



Universidad Tecnológica de Campeche

**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO MATRIZ
POLIMÉRICA REFORZADO CON FIBRA NATURAL DE YUTE EN SUSTITUCIÓN
DE LA FIBRA DE VIDRIO PARA LA FABRICACIÓN DE PALAS Y ALABES DE
AEROGENERADORES**

Autor: Rubén Joaquín Cetina Abreu.

Directores de tesis:

C. Dr. Pedro Sánchez Santiago.

Dr. Emilio Álvarez García

RESUMEN

El presente trabajo centra su atención en el estudio de los materiales compuestos, específicamente de matriz polimérica reforzados con fibras naturales y fibras de vidrio. Se hace énfasis principalmente en sus propiedades físico - mecánicas, y de refuerzo para su posible sustitución parcial por fibras de yute. En este sentido se desarrolla y caracteriza un material plástico matriz poliéster reforzado con fibras de yute en sustitución parcial de las fibras de vidrio que garantiza las requeridas propiedades físico mecánicas de estos tipos de materiales

Se estudia además las características constructivas de las turbinas de viento, teniendo en cuenta los principales materiales que se utilizan en la fabricación de las palas de los aerogeneradores y las propiedades que estos deben tener para funcionar correctamente, así como la posibilidad de utilizar estas tecnologías de producción de energía limpia en el país. Finalmente se obtiene la caracterización de materiales compuestos matriz polimérica mediante la aplicación del método de diseño de experimentos de mezclas lo cual permitió estudiar, y caracterizar el comportamiento de las propiedades físico mecánicas del material desarrollado.

Con formato: Fuente:
(Predeterminado) Arial

ABSTRACT

This paper focuses on the study of composite materials, specifically polymer matrix reinforced with natural fibers and glass fibers. The emphasis is primarily on their physical - mechanical properties, and reinforcement for possible partial substitution of jute fibers. In this sense it is developed and characterized a plastic material matrix reinforced polyester jute fibers partially replace glass fibers ensures the required physical and mechanical properties of these types of materials

Also studied the structural characteristics of the wind turbines, taking into account the main materials used in the manufacture of turbine blades and the properties that they should be given to function properly, and the ability to use these technologies clean energy production in the country.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Cada vez es mayor el conocimiento que mundialmente se tiene de la necesidad de nuevos materiales, para satisfacer las necesidades de la ampliación de los niveles poblacionales, y de sus demandas. Haciendo un poco de historia para el año 1830 había alrededor de 1 billón de habitantes en la tierra, y para el año 1930 esta cantidad ya se había duplicado. Mientras en un pasado fue necesario que transcurrieran 100 años para incrementar la población en un billón de personas recientemente se ha demostrado que solamente se necesitan once lustros para alcanzar la misma cifra. Con estos incrementos incesantes y atropellados de la población mundial, se hace necesario incrementar los niveles de producción de materiales para satisfacer la también creciente demanda de estos.

Teniendo en cuenta que los recursos cada vez son menos y que nuestro ambiente está cada vez más deteriorado, debido a su explotación irracional; la humanidad se debate en el dilema de encontrar alternativas que garanticen cubrir las necesidades existentes con el menor daño posible al entorno en que vivimos.

Así desde hace varias décadas se trabaja incesantemente en el desarrollo de nuevos materiales que sean capaces de sustituir total o parcialmente los ya existentes y que cumplan además con la misma función que sus predecesores. En estos momentos es totalmente posible desarrollar nuevos materiales compuestos combinando diferente recursos. Es factible combinar, mezclar o alear agro-fibras con materiales como el vidrio, el plástico, los metales etc., con el objetivo de obtener nuevos compuestos con mejores propiedades físico - mecánicas, estéticas etc., que sus predecesores en su forma simple.

Una gran tendencia fue la de obtener fibras sintéticas a partir del vidrio, el carbono etc., para utilizarla como refuerzo en los materiales plásticos y así mejorar sus

propiedades. Es cierto que esto fue y se mantiene siendo un gran avance de la ciencia moderna ya que se continua trabajando en la obtención de estos tipos de fibras cada vez con mejores propiedades, pero aún no están disponible para todos los países debido a sus altos costos de producción, y sus desechos suelen ser bastante nocivos para el medio, es por eso que se continua trabajando en la obtención de fibras menos costosas y de producción más limpia.

Una de las mayores áreas de investigación en este campo son los materiales termoplásticos reforzados con fibras naturales, o sea materiales matriz polimérica a base de resinas de todo tipo entiéndase Poliéster, polipropileno, poli estireno, etc. reforzadas con una amplia gama de fibras de obtención natural tales como el bagazo, el Kenaf, el sisal, el coco, el yute etc., en sustitución de las convencionales fibras de vidrio, carbón y aramidas, lo cual trae consigo además de la considerable disminución de emisión de gases a la atmósfera como consecuencia de la obtención de estas últimas, y la disminución de la emisión de desechos sólidos al medio que en ocasiones no son degradables, un aumento de las fuentes de empleo para los países de bajo desarrollo, y de las posibilidades de utilizar estas tecnologías que suelen ser menos costosas y complejas de emplear.

Siguiendo esta línea de trabajo y teniendo en cuenta las potencialidades que en nuestro país existen, en cuanto a la producción de las fibras naturales antes mencionadas, en este trabajo abordaremos el uso de las fibras de yute como refuerzo en un material matriz poliéster, en sustitución parcial de las fibras de vidrio que tan costosas son a nivel mundial, para emplearlo en la producción futura de paletas para las turbinas de viento.

El uso de las turbinas de viento o aerogeneradores como se les conoce comúnmente, en nuestro país se presenta como una de las alternativas fundamentales para la producción de energía limpia, pero estas en el mercado mundial paseen valores muy elevados, y uno de los aspectos que influyen en estos altos costos es, el material con el cual se construyen, las paletas, por lo general

plásticos reforzados con fibras de vidrio, carbono u otras fibras sintéticas. El uso de las fibras naturales puede ser una alternativa para disminuir el costo de producción de estas paletas y así hacer estas tecnologías más asequibles a países de bajo desarrollo. El fruto de la labor desarrollada en esta dirección, y en particular sobre la obtención de un nuevo material capaz de sustituir los que tradicionalmente se emplean en la fabricación de las paletas de los aerogeneradores, se plasman en el presente trabajo.

El problema científico de esta investigación consiste precisamente en que los costos de los materiales para fabricar las paletas de las turbinas de viento son demasiado altos, por lo que a los países de bajo desarrollo, necesitados de emplear estas tecnologías prácticamente se les hace imposible. Por otro lado la tendencia actual es a producir turbinas de mayor tamaño y más eficiente y por ende más costosas

Para darle solución a este problema se parte de la hipótesis siguiente:

Es posible desarrollar un material compuesto matriz poliéster, reforzado con fibras de yute en sustitución parcial de las fibras de vidrio, que sea capaz de cumplir con las exigencias desde el punto de vista de sus propiedades físico - mecánicas, para emplearlo en la fabricación de palas para las turbinas de viento.

Objetivo general

Desarrollar y caracterizar un material compuesto matriz poliéster, reforzado con fibras de yute en sustitución parcial de las fibras de vidrio, capaz de cumplir con las exigencias desde el punto de vista de sus propiedades físico - mecánicas, y que satisfaga las condiciones de explotación de las palas de los aerogeneradores.

Objetivos específicos:

1. Analizar los materiales compuestos matriz polimérica, reforzados con fibras naturales, y fibras de vidrio referidos en la literatura desde el punto de vista de sus propiedades físico - mecánicas, y sus costos en el mercado mundial.
2. Hacer un estudio de las características constructivas de los aerogeneradores más empleados mundialmente, los materiales más utilizados en su fabricación y de sus posibilidades de producción y empleo en nuestro país.
3. Desarrollar y caracterizar un material compuesto matriz poliéster reforzado con fibras de yute en sustitución parcial de las fibras de vidrio para emplearlo en la fabricación de las palas de los aerogeneradores, realizando los experimentos necesarios para obtener las características mecánicas de estos materiales.

Novedad científica de la investigación:

Obtención de un nuevo material compuesto matriz poliéster reforzado con fibras de yute en sustitución parcial de las fibras de vidrio que satisface las propiedades físico mecánicas y los requerimientos de materiales de este tipo y las exigencias de los empleados en la fabricación de las palas de las turbinas de viento.

Valor teórico de la investigación

Se establece la influencia de las fibras de yute en sustitución parcial de las fibras de vidrio sobre las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster.

Se brindan las ecuaciones de regresión que permiten valorar el comportamiento de las propiedades mecánicas de del material compuesto matriz poliéster reforzado con fibras de yute y fibras de vidrio.

Valor práctico de la investigación

Considerable ahorro económico por concepto de sustitución de las fibras de vidrio por la fibra de yute.

Estructura de la tesis

La tesis está conformada por tres capítulos, conclusiones y recomendaciones. El primer capítulo se dedica al estado del arte del desarrollo de materiales compuestos matriz polimérica reforzados con fibras naturales y fibras de vidrio enfatizando en los principales tipos de las fibras antes mencionadas que se utilizan como refuerzo, así como en las propiedades mecánicas y costos de estas.

En el segundo capítulo se establecen los materiales y métodos para la obtención y desarrollo del material para la fabricación de palas y alabes de aerogeneradores tanto de ejes horizontal como vertical. En este capítulo se establece el método de obtención de los materiales compuestos rellenos con productos importados y los de obtención nacional y se estudia cómo influyen las diferentes concentraciones de los diferentes rellenos en las propiedades físico-mecánicas de los materiales desarrollados. Se establece el método de obtención de los materiales compuestos rellenos con productos importados y los de obtención nacional y se estudia cómo influyen las diferentes concentraciones de los diferentes rellenos en las propiedades físico-mecánicas de los materiales desarrollados.

En el tercer capítulo se realiza el análisis y discusión de los resultados experimentales del nuevo material compuesto matriz poliéster reforzado con fibras de yute en sustitución parcial de las fibras de vidrio que garantiza las propiedades mecánicas requeridas para su utilización en la producción de las palas y alabes del rotor de aerogeneradores, además se proponen las ecuaciones de regresión que permiten valorar las propiedades mecánicas del material antes mencionado, y nomograma de comportamiento de las variables objeto de estudio, que permite seleccionar el material idóneo para tales aplicaciones.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE DE LOS MATERIALES COMPUESTOS MATRIZ POLIMÉRICA

2.1 - MATERIALES COMPUESTOS

La utilización de materiales compuestos en el diseño de elementos de máquinas se ha incrementado notablemente en los últimos años. Esta tendencia obedece a la posibilidad de diseñar el material con ciertas propiedades especiales y con ello conseguir cualidades mecánicas y superiores a los materiales tradicionales. Los materiales compuestos presentan una favorable relación resistencia-peso y rigidez-peso, son resistentes a la corrosión, térmicamente estables y resultan especialmente adecuados para estructuras en las que el peso constituye una variable fundamental en el proceso de diseño. Los componentes estructurales que requieren gran rigidez, resistencia a los impactos, formas complejas y considerable volumen de producción resultan ideales para ser fabricados a partir de materiales compuestos. Por ello, su utilización en la fabricación de piezas para la industria aeronáutica, aeroespacial, naval y de automóviles se ha extendido en los últimos años.

Entre las dificultades que se encuentran para la utilización de los materiales compuestos con fines estructurales está la falta de tecnología para garantizar las uniones entre piezas y también la dificultad de realizar un diseño fiable, pues las técnicas analíticas convencionales utilizadas para el estudio de materiales tradicionales no resultan adecuadas para el análisis de materiales compuestos. Hay también ciertas incertidumbres sobre la durabilidad y el envejecimiento de estos materiales que hace necesarios los estudios que garanticen la integridad de los mismos al cabo de un largo período de utilización. Tampoco ha resultado del todo satisfactoria la representación de un compuesto mediante un único material ortótropo con propiedades del conjunto, sobre todo cuando el comportamiento de al menos uno de sus componentes ha superado el límite de elasticidad.

Desafortunadamente no existe una definición que sea ampliamente aceptada de que es un material compuesto. El diccionario lo define como un compuesto hecho de diferentes constituyentes. A escala atómica, aquellos materiales tales como algunas aleaciones metálicas y materiales poliméricos, pueden ser considerados materiales compuestos por qué consisten en agrupamientos atómicos diferentes. A nivel micro-estructural un acero al carbono que contiene ferrita y perlita puede ser considerado un material compuesto puesto que la ferrita y la perlita son constituyentes visiblemente diferentes en un microscopio óptico. A nivel macro-estructural un plástico reforzado con fibras de vidrio, en la cual la fibra de vidrio puede ser descubierta a simple vista, puede ser considerado un material compuesto. Para nuestros propósitos aceptaremos pues la siguiente definición:..."**sistemas de materiales compuesto por una mezcla o combinación de dos o más micro constituyentes que difieren en forma y composición química y son esencialmente insolubles los unos en los otros**".

