse, el aumento en la rigidez y la resistencia mecánica del material son considerables. Obviamente son necesarias más pruebas para obtener una caracterización más detallada del material, como lo son pruebas de compresión, dureza y resistencia al impacto, pero con los resultados obtenidos puede establecerse un primer juicio en la selección del material.

Cabe mencionar que al aumentar la cantidad de fibra en el compósito, la densidad disminuye, por lo que el material se vuelve más ligero. Este aumento en la ligereza del material lo hace atractivo en diversas aplicaciones.

De igual manera, la explicación exacta del comportamiento del material requiere de un análisis más detallado, lo cual implica analizar propiedades de interfase. El resultado de un análisis como éste se tendría que expresar como un modelo matemático que represente el comportamiento del material, lo cual, sin embargo, está fuera del alcance de este trabajo.

Finalmente, hay que señalar que los factores externos influyen de manera notable en los experimentos y nuestro caso no fue la excepción. La temperatura es un factor determinante en el comportamiento del material analizado, y pequeñas variaciones alteran notablemente los resultados. En nuestro caso, se trabajó en un sótano donde la temperatura no varía mucho, lo que da una mayor confiabilidad a los experimentos, aunque no están exentos de errores. También la manipulación experimental produce errores en la elaboración de las muestras. De hecho, es difícil elaborar muestras exactamente iguales; tanto las dimensiones como el contenido de fibra varían, en mayor o menor proporción, en cada muestra. Esto implica una mayor cantidad de experimentos, para tratar de mejorar tanto el sistema de elaboración de muestras como el de pruebas.

En el caso específico de la máquina de pruebas mecánicas, existen varios factores que alteran los resultados. Uno de los más importantes es la velocidad de deformación. Aunque no fue uno de los objetivos de la tesis, se probaron diferentes velocidades a

fin de encontrar la más adecuada. Al aumentar la velocidad de deformación, la muestra se rompe a una carga menor. Esto se debe a una propagación más rápida de las fracturas del material, producida por el estiramiento repentino. Se recomienda entonces trabajar a bajas velocidades, de tal forma que las muestras se rompan por el efecto de la fuerza aplicada y no por fracturas prematuras.

Existen desde luego una serie de variables a analizar con más detenimiento, principalmente aquellas relativas a la comparación de los compósitos con fibra continua y los compósitos con fibra discontinua (que fueron elaborados en esta tesis). Entre estas variables a comparar está la anisotropía, la cual debe disminuir en los compósitos con fibra discontinua, ya que éstos tienden a comportarse más homogéneamente, debido a que existe una mejor distribución de los pedacitos de fibra. El ordenamiento unidireccional, conseguido con la utilización de fibras continuas, proporciona un óptimo en resistencia mecánica en esa dirección, el cual generalmente es mayor que si se utilizan fibras discontinuas. Sin embargo, las fibras discontinuas proporcionan una resistencia más o menos igual en todas direcciones.

Esta capacidad de las fibras discontinuas para homogeneizar las propiedades de una matriz, es similar a lo que producen las "cargas" en una resina. Las cargas son partículas sólidas que, al mezclarse con la resina, aumentan su resistencia y consistencia.

Debido a que la resina utilizada en esta tesis es una resina comercial (Resina M-70), una aplicación inmediata de los compósitos sería la de utilizarlos como materiales de moldeo, ya que la fibra actúa similar a una carga. Entonces, se pueden elaborar artículos decorativos, usando los moldes adecuados, y figuras en general, las cuales tendrán una buena resistencia, ligereza (debido a que la densidad disminuye con la fibra) y rigidez.

Otra de las aplicaciones inmediatas de estos compósitos, sería su uso como materiales para recubrimiento, por ejemplo, en muebles (mesas, libreros, repizas, etc.), lanchas, carrocerías, etc. Su bajo costo (ya que la fibra natural no es cara), buena resistencia, ligereza y rigidez, hacen que este material sea lo suficientemente atractivo para ser tomado en cuenta. Inclusive pueden elaborarse recubrimientos hechos completamente por estos compósitos, tales como casetas, cubiertas de refrigeradores, carcazas de computadoras, partes de automóvil, etc. Nuevamente, propiedades tales como el bajo costo, ligereza, resistencia y rigidez, son adecuadas para estas aplicaciones.