El desarrollo tecnológico de los materiales compuestos responde a la necesidad de mejorar las prestaciones de los materiales tradicionales y además de lograr una reducción de su peso estos se fabrican con la aportación de dos o más materiales simples. Al conjunto se le denomina material multifase. En este material destacan una o más propiedades características de las que aportan las fases constituyentes, de tal forma que del conjunto resulte la mejor combinación posible.

Majó Joan A. Mayugo [68], Plantea de una forma más sintética, pero precisa y concordantemente con otros autores que los materiales compuestos son "el constituido por dos o más materiales cuyas propiedades son superiores a las que tienen ambos por separado".

Lo más frecuente suele ser que esté formado por dos fases: la matriz que es continua y rodea a la otra fase que se denomina dispersa. Las propiedades resultantes dependen de las proporciones en las que participan la matriz y la fase dispersa, además de la morfología de esta última. [47]

Los materiales compuestos pueden estar constituidos por cualquier combinación de dos o más materiales ya sean metálicos, orgánicos o cerámicos. Una forma de clasificar los materiales compuestos, es atendiendo a la naturaleza de la matriz, así se suele hablar de compuestos de matriz metálica (MMC), compuestos de matriz cerámica (CMC) y compuestos de matriz orgánica (CMO)

Los compuestos que utilizan fibras como fase dispersa pretenden conseguir, entre otras, mayor rigidez, carga elevada y bajo peso específico. Si estas características se expresan como el cociente respecto a su peso específico, se habla entonces de las características específicas del material. [24]

Los materiales plásticos permiten su transformación mediante diferentes procesos para la obtención de piezas logradas por inyección, o termo conformado. Estos materiales de naturaleza polimérica, permiten la dispersión de fibras en su masa dando lugar a materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras. Si la matriz pertenece al grupo de los termoplásticos darán lugar a materiales que pueden ser transformados varias veces con la ayuda de procesos térmicos. [59]

Para seguir hacia delante se debe conocer que las matrices también llamadas resinas son compuestos macromoleculares de origen orgánico que se encargan de:

- La fijación de las fibras en el ordenamiento geométrico deseado.
- La transmisión de los esfuerzos a las fibras.
- La protección de las fibras frente a los esfuerzos de ~~compresión~~compresión.
- La protección a las fibras de los medios externos.

Las resinas termoestables más utilizadas son las de poliéster, viniléster, fenólicas, epoxi y ~~poliuretano~~poliuretano. Son resinas termoestables orgánicas de elevado peso molecular capaces de sufrir una serie de reacciones químicas, llamadas de curado o reticulación, que dan lugar a un producto de mayor o menor rigidez, insoluble e infusible. Las resinas de poliéster representan aproximadamente el 75% del total de

las resinas utilizadas en el mercado de los materiales compuestos de matriz termo estable. Las resinas de poliéster se dividen según la naturaleza de sus constituyentes base en:

- Ortoftálicas
- Isoftálicas
- Tereftálicas
- Tetrahidroftálicas
- Bisfenólicas

Siendo las más empleadas ortoftálicas, isoftálicas y bisfenólicas. Estas resinas se producen a partir de reacciones de poli condensación entre dos monómeros, un diol y un ácido dicarboxílico, de los cuales uno debe contener al menos una insaturación. El ácido dicarboxílico insaturado más utilizado es el anhídrido maleico. Aunque no obstante, se pueden utilizar diferentes ácidos y alcoholes de partida, con lo que se obtendrán diferentes tipos de poliésteres, que presentarán diferentes propiedades. En algunos casos se pueden añadir glicoles para mejorar algunas propiedades.

Las fibras de refuerzo o fase dispersa en una matriz polimérica tienen como objeto soportar tanto como sea posible el esfuerzo aplicado al conjunto, mientras que a la matriz polimérica le corresponde transmitir de forma efectiva las sollicitaciones al refuerzo. [95][96]. Está ampliamente documentado que se alcanza el mejor resultado del refuerzo cuando se cumple este principio general. [85][78] [80].

Mientras que los principios generales son bien aceptados, es muy difícil efectuar un tratamiento teórico cuantitativo de las relaciones y mecanismos que lo comprenden, por la complejidad de los sistemas físicos que representan los materiales termoplásticos reforzados.

Está generalmente aceptado que el principal efecto del refuerzo es aumentar la rigidez y la resistencia del polímero. [65]

Los principales factores a considerar en cualquier tratamiento teórico sobre la estructura y comportamiento de los materiales termoplásticos reforzados con fibras son [102]:

1. Propiedades de la matriz
2. Características de las fibras
3. Contenido de matriz y fibras en el compuesto
4. Interface entre la matriz y las fibras

El contenido de las fibras de refuerzo se expresa como fracción del volumen o del peso. Para un determinado grado de condiciones en la interface, el contenido del refuerzo determina el grado según el cual se desplazan las propiedades del compuesto, desde las de la matriz hacia las del refuerzo.

Cuando las fibras son de una longitud “infinita” se acepta que el esfuerzo se transmite de la matriz a las fibras por un mecanismo de cizallamiento. [76]

De este planteamiento se llega al concepto de la mínima longitud que debe tener una fibra para que pueda aceptar que la carga en la fibra sea igual a la carga de rotura por tracción. [79]. Una fibra “infinita” presenta una superficie “infinita” de anclaje con la matriz, en estas condiciones, difícilmente matriz y fibra se romperán antes de alcanzar la carga máxima de rotura de la fibra. Si la fibra no es “infinita”, se la denomina “corta”, la superficie de anclaje que ofrece es menor en esta situación, como la fibra soporta mayor carga que la matriz, casi siempre la matriz empieza a acusar los efectos de la carga antes que la fibra. En este caso, primero se agrietará la matriz e, inmediatamente después, romperá la fibra.

A esta mínima longitud que siempre está relacionada con su propio diámetro se la conoce con el nombre de longitud crítica, y se la considera como la mínima longitud que debe tener la fibra para poder transmitir la carga desde la matriz. Si las fibras no

pueden "anclarse de forma eficaz" a la matriz, ante las cargas se deslizaran y serán arrancadas de la matriz al romperse la pieza. **[100]**

La longitud crítica se puede calcular con la siguiente expresión:

$$L_{fc} = (D_f \times T_f) / 2 A \quad (1.1)$$

T_f - resistencia a la rotura por tracción;

D_f - diámetro de la fibra

A - resistencia de la unión entre la fibra y la matriz, o la resistencia de la matriz.

En diferentes citas bibliográficas se sugiere que, en el caso de fibras de carbono y de vidrio, la longitud óptima se sitúa alrededor de 1 a 2 mm. **[53]**

Se acepta que la eficacia del aprovechamiento de la rigidez de las fibras de refuerzo crece con el aumento de la relación que existe entre el módulo de la fibra y el de la matriz. También se acepta que una relación 50:1 es la óptima entre los módulos de fibra / matriz. Se aconseja el uso de fibras de vidrio de unos 0,005 mm de diámetro para obtener la máxima resistencia del compuesto **[63]**. El rasgo más importante de la interface es la adhesión del material de la matriz al refuerzo. **[87]**

En ausencia de esta adhesión las fibras serán arrancadas de la matriz sin romperse, lo que anula el efecto del refuerzo. **[19] [31]** Una de las clasificaciones de los materiales compuestos se realiza en función de la longitud de las fibras empleada como refuerzo. No obstante, el desarrollo profundo de la teoría sobre materiales compuestos se basa en el empleo de las fibras largas con las que se pueden realizar proyectos de ingeniería considerando la totalidad de las exigencias del diseño (isotropía de condiciones, reducción del peso, alta carga y alto módulo).

La utilización de las fibras cortas como refuerzo tiene una limitación mayor, su aplicación más importante es para la fabricación de piezas por inyección. **[20] [8]**

En este tipo de aplicación la orientación de las fibras es difícil de alcanzar con lo cual las piezas resultantes suelen presentar anisotropía de las propiedades, alcanzándose mejor resultado en la misma dirección que ha entrado el material en el molde, debido al cierto grado de orientación de las fibras al situarse en la masa de flujo del material, ya que tienden a situarse de forma que opongan la mínima resistencia al avance del flujo. [26] [48]

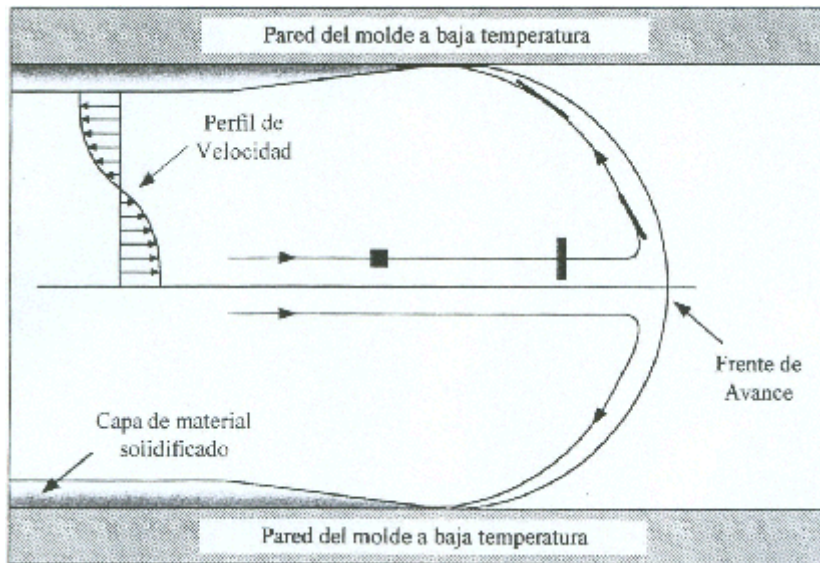


Figura 2.1 - Distribución del fluido en el frente de avance entre las dos paredes del molde. (Tadmor, Z. 1974)

En las piezas inyectadas, el material al entrar en la cavidad del molde experimenta campos de deformación a la compresión y de alargamiento. El material solidifica en contacto con la pared del molde formando una o más capas que a partir de ese instante se llena del material que fluye por la región central hacia el frente que avanza.

Diferentes autores avalan la teoría de que se produce una orientación preferencial de las fibras en el sentido de quedar paralelas a la dirección del flujo en las capas exteriores del moldeado y una distribución más arbitraria en el núcleo. [47]

El grado de orientación de las fibras y la caracterización de las capas que se desarrollen dependerá de:

1. De las dimensiones y forma del molde.
2. De la temperatura del molde
3. De la temperatura del material inyectado
4. De la presión de inyección
5. De las dimensiones de las fibras

2.2.1 - Regla de las mezclas

El tratamiento teórico más simple sobre las propiedades de los materiales compuestos está basado en la regla de las mezclas.[101] El compuesto formado por fibras continuas orientadas uniaxialmente dentro de la matriz de elasticidad uniforme, tendrá un módulo resistente a la tracción igual a la suma de los dos productos de los módulos por los volúmenes de los componentes:

$$MC = (M_f \times V_f) + (M_m \times V_m) = (M_f \times V_f) + (M_m \times (1 - V_f)) \quad (2.1)$$

La regla de las mezclas ha sido estudiada por cada investigador de materiales compuestos desde 1948 hasta la actualidad. Esta famosa ecuación permite predecir el comportamiento del módulo elástico y de la carga a la tracción de los materiales compuestos. Se basa en el módulo de las fases constituyentes del material y de sus porcentajes de aportación al compuesto expresado en volúmenes aunque también, de forma orientativa, se acepta la expresión en pesos.

Cuando la fase de refuerzo está formada por fibras, se demuestran como factores muy importantes la morfología de la fibra, el tamaño y la orientación. En la ecuación anterior se puede introducir un factor de alineación de las fibras que representa los efectos combinados del grado de “desorientación” de las fibras y cualquier diferencia entre la dirección en que se ensaya el material y la orientación de las fibras. [64]

De tal forma que en la ecuación original la fracción fibra se ve afectada por un coeficiente que engloba los factores anteriormente citados.

$$MC = \eta(M_f \times V_f) + (M_m \times V_m) = \eta(M_f \times V_f) + (M_m \times (1 - V_f)) \quad (2.2)$$

En este punto debe recordarse, la mecánica de acción de las fibras cortadas y difundidas en la matriz de poliestireno. Prácticamente, todos los investigadores que se citan en este apartado sobre materiales compuestos, han tratado de alguna forma esta cuestión. A partir del desarrollo de los equipos de inyección de materiales, se ha intentado añadir cargas y fibras a las matrices poliméricas, unas veces para mejorar las propiedades y otras para reducir el coste del producto final.

Cuando las cargas se basan en partículas de forma esférica, la ecuación básica de la regla de las mezclas se modifica en función de las dimensiones de esta esfera. De la misma forma, cuando el refuerzo está formado por fibras se ha desarrollado una teoría que se basa en la longitud de estas fibras. Tal como hemos dicho anteriormente, si las fibras son "infinitas", la transmisión de fuerza de la matriz a la fibra no presenta problemas. En cambio, cuando la longitud de las fibras es "corta" aparece toda una casuística que trata de forma matemática la transmisión de fuerzas desde la matriz a la fibra.

En el próximo apartado se consideran los principios básicos de la transmisión de fuerzas desde la matriz a la fibra y también la influencia que tiene la longitud de las fibras sobre este proceso. [2] [84] [46] [90].

2.2.2 - Esfuerzos que soporta un material compuesto formado por fibras cortas

Cuando el material compuesto está formado por fibras y estas se consideran uniformemente repartidas y alineadas de forma que su sección se encuentra perpendicular a los esfuerzos, el material compuesto ofrece unas condiciones favorables ya que permiten la transmisión del esfuerzo aplicado a la matriz de forma proporcional a cada una de las fibras que forman el refuerzo.

A partir de estas condiciones, se alcanza la definición de la longitud crítica de la fibra.

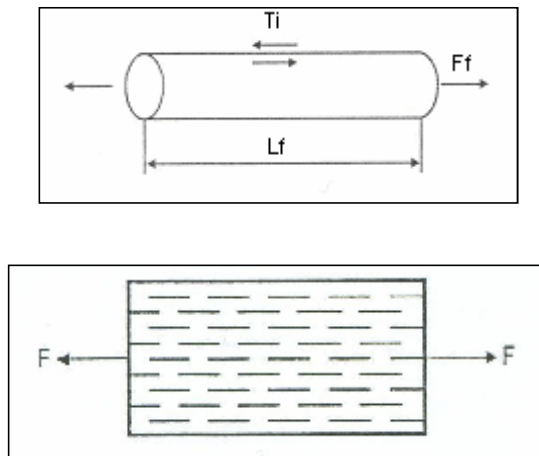


Figura 2.2 - Material compuesto formado por la matriz y fibras orientadas uniaxialmente de longitud L_f .

Si consideramos la fibra de la figura las fuerzas que actúan sobre ella son:

F_i - fuerza transmitida por la matriz en la interface.

F_f = fuerza soportada por la fibra

$$F_i = (T_i \times \pi \times D \times L_f) / 2 \quad (2.3)$$

$$F_f = (\sigma_f \times \pi \times D_2) / 4 \quad (2.4)$$

En condiciones de equilibrio, la fuerza soportada por la fibra en la zona de transferencia es igual a la carga de corte en la zona interface.

$$F_i = F_f \quad (2.5)$$

Donde se deduce la longitud de transferencia crítica L_e

$$L_e = (T_i \times \pi \times D \times L_f) / 2 = (\sigma_f \times \pi \times D_2) / 4 \quad (2.6)$$

En la zona de inicio de rotura de un material compuesto, los elementos que mantienen unida la matriz son las fibras de refuerzo. Si la longitud de las fibras es lo suficientemente larga como para quedar unida a las dos zonas de la matriz separada por la grieta microscópica donde se inicia la rotura, podrán soportar la carga. En cambio, si la longitud de la fibra no permite el suficiente anclaje en las paredes de la fibra, ésta acabará arrancada.

El concepto de longitud crítica está relacionado con este fenómeno; la longitud crítica es la mínima longitud que puede tener la fibra a partir de la cual no tiene suficiente anclaje en la matriz, y ante esfuerzos pequeños será arrancada.

La longitud crítica de la fibra está relacionada con su diámetro, de tal forma que, para una misma longitud de fibra, cuanto mayor sea su diámetro más superficie de contacto ofrece y mayor es la posibilidad de anclaje que puede ofrecer a la matriz ante el esfuerzo de tracción y, consecuentemente, mayor será su longitud crítica. [53]

$$L_c = (\sigma_f \times D) / (2 \times T_i) \quad (2.7)$$

1.2.3 - Fracción de volumen crítico

La influencia de las fibras largas lleva consigo la definición de la fracción de volumen crítico necesario para comenzar a mejorar la resistencia del material. Basado en el concepto de longitud crítica, se desarrolla el concepto de volumen crítico. El volumen crítico está directamente relacionado con la regla de las mezclas, y define el mínimo volumen de fibras que tiene que haber en el compuesto para que su efecto empiece a ser eficaz.

$$V_c = (\sigma_{mu} - \sigma_{mf}) / (\sigma_{fu} - \sigma_{mf}) \quad (2.8)$$

σ_{mu} - Carga máxima a rotura de la matriz

σ_{mf} - Carga soportada por la matriz en el momento de rotura de la fibra.

σ_{fu} - Carga máxima de rotura de la fibra

La carga que se puede aplicar a un material compuesto según la regla de las mezclas está determinada por la expresión:

$$\sigma_{cu} = (\sigma_{fu} \times V_f) + \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (2.9)$$

Si se supone que las fibras soportan un porcentaje de la carga aplicada al material compuesto, se puede deducir que en el momento de la rotura de las fibras la matriz quedaba expuesta a un nivel de fuerza muy superior al que puede soportar, y en consecuencia se produce la rotura del material compuesto.

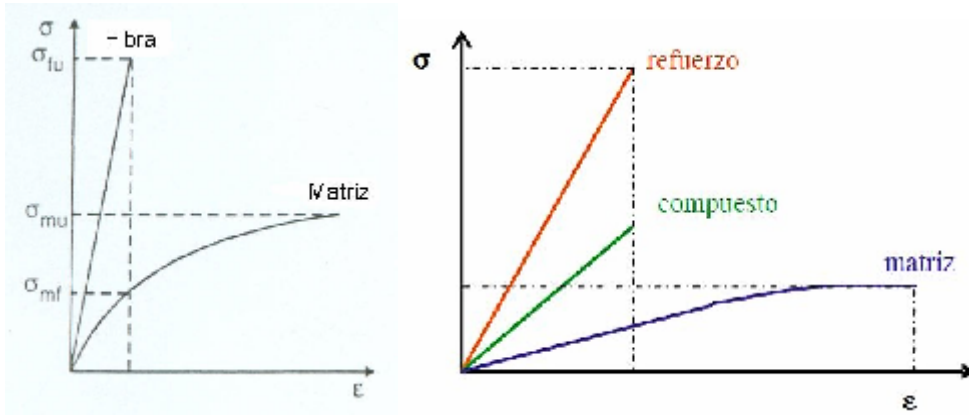


Figura 2.3 - Diagramas conjunto de carga - alargamiento de la matriz y de la fibra

Por esta razón la expresión general de la regla de las mezclas ha de modificarse y sustituir el término σ_{mu} carga máxima de rotura de la matriz, por σ_{mf} carga máxima en la matriz en el momento de rotura de las fibras:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \times V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (2.10)$$

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \times V_f + \sigma_{mf} (1 - V_f) \quad (2.11)$$

Si se define V_{cu} como la fracción de volumen necesaria para mejorar la resistencia de la matriz amu mediante la incorporación de cierta cantidad de refuerzo, se puede establecer la siguiente relación:

$$\sigma_{mu} \leq (\sigma_{mf} \times V_{c1}) + \sigma_{mf} (1-V_{c1}) \quad (2.12)$$

Donde se obtiene

$$V_{c1} \geq (\sigma_{mu} - \sigma_{mf}) / (\sigma_{fu} - \sigma_{mf}) \quad (2.13)$$

2.2.4 - Predicción del comportamiento de los materiales reforzados con fibras cortas

Los autores que citamos en las referencias, coinciden en la opinión sobre la eficacia de que el refuerzo por fibras cortas es menor que la del de fibras largas, y se afirma que el módulo elástico efectivo de los compuestos de fibra corta será también menor. [53] Para un material orientado unidireccionalmente que contenga fibras de longitud l , la ecuación de la regla de mezclas puede modificarse por la inclusión de un factor de corrección de longitud r_l :

$$E = \eta_L ((E_f \times V_f) + E_m (1 - V_f)) \quad (2.14)$$

$$E_{(cortas)} / E_{(continuas)} = \eta_L \quad (2.15)$$

Se deduce que en caso de que haya una fuerte unión en la interface la eficacia del refuerzo de las fibras cortas es cercana al 100% siempre que la longitud de la fibra esté por encima de 1mm. [24]

Con epoxy y fibra de carbono [28], no se obtiene un incremento significativo en la eficacia incrementando la longitud de fibra de 1mm a 6mm. La orientación imperfecta de las fibras cortas explica el reducido rendimiento comparado con las fibras

continuas. [49]. Halpin desarrolla una ampliación de las ecuaciones de Halpin-Tsai expresando el módulo de Young longitudinalmente como:

$$E = E_m (1 + \xi \eta V_f) / (1 - \eta V_f) \quad (2.16)$$

$$\eta = ((C_f / C_m) - 1) / (C_f / C_m) + \xi = l/r \quad (2.17)$$

Cuando hay una distribución de orientación de fibra el rendimiento del refuerzo se reduce aún más. Posteriormente Cox [24] incluyó un término adicional en la ecuación para tener este factor en cuenta siendo η_o el factor de rendimiento de la orientación y η_l el factor de longitud.

$$E = (\eta_o \times \eta_l \times E_f \times V_f) + E_m (1 - V_f) \quad (2.18)$$

Estos temas han sido desarrollados posteriormente por varios investigadores y es particularmente relevante para la predicción de las propiedades de productos moldeados por inyección en los que puede existir un margen de distribuciones de orientación de fibras y de longitudes de fibras. [5] [62] [74]

2.3 - LAS FIBRAS DE REFUERZO

La teoría clásica sobre el empleo de fibras cortas considera que cuando se aplica un esfuerzo de tracción, la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación, en otras palabras, en los extremos de las fibras no hay transmisión de carga desde la matriz. [24]

La mayor parte de las propiedades de los materiales poliméricos reforzados con fibras, están muy ligadas a la morfología característica de la fibra. Entre las características morfológicas de las fibras se encuentran [86].

1. La longitud
2. El diámetro
3. Las distribuciones de longitudes y de diámetros en la fracción en volumen

4. Orientación y ordenamiento de las fibras en la matriz

Las fibras de refuerzo se clasifican en función de su composición y de su tamaño, destacando por su importancia y aplicaciones industriales, las fibras de vidrio, las de carbono y las sintéticas. [82] [71] [14].

Las fibras tienen índices más altos de propiedades físico – mecánicas que los polvos. Existen diferentes tipos de fibras entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Fibras de vidrio. • Fibras de carbón. • Fibras arámidas. • Fibras cerámicas.
- Fibras metálicas. • Fibras termoplásticas. • Fibras de amianto.

En el mundo actual se emplean fundamentalmente tres tipos de fibras sintéticas para reforzar las materias plásticas: vidrio, carbón y arámidas. Se hará énfasis en el estudio de las dos primeras.

2.3.1 - Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio, fueron las primeras en emplearse como materiales de refuerzo. Están constituidas, en su mayor parte, por óxidos de silicio aunque pueden incorporarse otros tipos de óxidos como los de aluminio o magnesio con los cuales se modifican sus propiedades globales. Estas fibras se producen por medio de un proceso de hilado bajo fusión.

Después de pasar por la hilera, el conjunto de los filamentos obtenidos se reúne formando una fibra. La más difundida es la fibra de vidrio E, desarrollada inicialmente para aplicaciones eléctricas. Los tipos R y S ofrecen sin embargo, mayores características estructurales, mientras que las del tipo C proporcionan una buena resistencia ante el contacto con agentes químicos, en la tabla 2.1, se muestran las características mecánicas y precio para diferentes tipos de fibras de vidrio.

Tabla 2.1 Características mecánicas y rango de precio, para diferentes tipos de fibras de vidrio.

Material	ρ (g/cm³)	D_f (M-m)	C_t (MPa)	E_t (GPa)	ϵ (%)	Precio (€/Kg)
Vidrio C	2.55	8 - 20	3309	69	4.8	1.8 - 2.4
Vidrio E	2.60	- 10	3447	76	4.8	1.8 - 2.4
Vidrio R o S	2.49	- 10	3826	97	5.2	14.5 -19.3

Las fibras de vidrio permiten recibir diferentes tipos de ensimaje con lo cual se crean diferentes puntos de unión entre ellas y las matrices que la utilizan como refuerzo. Desde mediados de los años 70 hay una preocupación generalizada por los temas energéticos y medioambientales que en el ámbito de los materiales compuestos de base polimérica se inicia una carrera para encontrar sustitutos a las fibras de vidrio, que venían empleándose casi de forma exclusiva como elementos de refuerzo, por una amplia variedad de fibras de procedencia vegetal. [50] [21] [72] [104],

Las principales características de la fibra de vidrio son:

- Excelente adherencia fibra-matriz, gracias a la posibilidad de emplear recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Resistencia mecánica específica (resistencia tracción/densidad) superior a la del acero, en la dirección de la fibra.
- Buenas propiedades dieléctricas.
- Incombustibilidad.
- Estabilidad dimensional.
- Débil conductividad térmica
- Buena resistencia a los agentes químicos

- Imputrescibilidad
- Propiedades isotropas.

Cuando el vidrio se convierte en finas fibras, su tensión de rotura a la tracción, aumenta considerablemente. Para la fabricación de fibra de uso en plástico reforzado, se emplea el vidrio tipo "E", el cual es un vidrio borosilíco, con escaso contenido de álcalis, (menor a 1%).

Se fabrican diferentes tipos de refuerzo de fibra de vidrio, según las necesidades, en cuanto al diseño y al proceso de transformación a emplear.