Lógicamente, debe hacerse un análisis mucho más riguroso para saber qué tan conveniente es este material. Deben combinarse aspectos económicos, técnicos, de disponibilidad, etc. Finalmente, como se mencionó al principio de este trabajo, es precisamente esta adecuada combinación de propiedades lo que hace a un material

aplicable. Sin embargo, con este trabajo hemos abierto una posibilidad más, y esperemos que en un futuro logre cristalizar.

6) REFERENCIAS

- (1) Ashby, M. F. & Jones, D.R. Engineering Materials : An introduction to Microestructures, Processing and Design. V.2 Ed. Pergamon Press. Great Britain, 1986.
- (2) Guy, A.G. Fundamentos de Ciencia de Materiales. Ed. McGraw Hill. México, 1981.
- (3) Kennan-Kleinfelter-Wood. Química General Universitaria. Ed. Continental. México, 1987.
- (4) Morrison & Boyd. Química Orgánica. Ed. Addison Wesley - Iberoamericana. México, 1987.
- (5) Rosillo, J.A & Trejo A. Vaciados y encapsulados. Ed. Poliformas, S.A. México, 1985.
- (6) Manual de experimentos de Química Orgánica II (1405). Departamento de Química Orgánica y Aplicada. Facultad de Química, U.N.A.M., 1990.
- (7) Roux L., J. " Estudio morfológico de la epidermis de algunas xerofitas mexicanas ". México, 1964.

- (8) Sherry, R.W. Plantas Útiles al hombre.
Ed. Salvat. España, 1964.
- (9) Sánchez, Hugo. " Desarrollo de materiales compuestos a base de polímeros con fibras naturales como refuerzo ".
Trabajo final. Instituto de Física, U.N.A.M.
México, 1991.
- (10) A.S.T.M. Norma: D 1708-84
Standard test method for tensile properties of plastics by use of microtensile specimens.
- (11) Ashby, M.F. & Jones, D.R. Engineering Materials : An introduction to their properties and applications. V.1
Ed. Pergamon Press. Great Britain, 1980.
- (12) Hayden, W., Moffat, W. & Wulff, J. Structure properties of materials : Mechanical behavior. V.3
Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1965.
- (13) Trejo O'Reilly, José Antonio.
" Propiedades de películas de polímeros funcionalizados del sistema estireno-acrilato de butilo-ácido metacrílico. "
Tesis para obtener el título de Químico.
Facultad de Química, U.N.A.M., 1991.

- (14) Instruction Manual Multivolume Pycnometer 1305. Apéndice 1.
U.S.A., 1987.
- (15) Craig, Barret. The principles of engineering materials.
Ed. Prentice Hall. U.S.A., 1973.
- (16) Tsai, S. & Hahn T. Introduction to composite materials.
Ed. Technomic. U.S.A., 1980.
- (17) Springer, G. Enviromental effects on composite materials.
V.1. Ed. Technomic. U.S.A., 1988.
- (18) Springer, G. Enviromental effects on composite materials.
V.3. Ed. Technomic. U.S.A., 1988.
- (19) Talreja, Ramesh. Fatigue of composite materials.
Ed. Technomic. U.S.A., 1987.
- (20) Proceedings of International Symposium on Composite
materials and structures. The Chinese Society of theoretical
and applied mechanics, American Astronautical Society,
European Association for Composite Materials.
Ed. Technomic. U.S.A., 1986.
- (21) Hausner, H. Modern Materials : Advances in development and
applications. V.1. Ed. Academic Press. U.S.A., 1958.

- (22) Granet, Irving. Modern Materials Science.
Ed. Prentice Hall. U.S.A., 1980.
- (23) Callister, William D. Materials science and engineering : An
introduction. Ed. John Wiley and Sons. U.S.A., 1985.
- (24) Delighton, M. Introduction to materials science.
Oxford University. 1978.
- (25) Hull, D. Materiales Compuestos.
Ed. Reverté. España, 1987.
- (26) Saloma Robles, Luis Daniel. " Diseño de equipo para la
industria en poliéster reforzado con fibra de vidrio ".
Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico.
Facultad de Química, U.N.A.M., 1969.
- (27) Rodríguez Navarro, Armando Javier. " Monografía de Resinas
epóxicas ".
Monografía para obtener el título de Ingeniero Químico.
Facultad de Química, U.N.A.M., 1972.
- (28) Serrano, Carlos. " Tendencias en el campo de los plásticos
reforzados ". Tecnología del Plástico - Edición 45.
Ed. B.P.A. Octubre - Noviembre 1992. Págs. 5-6.