Se pueden conseguir en forma de hilo (Roving), Mat o Tejido. Las características de las fibras de vidrio son las que muestra la Tabla 2.2:

Tabla 2.2 - Algunos valores y normas para propiedades las fibras de vidrio.

Características	Normas ASTM	Valores
Peso específico (g/cm ³) a 23 °C	D-792	1,8
Resistencia tracción, Kg/cm ²	D-638	630
Resistencia flexión Kg/cm ² a 25 °C	D-790	1.300
Resistencia flexión Kg/cm ² a 130 °C	D-790	750
Resistencia compresión Kg/cm ²	D-965	2.100
Impacto Izod. com. Kg/cm ² con entalla	D-256	42,8
Absorción de agua 24 h %	D-570	0,6
Resistencia dieléctrica, perpendicular volts./0,025 mm.	D-257	400

La composición química de los diferentes tipos de fibra de vidrio comerciales, se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. - Composición química (% en peso) de las fibras de vidrio comerciales.

Elemento/ Tipo	Tipo E	NCR	Tipo T
SiO₂	52-56	56-62	65
Al₂O₃	12-16	9-15	23
CaO	15-25	17-25	< 0.01

MgO	0-6	0-5	11
B₂O₃	8-13	0	-
Na₂O + K₂O	0-1	0-1	< 0.1
ZrO₂	-	0	< 1.0
TiO₂	-	0-4	-
ZNO	-	0-5	-

2.3.2 - Fibras de carbón

Son filamentos finos compuestos grandemente de carbón elemental con estructuras y propiedades variando desde los carbones amorfos hasta los grafito cristalinos que han sido descubierto. Tienen un amplio rango de propiedades químicas y físicas, el cual en respecto a otras familias de materiales es más amplio.

El modulo de Young ($5 \cdot 10^6 - 120 \cdot 10^6$ p.s.i) el cual es la mitad del de las fibras de aluminio y vidrio, es además 4 veces más que el del acero. La densidad del carbón es baja. La rigidez específica es alta para algunos tipos de fibras. Las fibras en un rango intermedio de la rigidez (30-40 **p-s.ipsi**) proporcionan un rango de resistencia a la tracción (500 000-1 000 000 **p-s.ipsi**).

Estas fibras además tienen las propiedades eléctricas, térmicas y químicas características del carbón, es por esto que crece el número de aplicaciones debido al uso de sus propiedades.

El gran ahorro de peso que posibilitan las fibras del carbón a sustituir materiales convencionales son utilizados en áreas donde la disminución del peso son considerables, por ejemplo componentes del espacio aéreo. Las fibras de carbón y sus composiciones tienen características útiles debido a las propiedades mecánicas básicas.

Su conductividad térmica por ejemplo, unida a las buenas propiedades mecánicas en los compuestos termo plásticos para componentes donde la estabilidad dimensional y disipación de carga estática son necesarias, como las estructuras usadas en equipamientos electrónicos. Su buena resistencia corrosiva es usada en plantas químicas y en medios marinos.

Sus características de fricción y desgaste y las propiedades a altas temperaturas hacen que sean útiles en cojinetes, empaquetaduras de ~~bombas~~, bombas, frenos. Sus buenas características de fatiga y amortiguamiento de vibraciones, además de su baja inercia de estos materiales son utilizadas en componentes de las máquinas herramientas sometidas a rotación a altas velocidades. Por su incremento en la resistencia, rigidez y baja densidad, pero además su amortiguamiento, son empleados en dispositivos deportivos.

La figura 2.4 compara típicos diagramas tensión-deformación para las fibras de carbón, arámida y vidrio. Como se puede observar las tensiones oscilan entre 1720-3440 MPa y las elongaciones de ruptura de 0.4-4 %. Las fibras de carbón proporcionan la mejor combinación de alta resistencia, rigidez y baja densidad pero pequeñas elongaciones.

La fibra Kevlar presenta una alta combinación de resistencia, alto módulo, baja densidad y alta resistencia a impacto. Aún cuando las propiedades de las fibras de vidrio no son tan impresionantes, su menor costo las convierte en las más usadas.

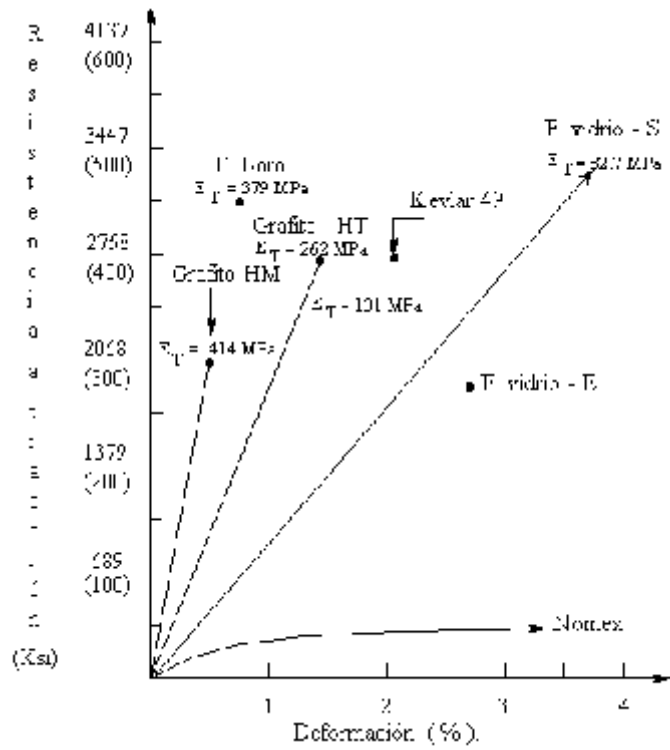


Figura 2.4 - Diagrama tensión –deformación para diferentes fibras.

La figura 1.5 compara la resistencia y módulo de elasticidad con relación a la densidad del material de varias materias plásticas reforzadas. En la figura se contrastan con los aluminios y los aceros, de aquí que estos últimos sean reemplazados en aplicaciones de aeronáutica.

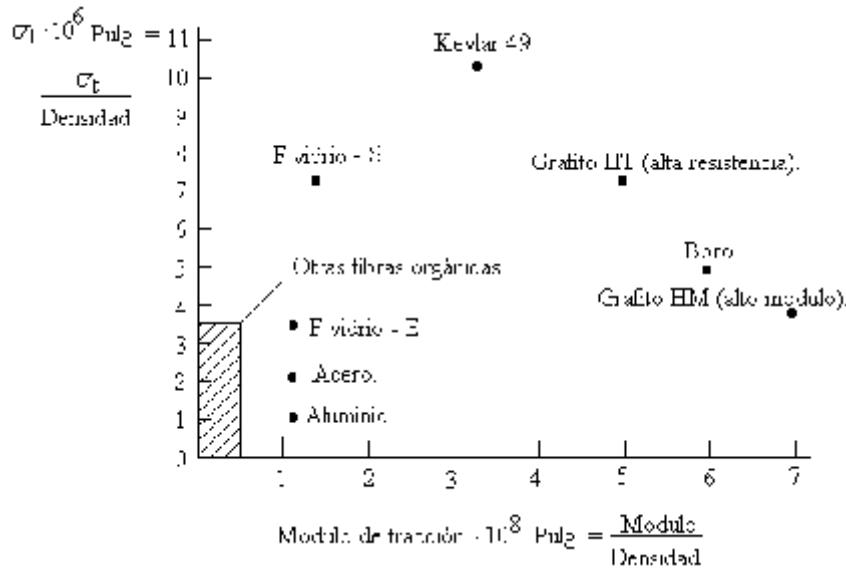


Figura 2.5 - Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad específicos.

La figura 1.6 muestra comparativamente la resistencia a la fatiga comparada con la aleación de aluminio ASTMD-2024T3.

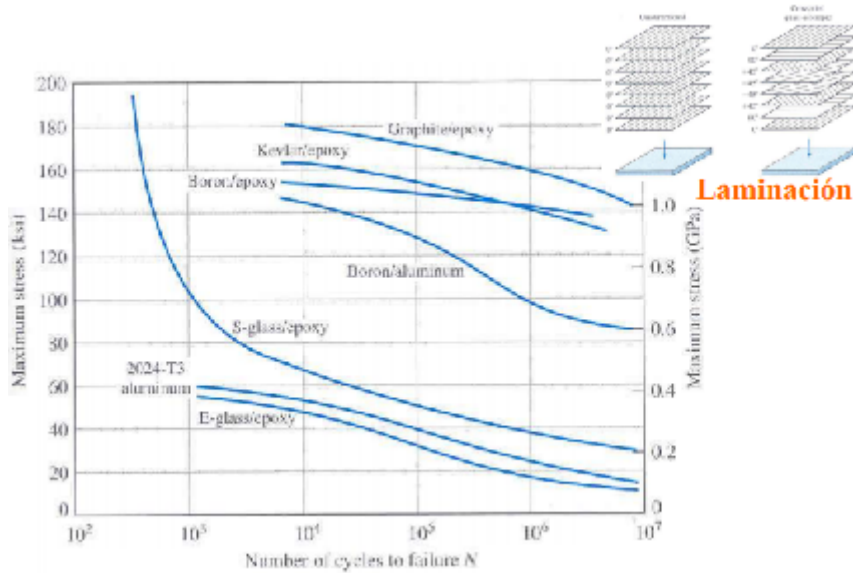


Figura 2.6 - Resistencia a la fatiga de algunos plásticos.

2.3.3 - Fibras naturales

Como las fibras naturales de procedencia vegetal tienen una composición mayoritariamente constituida por celulosa y además existe una amplia trayectoria y experiencia en la utilización de este tipo de fibras en la fabricación de papel, este conocimiento deriva hacia la fabricación de materiales compuestos dando lugar a una amplia bibliografía sobre aplicaciones y estudios del uso de las fibras lignocelulósicas [15] [113] [106] [91] [40] [66] [105],

Como fibras naturales, se entienden los materiales fibrosos que pueden extraerse de la naturaleza, principalmente están constituidos por celulosa y lignina, además de otros componentes en menor cantidad, por esta razón las fibras naturales también reciben el nombre de fibras lignocelulósicas. Estas fibras pueden proceder de plantas anuales o bien de plantas arbóreas madereras.

En la tabla 2.4, se muestran las producciones mundiales de algunos materiales susceptibles de producir estas fibras naturales, expresadas en millones de toneladas métricas. [115]

Tabla 2.4 - Producción de materiales lignocelulósicos.

Material	Producción (10 ⁶ T)
Paja de cereales	1250000
Bagazo	102200
Bambú	30000
Lino	2000
Yute	14730
Cañame <u>Cañamo</u>	526
Sisal	500
Linters de algodón	68000
Madera	1069

Como se puede apreciar, las fuentes de fibras lignocelulósicas son muy amplias y su producción puede decirse que se extiende por todas las esferas del globo, ya que, cada clima puede facilitar el cultivo de por lo menos alguna de ellas.

No obstante, las fibras naturales presentan una serie de ventajas y desventajas cuando se pretende aplicarlas como materiales de refuerzo en matrices termoplásticas, como se refleja en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 - Ventajas y desventajas de las fibras lignocelulósicas

Ventajas	Desventajas
Renovables	Baja estabilidad dimensional
Resistentes	Baja resistencia a microorganismos
Bajo peso específico	Poco termoplásticas
Biodégradables	Temperatura de procesado baja
Económicas	Naturaleza polar

Las fibras naturales, pueden clasificarse por su origen en herbáceas y cañas, como paja de trigo, paja de arroz, bambú, bagazo de caña de azúcar; hojas fibrosas, como abacá, sisal, henequén; filamentos largos como por ejemplo: lino, cáñamo, ramio, yute, etc. y finalmente fibras procedentes de madera, como las coníferas como por ejemplo: abeto y pino y frondosas como: el abedul, eucalipto y haya.

En la tabla 2.6 se reflejan las dimensiones de los filamentos y fibras elementales del lino, yute y cáñamo que son algunos de los materiales lignocelulósicos más utilizados como refuerzo en matrices termoplásticas.

Tabla 2.6 - Dimensiones de filamentos y fibras elementales

Material	Fibra elemental		Filamento	
	Dimensión		Dimensión	
	L _f (mm)	D _f (µm)	L _f (mm)	D _f (µm)
Lino	30	20	75	0.1
Yute	25	20	250	3.0
Cáñamo	15	22	250	2.5

En la tabla 2.7, se muestran algunas propiedades típicas de estas fibras naturales

Tabla 2.7 - Características mecánicas y rango de precio, para diferentes tipos de fibras

Material	ρ (g/cm ³)	σ_F (MPa)	σ_T (MPa)	E_T (GPa)	ϵ (%)	Precio (€/Kg)
Lino	1.40	5 - 38	800 - 1500	60 - 80	1.2 - 1.6	0.4 - 0.6
Cáñamo	1.38	10 - 51	550 - 900	70	1.6	0.4
Sisal	1.33	10 - 40	600 - 700	38	2 - 3	0.5 - 0.8
Albahaca	1.5	16 - 32	980	-	-	0.9 - 1.6
Yute	1.46	10 - 25	400 - 800	10 - 30	1.5 - 1.8	0.5
Ramio	1.5	11 - 80	500	44	2	1.7 - 2.8
Coco	1.25	-	220	6	15 - 25	0.3 - 0.6
Algodón	1.51	7 - 14	400	12	3 - 10	1.7 - 2.5

2.3.4. - Caracterización de las fibras para su aplicación industrial

Las propiedades que caracterizan la aptitud de las fibras para soportar la manipulación y su inserción en tejidos o en otros materiales son: Una fibra se caracteriza por hilos elementales agrupados entre si normalmente con algún tipo de torsión.

La unidad de medida que se emplea para expresar el diámetro de un hilo, es su título, que se expresa en TEX y que representa el diámetro de un hilo de 1000 metros de longitud que pesa un gramo. No obstante la unidad más utilizada es el DECITEX que corresponde al diámetro de un hilo que pesa un gramo y tiene la longitud de 10.000 metros.

En un hilo continuo se expresa el título a condición de que se indique el número de hilos elementales que lo forman. Por ejemplo la identificación de un hilo se realiza de

la siguiente forma: 167/30, significa que el hilo está constituido por la reunión de 30 hilos elementales. Y que 10.000 metros de este hilo tiene un peso de 167 gr.

La tenacidad se expresada como la fuerza que es necesaria aplicar a la fibra por tracción para provocar su rotura dividida por su tex, y se expresa en cN/tex (centi N/tex).

El módulo de elasticidad a la tracción o de Young, también se expresa en cN/tex [7].

Las fibras naturales pueden ser utilizadas para sustituir las fibras de vidrio y de carbón como refuerzo en los polímeros, su principal potencial esta en aquellos artículos donde no se requiera tener en cuenta un valor elevado de la resistencia a la tracción para funcionar correctamente, tales como tuberías de grandes diámetros [56], cubiertas de equipos etc.

2.3.5 - Caracterización de las fibras de yute

Yute es el nombre común de las plantas de tipo Corchorus, plantas tropicales anuales de la familia de las Tiliaceas. Varias especies del género pueden ser explotadas para producir la fibra del yute, [54] pero las dos especies que se cultivan principalmente para este propósito son el Corchorus capsularis y el Corchorus olitorius.

La planta de yute, de tipo herbáceo, mide de 3 a 4 metros de altura y tiene un tallo del grosor de un dedo humano. Las hojas miden entre 10 y 15 centímetros de largo y 5 cm de ancho. Las flores son pequeñas y de color amarillo. La fibra de yute explotable corresponde a los vasos de floema situados bajo el tallo principal.

El yute crece en un clima caliente y húmedo, [54] sobre un suelo de tipo aluvial o arcillo-arenoso. Necesita precipitaciones medias de 75 a 100 mm durante la fase de crecimiento. Históricamente, las regiones más prósperas son los valles del Ganges y

de Brahmaputra, pero el yute puede crecer en todos los ambientes que satisfacen las condiciones mencionadas.

La fibra de yute, se caracteriza por poseer excelentes propiedades mecánicas, por lo cual no solo son usadas en tejidos para sacos sino que además son usadas cuerdas o sogas para la sujeción o tracción de grandes pesos.

1.3.6 - Resistencia a la tracción en seco y en húmedo de las fibras textiles

El comportamiento de la resistencia a la tracción para diferentes fibras naturales se expresan en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 Resistencia a tracción en seco y húmedo de las fibras textiles en GPa

Material	En seco	En Húmedo
Cáñamo	90	115
Algodón	30 - 70	100 - 105
Lino	84	105
Yute	80 - 85	100 - 105
Poliestireno	5 - 8	100
Polipropileno	40 - 45	100

Factor de conversión: Kg/mm² X 0,0098 = GPa

Al alargar la fibra por tracción se produce simultáneamente, una contracción transversal regida, también, dentro de la zona de comportamiento elástico de la fibra, por la ley de Hooke.

La relación entre la contracción relativa de un diámetro transversal cualquiera de la fibra $\Delta d/d$ el alargamiento relativo $\Delta l/l$ es una constante elástica característica de la fibra que recibe el nombre de “coeficiente de Poisson”

$$\mu = (\Delta_d/d)/(\Delta_l/l) \quad (2.19)$$

Las características elásticas de las fibras quedan completamente definidas conociendo estas magnitudes características E y μ .

Tabla 2.9 - Alargamiento relativos hasta alcanzar la rotura (%) de diferentes fibras textiles.

Material	En Seco	En Húmedo
Cañamo	2	2.2
Algodón	10	11
Lino	1.8	2.2
Yute	3	1.3
Posliestireno	2-4	2-4
Polipropileno	40-60	40 - 60

2.4 - Comportamiento mecánico de los materiales plásticos

Los polímeros a lo largo de su vida sufren todo tipo de agresiones mecánicas que implican esfuerzos sobre su estructura. En forma líquida cuando son fundidos para ser extrudados o inyectados se ven sometidos a esfuerzos de cizalla importantes y cuando pasan a ser objetos puede ser estirados, comprimidos, flexionados, torcidos etc.

La ley ideal que explica el comportamiento de los sólidos bajo un esfuerzo de debe a Hook, 1676 que establece que la deformación es proporcional a la fuerza.

Las propiedades de los plásticos resultan de su propia estructura química y de la estructura física (cadenas moleculares lineales, ramificadas)

La longitud de la cadena es determinante es determinante del comportamiento de la molécula [51]

Los termoplásticos amorfos constan de cadenas moleculares largas que, en el momento de formarse se enredan y embrollan entre sí.

Las moléculas filiformes están próximas entre si pero carecen de unión química, lo que permite la transformación de los termoplásticos amorfos por cualquiera de los procedimientos típicos "termoplásticos" como son la inyección, la extrusión o el termo conformado al vacío.

Las propiedades de los termoplásticos dependen de la estructura química de los eslabones básicos, de la longitud de cadena, de la cristalinidad y de las fuerzas entre las cadenas moleculares (valencias secundarias).

En los diferentes grupos de plásticos las fuerzas siguientes son las que deciden las propiedades, que en los termoplásticos son:

- Fuerzas de Van der Waals, muy importantes en plásticos unipolares.
- Fuerzas polares
- Enlaces de puente de hidrógeno (PA6)
- Longitud de la macromolécula (ovillamiento)

Los enlaces de valencia principal son los que más contribuyen a la resistencia mecánica de los plásticos. Su actuación más enérgica se da en los termoestables. Todos los procesos de transformación los enlaces de valencia principal permanecen inalterables, a menos de que ocurra un deterioro. Los enlaces de valencia principal no se destruyen hasta que se inicia la descomposición del plástico. El grado de polimerización es una magnitud característica de los termoplásticos.

Si se aumenta el grado de polimerización, aumentan también: la viscosidad del material fundido, la resistencia a la tracción, la dureza, el alargamiento a la rotura y la resistencia al impacto. **[51]**

En cambio disminuirán: la tendencia a la cristalización, el hinchamiento y las fisuras por tensión.

Estructura de los termoplásticos: El estado normal de las moléculas lineales de los termoplásticos amorfos es un estado desordenado, ovillado PS.

Durante la transformación, los termoplásticos pueden verse sometidos a un fuerte esfuerzo de cizalla y convertirse en una masa fundida viscosa, en la que las macromoléculas se hallan orientadas.

Mediante un enfriamiento brusco (entrada al molde) esta orientación puede quedar fijada. **[83]**

Estas orientaciones dependen de la temperatura de masa, de la velocidad de inyección y de la temperatura del molde. Las orientaciones pueden ser más o menos acusadas en las distintas secciones de una pieza inyectada. Donde más se acusa es en la entrada y en la capa más externa de la pieza. Las orientaciones repercuten en las propiedades sensibles a la orientación (anisotropía), de forma que se ocasiona una mayor resistencia a la tracción y al impacto en el sentido de la orientación.

Con el aumento de la cristalinidad aumenta también la densidad, la resistencia a la tracción y la rigidez, pero disminuyen la transparencia y la capacidad de deformación.

Los esferulitos se originan en el seno de la masa termoplástico fundida a partir de núcleos cristalinos por enfriamiento lento.

La estructura de una pieza de inyección normalmente no es uniforme debido a un enfriamiento desigual. En la periferia, según las condiciones de enfriamiento, no hay esferulitos o son muy pequeños, mientras que en el centro se encuentran esferulitos mayores. **[35]**

Las características de los materiales, de forma general, dependen de su estructura, en los Plásticos dependen de la estructura molecular y en los Metales dependen de su estructura atómica. **[108]**

Los termoplásticos se vuelven quebradizos a bajas temperaturas. Si las temperaturas se aumentan, se produce inicialmente un descenso constante del módulo de elasticidad (disminuye la rigidez).

Con el calor los termoplásticos amorfos sufren un reblandecimiento, es decir, la transición a un estado ~~termoelástico~~termo elástico (viscoelástico). En esta zona bastan pequeñas fuerzas para provocar grandes deformaciones que, al enfriar, quedan congeladas (termoconformado). Si se sigue calentando, la movilidad térmica de las moléculas se hace tan grande que las cadenas en estado ~~termoplástico~~termoplástico pueden deslizarse unas frente a otras.

Cuando se mezclan agentes de acoplamiento, fibras de yute, y polipropileno en una proporción de 25/30/45 respectivamente por citar un ejemplo, la resistencia a la tracción que se obtiene resulta baja alrededor de los 26 - 27 MPa, sin embargo la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad y la deformación muestran valores que demuestran que esta fibra puede ser empleada en aplicaciones en las cuales no se requiera una resistencia a la tracción elevada.

2.5 - Adhesión En La Interfase Formada Por La Matriz Y Las Fibras

Un concepto fundamental a la hora de plantearse el empleo de las fibras naturales como refuerzo de un material polimérico es la compatibilidad existente entre estos dos materiales. Esta compatibilidad normalmente se caracterizan por tener un cierto grado de antagonismo, ya que las fibras tiene un marcado carácter hidrofílico, mientras que los polímeros lo tiene de carácter antagonista como hidrófobo.

Esta situación hace que una parte importante de las investigaciones de los materiales compuestos a las que nos estamos refiriendo se centre en como mejorar esta compatibilidad por la vía de modificar el carácter hidrofilito de las fibras para lograr la mejor unión fibras- matriz en su zona de interfase ya que si queremos aprovechar la gran resistencia y rigidez de la fibras, esta deben estar fuertemente unidas a la matriz. [87] [98] [3] [60] [111],

La adhesión entre las fibras de refuerzo y la matriz polimérica puede ser atribuida a una serie de mecanismos que se pueden dar en la interfase, como fenómenos aislados o por interacción entre ellos [109], Estos mecanismos se relacionan en los apartados que siguen.

2.5.1 - Adhesión mecánica

Diversos autores estudiaron la adhesión mecánica de las fibras de refuerzo hacia la matriz polimérica entre ellos destacan: [13] [18] [45]

Debido a las formas irregulares de la superficie de una fibra y de la matriz polimérica en estado viscoelástico, se puede lograr la difusión de las fibras en el polímero si su grado de fluidez y de mojabilidad es elevado, de tal forma que pueda alcanzar a la mayor parte de la superficie de la fibra y se llegue a establecer un buen grado de unión de caracteres mecánico entre ambas. La limpieza exterior de las fibras, la eliminación de residuos vegetales, de tierra y polvo, junto con la temperatura del polímero, y su mejor estado visco elástico, contribuirán notablemente a mejorar el grado de la adhesión mecánica.

Por otro lado hay que tener en cuenta además la longitud crítica de la fibra y su papel en la adhesión desde el punto de vista del proceso de moldeado y la resina que se emplee, se han realizado estudios [1] en los cuales se ha demostrado que cuando la fibra de yute por citar un ejemplo está por debajo de la longitud crítica, y se utiliza como resina el polipropileno (PP) y se utiliza la inyección como proceso de moldeado ocurre un agotamiento de la fibra que perjudica las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción, lo cual no ocurre cuando esta longitud está por encima del valor crítico

2.5.2 - Atracción electrostática

Estas fuerzas aparecen como consecuencia de la posible carga eléctrica entre ambas superficies. La fuerza de la interfase dependerá de la densidad de carga iónica. Aunque la atracción electrostática no haga una contribución principal a la

resistencia final de la unión si que puede afectar al proceso inicial facilitando la operación de difusión de las fibras en la matriz.

2.5.3 - interdifusión

La fuerza de la unión entre fibras y polímero, dependerá del grado de enmarañamiento molecular y del nº de moléculas implicadas. La interdifusión puede ser promovida por la presencia de agentes plastificantes y disolventes, dependiendo el grado de difusión de la concentración molecular, de los constituyentes que intervengan y en la facilidad de movimiento molecular.

El proceso de la interdifusión puede explicar la razón por la cual las fibras previamente recubiertas de polímero de adhieren a la matriz de polímero.

2.5.4 - Enlace químico

Se forma un enlace químico entre un grupo químico de la superficie de la fibra y un grupo químico compatible de la matriz. La fuerza de la unión dependerá del número y tipo de enlaces. Un fallo en las superficies de contacto, implica la rotura de los enlaces.

2.5.5 - Absorción y humectación

Si dos superficies eléctricamente neutras se ponen una junto a otra, se da una cierta fuerza de atracción entre ellas. Si además entre las dos superficies hay una cierto grado de humedad, se entiende mejor esta fuerza de atracción. Aunque de ambas superficie se haya eliminado la contaminación y suciedad se puede lograr un grado de unión entre las dos superficies solo en algunos puntos de contacto, no obstante la adhesión lograda será de carácter débil. [42]

Para la humectación efectiva de la superficie de una fibra, la matriz en estado "líquido" debe cubrir cada resalte de la superficie para desplazar todo el aire. La humectación puede ser entendida con la ecuación de Dupré para el trabajo termodinámico de adhesión W_A .

$$WA = \gamma_1 + (\gamma_2 - \gamma_{12}) \quad (2.20)$$

Donde γ_1 y γ_2 son las energías libres de superficie del líquido y el sólido y γ_{12} es la energía libre de la interface líquido-sólido. [16]

Y por el concepto de tensión superficial crítica de mojado γ_c , de forma que solo los líquidos con $\gamma < \gamma_c$ se extenderán espontáneamente sobre el sólido. Este es un parámetro útil al considerar el mojado de las fibras por el polímero.

2.6 - AGENTES DE ACOPLAMIENTO

La misión de los agentes de acoplamiento es la de servir de enlace entre la fibra y la matriz. Se han propuesto muchas teorías para explicar el papel del agente de acoplamiento, que han sido revisadas por Plueddemann y Mille [63] [75],

Una de las misiones que se le atribuyen es la de incrementar la energía de superficie, para asegurar una buena humectación.

Se intenta explicar el fenómeno atribuyendo propiedades específicas a la interfase: Se supone que hay una zona modificada de matriz alrededor de la fibra que tiene unas propiedades mecánicas intermedias entre las de la fibra y las de la matriz. [33]

O también que el agente modifica el comportamiento de la matriz en la región de la superficie de la fibra o el agente adhesivo que contenga grupos R grandes, los cuales, proporcionan una capa de polímero diferente entre la fibra y el resto del polímero. [33] No se conoce bien las propiedades de estas zonas aunque se acepta que el fenómeno de la modificación puede tener un efecto pronunciado sobre la mayor parte de las propiedades.

Plueddemann [33] propuso que el movimiento o los desplazamientos en la interface podrían relajar los esfuerzos locales y mantener la unión química si se seguía un mecanismo reversible de la unión. En presencia del agua molecular, que se puede difundir a través de la matriz hacia la Interface, el enlace covalente M-O se hidroliza.

Al ser este proceso reversible, el enlace covalente puede formarse de nuevo cuando el agua se difunda hacia el exterior. Así, en presencia de un esfuerzo cortante sencillo paralelo a la interface, las superficies pueden deslizarse unas sobre otras sin rotura permanente del enlace.

Se ha obtenido una evidencia experimental directa de este proceso de unión reversible por espectroscopia infrarroja no dispersa con transformada de Fourier [55].

2.7 - Salud y riesgos para el entorno. Plásticos como problema.

Dado que los plásticos son relativamente inertes, los productos terminados no representan ningún peligro para el fabricante o el usuario. Sin embargo, se ha demostrado que algunos monómeros utilizados en la fabricación de plásticos producen cáncer. De igual forma, el benceno, una materia prima en la fabricación del nylon, es un carcinógeno. Los problemas de la industria del plástico son similares a los de la industria química en general.

La mayoría de los plásticos sintéticos no pueden ser degradados por el entorno. Al contrario que la madera, el papel, las fibras naturales o incluso el metal y el vidrio, no se oxidan ni se descomponen con el tiempo. Se han desarrollado algunos plásticos degradables, pero ninguno ha demostrado ser válido para las condiciones requeridas en la mayoría de los vertederos de basuras. En definitiva, la eliminación de los plásticos representa un problema medioambiental. El método más práctico para solucionar este problema es el reciclaje, que se utiliza, por ejemplo, con las botellas de bebidas gaseosas fabricadas con tereftalato de polietileno. En este caso, el reciclaje es un proceso bastante sencillo. Se están desarrollando soluciones más complejas para el tratamiento de los plásticos mezclados de la basura, que constituyen una parte muy visible, si bien relativamente pequeña, de los residuos sólidos.

2.8 - El Plástico Como Problema.

Muchas de las ventajas de los productos plásticos se convierten en una desventaja en el momento en que le deseamos ya sea porque es descartable o bien cuando retiramos piezas de plástico que se han roto. Si bien los plásticos podrían ser reutilizados o reciclados en su gran mayoría, lo cierto es que hoy estos desechos son un problema de difícil solución, fundamentalmente en las grandes ciudades. Es realmente una tarea costosa y compleja para los municipios encargados de la recolección y disposición final de los residuos, fundamentalmente al volumen que representan por si solos envases. Por sus características los plásticos generan problemas en la recolección, traslado y disposición final.

CAPITULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 - Materiales a ensayar.

Considerando los resultados del estudio bibliográfico sobre los materiales compuestos y sus características fundamentales el presente capítulo da respuesta al objetivo esencial de la investigación; o sea la caracterización físico - mecánica de las formulaciones propuestas sobre la base de que estas deberán satisfacer determinados requisitos resistencia mecánica. Se evalúa el comportamiento de dichos compuestos al añadir en diferentes porcentajes de la fibra de yute como sustituto de la de vidrio. La determinación de tales propiedades permitirá en el siguiente estudio de la investigación la simulación de las condiciones de trabajo en las paletas de los rotores de los aerogeneradores. Con estos últimos resultados se procederá posteriormente a valorar cuan económicamente factible es la incorporación de este material compuesto matriz polimérica.

En este capítulo se establece el método de obtención de los materiales compuestos rellenos con productos importados y los de obtención nacional y se estudia cómo influyen las diferentes concentraciones de los diferentes rellenos en las propiedades físico-mecánicas de los materiales desarrollados.

Para la realización de las pruebas, se estableció un diseño de experimento de mezcla, el cual se tomaron como factores de la matriz experimental los siguientes componentes:

- Rovings 800 (tejido bidireccional de fibra de vidrio).
- Mats 600 (tejido de fibras cortas de fibra de vidrio multidireccional).
- Yute en forma de tejido.

Para evaluar si los resultados de los ensayos experimentales son válidos, determinar la influencia de las variables y las leyes de variación de las propiedades físico-mecánicas, y para el procesamiento estadístico de los resultados se empleó el paquete profesional Start Graphics Centurión XV.II.

Para la mejor planificación de los experimentos e interpretación de los resultados se escogieron dentro del diseño experimental para mezclas las variantes de modelos lineal, cuadrático y cúbico especial. Se tomó un SIPLEX CENTROIDE cúbico especial en el cual el número de corridas a planificar con arreglo al diseño seleccionado fueron de 10, teniendo para cada corrida tres réplicas lo cual garantiza una mayor precisión en los resultados.

A continuación se podrán observar las matrices experimentales de los materiales a evaluar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Matriz de compuesto polimérico con refuerzo (Rovings 800, Mat 600, y Yute).

Muestra	Robing 800 (%)	Mat 600 (%)	Yute (%)
1	0	0	1
2	0	1	0
3	1	0	0
4	0.5	0.5	0
5	0.5	0	0.5
6	0	0.5	0.5
7	0.3333	0.3333	0.3333
8	0.1666	0.1666	0.6666
9	0.6666	0.1666	0.1666
10	0.1666	0.6666	0.1666

Nota: Estos valores codificados son los por cientos que representan los distintos rellenos en el material compuesto, 0- 0%, 1-100 %, el resto responden a valores intermedios.

Las características de las fibras de vidrio empleadas de acuerdo a la información brindada por el fabricante se pueden observar en la Tabla 3.2 y en la figura 3.1.

Tabla 3.2. Características de las fibras de vidrio empleadas.

Designación	Peso (g /m ²)	Ancho (cm)	Longitud (m)	Espesor (mm)
WR 800C	800	100	50	1.6
MC 600A	600	186	48	1.6



Figura 3.1 - Fibra de Vidrio E en forma de Mat 600 (a) y Roving 800 (b)

3.2 - Elaboración de las probetas.

Todo ensayo ha de seguir normas comunes a todos los investigadores a fin de que éstos puedan comparar sus resultados. Por tanto, es lógica la aparición de organismos internacionales que regulen por la adecuación de los experimentos a los objetivos de investigación y verificación de metodologías de ensayo. Todo lo relativo a la determinación de propiedades de materiales provoca un seguimiento exhaustivo por parte de estos organismos internacionales ya que es de capital importancia verificar la CALIDAD de los productos y la SEGURIDAD de su explotación.

Los ensayos experimentales fueron realizados con arreglo a las normas ASTM para cada propiedad, en cada caso se indican las formas y dimensiones de las muestras, así como el proceder experimental.

Para la obtención de las probetas de los diferentes ensayos se obtuvo primeramente una plancha de espesor 5 mm, elaborada por el método de moldeo por compresión en un molde de sección rectangular que permite obtener un semiproducto de (250 X 250 X 5) mm. Para su fabricación se siguieron los siguientes pasos:

1. Limpieza del molde con acetona.
2. Untar las superficies de trabajo del molde con desmoldante para garantizar la extracción de la plancha de material compuesto.
3. Preparación de la mezcla.
 - Añadir a 400 ml de resina poliéster 60 gotas de cobalto (acelerador) y diluir.
 - Añadir 100 gotas de catalizador (peróxido).
 - Disponer una capa de mezcla y el velo inicial.
 - Disponer una nueva capa de mezcla e intercalarla con el tejido MAT o Rovings.
 - Finalmente disponer el velo final y cubrir con la mezcla.
4. Desmoldar.

3.3 - Descripción de los ensayos. Conceptos fundamentales.

Resistencia: Capacidad de soportar una carga externa sin romperse se denomina carga de rotura y puede producirse por tracción, por compresión, por torsión o por cizallamiento, habrá una resistencia a la rotura (kg/mm²) para cada uno de estos esfuerzos.

$$\sigma = F/A \quad (2.1)$$

Donde:

F - Es la fuerza aplicada en el momento de la ruptura.

A - área transversal.

σ - tensión de rotura.

3.3.1 - Ensayo de tracción.

Se le llama resistencia a la tracción la resistencia que ofrece un material al ser extendido.

Este ensayo se rige por la Norma ASTM D-638 y las probetas serán del Tipo II, porque según el espesor de las planchas que están entre 4.6 y 5.4 mm se toman las dimensiones recomendadas por la norma para valores de espesores $<7\text{mm}$ de La máquina se ensayó a tracción se muestra en la En la Fig. 3.2.



Figura 3.2 - Maquina de ensayo a tracción.

Preparación de las probetas:

Para la fabricación de las probetas se cortan tiras de la planchas con sobre medidas en una sierra de disco, para la posterior elaboración y acabado en una fresadora especializada y su designación es para trabajar plásticos o materiales no metálicos, la forma a la probeta se la da un dispositivo normado con la forma de la probeta de tipo II Fig. 3.3.

Estas probetas permanecen bajo condiciones establecidas por dicha norma de temperatura a $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ y humedad de $(50\pm 5)\%$ durante 24 h antes de ser llevadas a la prueba.

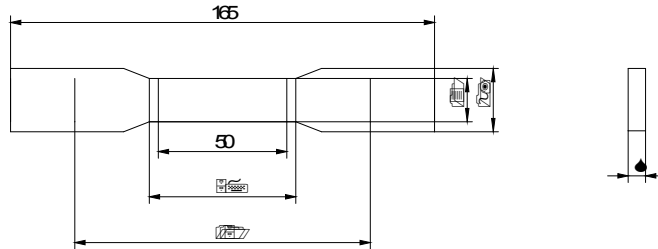


Fig. - 3.3. Probeta para ensayo de tracción.

Descripción del ensayo.

- Se coloca la probeta en las mordazas de la máquina de ensayo a la tracción, teniendo en cuidado que la probeta quede alineada según su eje longitudinal con respecto a la línea imaginaria que pasa por el centro de las mordazas, evitando todo esfuerzo de torsión.
- Se aprietan las mordazas uniformemente para evitar que se resbale la probeta, sin que se afecte en el lugar de fijación.
- Se coloca la máquina ensayo con todos sus parámetros a punto para graficar y para medir.
- Se van tomando mediciones intermedias de fuerza y alargamiento en condiciones específicas para la posterior determinación de otras propiedades.
- Rompe la probeta y se lee el valor de la fuerza.

El valor de la resistencia a la tracción (σ) se calcula por la fórmula siguiente:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Donde } F \text{ - es la fuerza tomada en la ruptura.}$$

A - es el área de la sección transversal de la probeta ensayada.

3.3.2 - Ensayo de impacto IZOD.

Se le denomina resistencia al impacto, cuando la muestra o material soporta un golpe agudo de repente, como un martillo. El método IZOD consiste en la determinación de la energía absorbida por una probeta colocada en forma vertical, según su eje mayor, al recibir un impacto mediante un martillo de péndulo.

Preparación de las probetas

Para la elaboración de las probetas se tuvieron en cuenta las dimensiones según la Norma ASTM D-256 atendiendo a su espesor. Para las planchas obtenidas $S = 4 - 5$ mm se toman las dimensiones para el rango <7 mm; las dimensiones (en mm) de las probetas serán las que se especifican en la Fig.3.4.

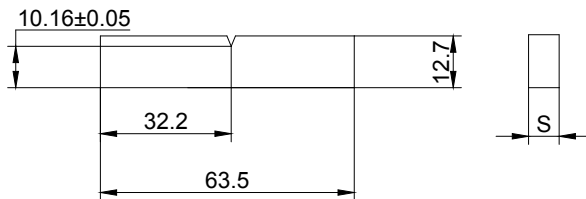


Fig. 3.4 - Probeta para ensayo de impacto IZOD.

Para la fabricación de las probetas se cortan tiras de la planchas con sobre medidas en una sierra de disco, para la posterior elaboración y acabado son llevadas a una fresadora para darle las dimensiones deseadas de forma automatizada. Luego de tener las dimensiones requeridas, la entalla se elabora en una máquina entalladora donde se estandariza con una barra cuadrada de acero de 12.7mm y luego se pone la probeta se le da 3 vueltas y queda realizada la entalla.

Las probetas deben permanecer 24 horas bajo condiciones atmosféricas adecuadas, según la Norma bajo una temperatura (23 ± 2) °C y una humedad de (50 ± 5) % antes de ser llevada a la máquina de ensayo.

La máquina de ensayo a impacto se muestra en la Fig. 2.5.



Figura 3.5 - Máquina de ensayo a Impacto.

La norma según que se prepara el experimento comprende

- ASTM 256-72a "Resistencia al impacto de plásticos y los materiales aislantes eléctricos"

Los métodos de ensayos o normas que son esencialmente equivalentes, o similares a las normas ASTM citada son las siguientes:

1. UNI 6223-68 "Determinación del resiliencia ISO de los materiales plásticos rígidos"
2. ARNOR NF 51-035 "Determinación de la resistencia al impacto - método "Charpy"
3. DIN 53453 "Schalagbiegeversuch"
4. BS 2782 - el Método 306 Á. Impacto Fuerza (el Método del Péndulo)

3.3.3 - Ensayo de flexión.

Para este tipo de ensayo la **Norma ASTM D-790** prevé el empleo de una probeta de forma de barra rectangular según el espesor de la plancha. Las planchas a analizar están en el orden de $S = 4.6$ a $5,4$ mm de espesor (Ver Fig.3.6)

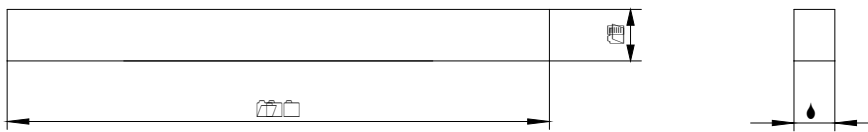


Fig. 3.6. Probeta según ASTM D-790 para ensayos de resistencia a la flexión.

Al igual que las probetas de impacto en obtención de las probetas se cortan tiras de las planchas con sobre medidas en una sierra de disco, para la posterior elaboración y acabado son llevadas a una fresadora para darle las dimensiones normadas de forma automatizada. Las características de la máquina de ensayo a flexión se muestran en la Figura 3.7.



Figura 3.7- Máquina de ensayo a flexión Modelo Instron.

Las probetas deben permanecer 24 horas bajo condiciones atmosféricas establecidas, según la Norma bajo una temperatura $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y una humedad de $(50 \pm 5) \%$ antes de ser llevadas a la máquina de ensayo.

3.3.4 - Ensayo de dureza Shore.

En la realización de este ensayo se utilizó la **Norma ASTM D-2270** que establece el método de ensayo para la determinación de la dureza por penetración de los plásticos utilizando un durómetro Shore:

- Tipo A para plásticos blandos.
- Tipo D para plásticos duros.

Se utiliza el durómetro Shore tipo A cuando se obtienen valores menores que 20 unidades con un durómetro Shore tipo D y se utiliza el tipo Shore tipo D cuando se obtienen valores mayores que 90 con un durómetro tipo Shore tipo A.

Penetración: Deformación que sufre un material al ser sometido su superficie a la acción de un penetrador normalizado, bajo condiciones especificadas.

Dureza por penetración: Resistencia que oponen los materiales a la penetración.

Dureza Shore: Dureza por penetración que se obtiene por medio de un durómetro Shore A analógico marca Microtest modelo M153 (fig.2.8 -a) ó Durómetro Shore-D Mod.5023-2 (Fig.2.8 -b) para Caucho, Plásticos y Adhesivos, tal y como se observa el Figura 3.8.



a)



b)

Figura 3.8 - Durómetros Shore A (a) y Shore D (b).

Penetración: Deformación que sufre un material al ser sometido su superficie a la acción de un penetrador normalizado, bajo condiciones especificadas.

Dureza por penetración: Resistencia que oponen los materiales a la penetración.

Dureza Shore: Dureza por penetración que se obtiene por medio de un durómetro Shore tipo A o D.

Para este ensayo las probetas deben tener un espesor ≥ 3 mm y permanecer 24h antes de la realización del mismo a una temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ y humedad de $(50\pm 5)\%$.

Descripción de la prueba.

La muestra del material que se desea ensayar se coloca sobre la mesa dura, horizontal y plana. Se mantiene el durómetro en posición vertical con el penetrador entre $10 \div 15$ mm de cualquier borde de la probeta. Se acciona la palanca y se levanta la mesa que al chocar con el penetrador comienza a moverse la escala se le la escala después de transcurridos 3 s después de leer el valor la operación termina por lo que la mesa queda lista para la próxima medición.

3.3.5 - Módulo de elasticidad. Coeficiente de Poisson.

Elasticidad: Capacidad de un material elástico para recobrar su forma al cesar la carga que lo ha deformado. Se llama límite elástico a la carga máxima que puede soportar un material sin sufrir una deformación permanente. Su determinación tiene gran importancia en el diseño de toda clase de elementos mecánicos, ya que se debe tener en cuenta que las piezas deben trabajar siempre por debajo del límite elástico. Se expresa en Kg/mm^2 o MPa .

El Modulo de Elasticidad al igual que el Coeficiente de Poisson están totalmente relacionados con el ensayo de tracción debido a que el Coeficiente de Poisson no es más que la relación entre las deformaciones transversales y las relaciones longitudinales que experimenta la probeta cuando la misma está siendo traccionada y se expresa de las siguiente manera:

$$\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$$

$$\text{Donde } \varepsilon' = \frac{\Delta a}{a_i} = \frac{a_i - a_f}{a_i} \quad \text{y} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_i} = \frac{l_i - l_f}{l}$$

a_i – ancho inicial de la probeta antes de ser traccionada.

a_f – ancho después del ensayo.

l_i – longitud inicial de la probeta antes del ensayo.

l_f – longitud final de la probeta.

El módulo de elasticidad se puede obtener del gráfico que se recoge de cada ensayo por probeta donde se relaciona la tensión de debido a la tracción y las deformaciones, por la siguiente ecuación:

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Donde se deduce que el módulo de elasticidad (E) es igual a la pendiente de la curva trazada en el ensayo. Para su obtención se mide el ángulo entre la curva y las coordenadas de las deformaciones y se busca la tangente del mismo, de manera que el resultado se expresará como Modulo de Elasticidad (MPa).

3.3.6 - Ensayo de peso específico.

Peso específico: El peso específico puede ser absoluto o relativo; el primero es el peso de la unidad de volumen de un cuerpo homogéneo. El peso específico relativo es la relación entre el peso de un cuerpo y el peso de igual volumen de una sustancia tomada como referencia; para los sólidos y líquidos se toma como referencia el agua destilada a 4°C.

Este método de ensayo se lleva a cabo mediante la norma **NRSM 011**. Esta norma establece el método de ensayo para la determinación del peso específico de materiales plásticos que sean mojados por el agua y que no se afecten por ella.

Generalidades:

- El ensayo se realizará por triplicado y se calculará el promedio de los resultados.
- Las condiciones ambientales serán de $296^{\circ}\text{K} \pm 2^{\circ}\text{K}$ (23 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ y una humedad de $(50 \pm 5)\%$.
- Las probetas se mantendrán durante 16 horas en el local bajo las condiciones establecidas.
- Las probetas tendrán las superficies y los bordes lisos y pulidos.
- Se empleará agua destilada ("Agua para análisis ")

Fundamento del método: La diferencia de la masa del plástico en el aire y en el agua permite calcular el peso específico del mismo.

Aparatos y utensilios:

- Balanza analítica (Sartorius) con precisión de 0.0001g y 200g de peso máximo admisible.
- Cesta de plástico o vidrio. Semiesférica, de tamaño adecuado con superficies pulidas y pequeños agujeros en sus paredes. Se sujeta al agua por medio de alambres resistentes a la corrosión, preferentemente plásticos y que tienen colgada una pesa en su parte superior
- Soporte de vasija.
- Vasija de inmersión. Vaso de precipitado, u otro recipiente de boca ancha capaz de contener la cesta con la probeta

Procedimiento.

Preparación de las probetas: Las probetas de ensayo serán un pedazo del material o una pieza moldeada de cualquier forma y tamaño que cumplan con las siguientes condiciones:

- El volumen de la probeta no será menos de 1cm^3 .

- Las superficies y bordes serán lisos.
- La masa de la probeta será 1 - 5g.
- El espesor será menos de 1mm por cada gramo de masa.
- La probeta estará libre de grasa, aceite u otra materia extraña.

Determinación:

1. Se calibra la balanza y se determina la masa de la probeta (A).
2. Se determina la masa de la cesta.
3. Se coloca la base de la vasija y la vasija de inmersión conteniendo el agua destilada y cuidando que la base de la vasija no toque el platillo de la balanza.
4. Se coloca la cesta de manera que esté totalmente sumergida en el agua pero sin tocar la vasija y se determina la masa de la balanza sumergida (B).
5. La probeta se moja en H₂O destilada y se frota con los dedos y se coloca en la cesta sin tocar las paredes de la vasija.
6. Se determina la masa de la cesta conteniendo la probeta sumergida(C).

Expresión para los cálculos:

El peso específico de la probeta se determina del siguiente modo:

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{A \pm (C - B)}$$

Donde A: masa de la probeta seca (g)

B: masa de la cesta sumergida (g)

C: masa de la cesta conteniendo la probeta (g)

3.3.7. Determinación de absorción de humedad.

La norma **ASTM D 570** Establece un método de ensayo para determinar la masa de agua absorbida por los materiales. Este ensayo se le aplica a todos los plásticos moldeados por inyección, compresión, o extrusión.

Fundamento del ensayo: Se miden las masas secas y húmedas de las probetas después de permanecer bajo condiciones específicas de tiempo y temperatura y se determina la diferencia de masa.

Aparatos, utensilios y medios de medición:

- Balanza analítica Sartorius con precisión de 0.0001g y un peso máximo admisible de 220g.
- Estufa (Marca UNITERM serie 1500), temperatura máxima de trabajo: 300 °C.
- Desecadora con agente desecante zeolita técnica.
- Pie de rey con precisión de 0.1mm.
- Recipiente con agua (agua para análisis).
- Papel de filtro o paño seco.

Procedimiento:

Las características de las probetas dependen del tipo de material y se confeccionan de acuerdo a las condiciones de preparación y dimensiones especificadas por el suministrador. Cuando estas no se especifiquen se elaborarán de acuerdo a las siguientes dimensiones:

-Materiales moldeables termoestables.

Longitud (120±2.0) mm

Anchura (15±0.5) mm

Grosor (10±0.2) mm.

-Materiales moldeables termoplásticos

Longitud (80±2.0) mm.

Anchura (10±0.5) mm.

Grosor (4±0.2) mm.

Determinación:

Se secan las probetas en la estufa (105±5)°C durante 5h. Para materiales que se afecten con esta temperatura se secan en la estufa (50±3) °C durante 24h. Posteriormente se dejarán enfriar en la desecadora durante 30 min. En caso que las probetas se analicen en las condiciones de suministro serán exceptuadas de este procedimiento previo.

Después del secado se pesan las probetas y se miden para determinar su superficie; posteriormente se colocan en un recipiente con agua p.a a (100±5)°C por 24h evitando el contacto con las paredes y entre sí. Para materiales plásticos que se afectan a estas temperaturas se someterán a (23±5)°C por 24h.

Posteriormente las probetas se introducen en un recipiente con agua p.a a temperatura ambiente y pasados 10 min. se extraen y se secan con papel de filtro o con un paño seco y limpio, efectuándole su posterior pesada se efectuará en un tiempo no mayor de 2 min. del secado.

Expresión de los resultados:

Método para el cálculo: El % de absorción de humedad de las probetas se obtiene mediante la fórmula:

$$\% = \frac{M_2 - M_{11}}{M_1} * 100$$

Donde:

M_1 : peso de la probeta seca (g)

M_2 : peso de la probeta húmeda (g)

3.3. Procedimiento matemático estadístico para el análisis de los resultados experimentales de ensayos de laboratorio

Durante los ensayos se obtienen una gran cantidad de datos experimentales a los cuales se les determina una serie de parámetros estadístico-matemáticos mediante los cuales se determina la repetitividad y reproducibilidad de los resultados de los ensayos experimentales a nivel de laboratorio o a escala de producción.

Durante los ensayos se obtienen una gran cantidad de datos experimentales a los cuales se les determina una serie de parámetros estadístico-matemáticos tales como:

A) *Media Aritmética de los Resultados* ($\bar{\mu}$) o (\bar{y})

Ha de señalarse que estos parámetros representan la media de una propiedad evaluada durante los experimentos.

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (3.1)$$

B) *Desviación Media Cuadrática o Desviación Estándar de la Media* (S) o (σ)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

$$S = \frac{R}{d_2} \text{ para número de ensayos (corridas) entre 1 y 10} \quad (3.3)$$

donde: n – Número de experimentos (corridas experimentales)

$$\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 - \text{Suma del cuadrado de las desviaciones}$$

R – Diferencia entre el valor más alto y el más bajo de las medias en las corridas experimentales (n)

d_2 – Factor de desviación (Tabla 1)

C) Desigualdad Cuadrática o Variabilidad del Procedimiento de Ensayo (V)

A este parámetro también se le conoce como Coeficiente de Variación; se da en %.

$$V = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Es común señalar que para un número de ensayos (corridas experimentales) igual o superior a 30 (\bar{y}), (S) o (V) se pueden por método de las sumas o las multiplicaciones.

Tabla 1. Factor de desviación para la desviación estándar estimada en el rango del tamaño básico de la muestra.

Tamaño de la Muestra (n)	Factor de Desviación (d_2)	($1/d_2$)
2	1.128	0.8865
3	1.693	0.5907
4	2.059	0.4857
5	2.326	0.4299
6	2.534	0.3946
7	2.704	0.3698
8	2.847	0.3512
9	2.970	0.3367
10	3.078	0.3249

El tamaño de la muestra (n) se puede determinar cómo:

$$n = \left(1.96 \cdot \frac{V}{e} \right)^2 \text{ para un nivel del 95\% de confianza} \quad (3.5)$$

donde: e – Error permisible de la muestra o muestreo

II. Determinación del error permisible de la muestra (e) absoluto

La precisión de los ensayos se evalúa a través del error, para lo cual se consideran o analizan dos tipos fundamentales de error, el absoluto y el relativo, para cada uno de los estadígrafos anteriores.

A) Error Absoluto de la Media Aritmética ($e_{\bar{y}}$)

$$e_{\bar{y}} = \frac{t \cdot S}{\sqrt{n-1}} \quad (3.6)$$

donde: t – Desviación normada, determinada durante una distribución normal en dependencia del número de ensayos o tamaño de la muestra

-Para un nivel de confianza del 95% y $n = 20$, $t = 2.1$; para $n \geq 30$, $t = 2$

B) Error Absoluto de la Desviación Estándar (e_s)

$$e_s = \frac{2 \cdot S}{\sqrt{2 \cdot n}} \quad (3.7)$$

C) Error Absoluto del Coeficiente de Variación (e_v)

$$e_v = \frac{2 \cdot S}{\sqrt{2 \cdot n}} \quad (3.8)$$

III. Determinación del error relativo (e_r)

A) Para la Media Aritmética ($e_{r\bar{y}}$)

$$e_{r\bar{y}} = \frac{e_{\bar{y}}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (3.9)$$

$$e_{r\bar{y}} = \frac{t \cdot V}{\sqrt{n-1}} \cdot 100 \quad (3.10)$$

B) Para la Desviación Estándar (e_{rS})

$$e_{rS} = \frac{e_s}{S} \cdot 100 \quad (3.11)$$

$$e_{rS} = \frac{2}{\sqrt{2 \cdot n}} \cdot 100 \quad (3.12)$$

C) Para el Coeficiente de Variación (e_{rV})

$$e_{rV} = \frac{e_V}{V} \cdot 100 \quad (2.13)$$

$$e_{rS} = \frac{2}{\sqrt{2 \cdot n}} \cdot 100 \quad (3.14)$$

IV. Grado de precisión del ensayo

Durante la realización de trabajos científicos de investigación el error relativo no debe sobrepasar de un 3 a 5%.

A partir del valor de error relativo determinado (definido), se determina el tamaño de la muestra (número de réplicas) (n), necesario para garantizar la requerida precisión en los ensayos.

A) Para la Media Aritmética (\bar{y})

$$n = 4 \cdot \left(\frac{V}{e_{\bar{y}}} \right)^2 = \frac{4 \cdot V^2}{e_{\bar{y}}^2} = \left(\frac{2 \cdot V}{e_{\bar{y}}} \right)^2 \quad (3.15)$$

B) Para la Desviación Estándar (S)

$$n = \frac{2 \cdot 100^2}{e_{rS}^2} \quad (3.16)$$

C) Para el Coeficiente de Variación (V)

$$n = \frac{2 \cdot 100^2}{e_{rV}^2} \quad (3.17)$$

Por otro lado, se tiene que desde el punto de vista práctico la precisión de los ensayos está caracterizada (definida) por la magnitud del error relativo. De este modo, para una probabilidad del 95% se tiene:

Magnitud del error relativo (e_r) Grado de precisión del ensayo

$e_r \leq 2$	Alto
$2 < e_r \leq 5$	Medio
$5 < e_r \leq 10$	Bajo
$e_r > 10$	Muy bajo

La Tabla 2 se obtiene considerando la ecuación (5) o (15) y un 95% de nivel de confianza, lo que indica un 5% de probabilidad de que la diferencia entre la muestra estimada (media aritmética \bar{y}) y el valor obtenido del promedio de todos los valores, para un número elevado de pruebas (réplicas), exceda el error relativo permisible de la muestra.

Por ejemplo: Si el coeficiente de variación (V) de múltiples pruebas (réplicas) es el 7%, el tamaño mínimo de muestras pudiera ser 8; todo esto con el objetivo de garantizar un 5% de error permisible. Es importante señalar que si el número de pruebas (réplicas) 8 no genera un coeficiente de varianza menor o igual al 7%, la prueba no se considera válida, por lo que se debe tomar una acción correctiva con los resultados.

Tabla 2. Tamaño mínimo aceptable de la muestra (n) para un 95% de confianza.

Coeficiente de Variación V (%)	Error Relativo permisible de la muestra e_{rp} (%)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	10	
1	4	1								
2	16	4	2	1						
3	35	9	4	3	2	1				
4	62	16	7	4	3	2	2			
5	96	24	11	6	4	3	2	2	1	
6		35	16	9	6	4	3	2	2	
7		47	21	12	8	6	4	3	2	
8		62	28	16	10	7	5	4	3	
9		78	35	20	13	9	7	5	4	
10		96	43	24	16	11	8	6	4	

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE MATERIAL COMPUESTO MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADO CON FIBRA NATURAL DE YUTE EN SUSTITUCIÓN DE LA FIBRA DE VIDRIO PARA LA FABRICACIÓN DE PALAS Y ALABES DE AEROGENERADORES

4.1 - Planificación y diseño de los experimentos de las formulaciones complejas.

La definición de las propiedades mecánicas de los materiales juega un papel importante en la determinación de la habilidad de los materiales para resistir las cargas externas a que están sometidos los elementos. Su determinación guarda especial significación para el diseño de los sistemas mecánicos por cuando la determinación de las formas y las dimensiones, así como la propia selección del material, están íntimamente relacionados con las propiedades físico- Mecánicas de los materiales.

El presente capítulo tiene como objetivo fundamental estudiar la influencia de las fibras de vidrio tipo Roving 800, Mat 600, y la fibra natural de Yute sobre las propiedades del material compuesto matriz polimérica de resina de poliéster, para su aplicación en la fabricación de palas y alavés de aerogeneradores.

A nivel mundial se reconocen diferentes métodos de diseños de experimentales y de diseños estadísticos experimentales [2, 41, 42] que posibilitan la solución y explicación científica a problemas objeto de estudio, resultando los mismos una vía efectiva y económica en el campo de las investigaciones científicas.

El diseño de experimentos se fundamenta sobre cuatro reglas básicas:

1. Minimizar los experimentos: siempre el número menor posible de experimentos.
2. Cambiar el valor de los factores de acuerdo con reglas.
3. Utilizar en el procesamiento métodos matemáticos normalizados.

4. Tener una estrategia de trabajo por etapas.

Tomando en cuenta los requerimientos anteriores, se utiliza un diseño de mezcla del tipo SIMPLEX – CENTROID CÚBICO ESPECIAL. Como variables a estudiar se tomaron las fibras de vidrio tipo E en forma de Roving, Mat, y fibra natural de Yute, tal y como se muestra en la Tabla 4.1. .

Tabla 4.1 - Matriz de los experimentos

Muestra	Robing 800 (%)	Mat 600 (%)	Yute (%)
1	0	0	1
2	0	1	0
3	1	0	0
4	0.5	0.5	0
5	0.5	0	0.5
6	0	0.5	0.5
7	0.3333	0.3333	0.3333
8	0.1666	0.1666	0.6666
9	0.6666	0.1666	0.1666
10	0.1666	0.6666	0.1666

A partir de la matriz experimental que se muestra en la tabla 3.1 se desarrollaron diez mezclas (Tabla 3.1), las cuales son desarrolladas según las técnicas de fabricación y mezclado descritas en el capítulo 2.

Las formulaciones desarrolladas permiten evaluar la influencia de Roving, Mat, y fibra natural de Yute sobre las propiedades físico-mecánicas de las mezclas elastoméricas.

El procesamiento de los resultados experimentales se realiza a través del paquete estadístico StatGraphics Centurión XV.II.

.Del análisis de los trabajos anteriores y los resultados del estudio bibliográfico se toma como propiedades a evaluar la dureza Shore D (Sh D), resistencia a la Flexión

(RF), módulo de elasticidad (E), Coeficiente de Poisson (μ), resistencia a la tracción (σ_r), peso específico (γ), y por ciento de absorción de agua (Abs._{agua}).

Los experimentos se realizaron siguiendo el orden de la matriz anteriormente descrita. Los resultados de estas pruebas experimentales (Anexo del 1 a 8), dan claridad sobre la influencia del de Roving, Mat, y fibra natural de Yute sobre las propiedades analizadas.

A manera de síntesis estos resultados que se muestran en la Tabla 4.2. El grado de significación de la influencia de cada factor sobre cada propiedad será analizado en lo posterior.

Tabla 4.2 - Resultado de los experimentos.

Exp. No	Propiedades de las mezclas							
	Sh (D)	σ_t (Mpa)	Abs. _{agua} . (%)	γ (g/cm ³)	μ 20%	RF (MPa)	E _{20%} (Mpa)	RI (Kg cm/cm)
1.1	74.33	34.846	12.87	1.203	0.0853	2,87	706.86	22.43
1.2	84.00	131.82	0.465	1.48	0.1110	11,03	2374.5	105.0
1.3	85.33	270.53	0.466	1.627	0.1910	8,71	1882.3	234.1
1.4	85.00	200.01	0.351	1.54	0.1050	9,54	2138.0	170.3
1.5	80.00	143.73	5.110	1.433	0.1242	4,00	1180.6	127.7
1.6	82.66	82.37	5.500	1.327	0.1431	6,62	1498.0	64.36
1.7	81.00	144.25	3.718	1.433	0.1149	7,11	1680.4	120.2
1.8	78.00	88.256	7.147	1.31	0.292	4,78	1160.7	71.92
1.9	83.00	205.21	1.890	1.516	0.1327	7,52	1748.8	178.4
1.10	83.33	138.09	2.143	1.45	0.0912	9,10	1929.2	112.1

Por los métodos estadísticos adecuados al diseño seleccionado se realizó el ajuste de los datos experimentales a la ecuación polinomial del tipo lineal empírica:

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3$$

Y es el valor de la propiedad considerada.

En la tabla 3.3 se recogen los valores estimados de los coeficientes obtenidos del procesamiento de los resultados.

Tabla 4.3 - Valores de los coeficientes estimados y coeficientes de correlación de los modelos.

Propiedad Estudiada	Coeficientes y factor de correlación							
	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123	R ² aj.
Shore D	85.38	84.02	74.23	1.47	0.56	13.84	- 55.48	97.62
E	1885.6	2353.3	714.75	2.455	433.66	- 197.012	1860.9	96.81
RF	7.62	9.31	9.65	- 7.38	2.91	- 15.19	20.26	95.46
σ _r	270.7	131.6	34.98	- 4.68	- 35.17	- 3.98	100.34	99.38
Abs _{-agua.}	0.50	0.531	12.75	- 0.258	6.424	- 4.81	8.266	94.31
Υ	1.62	1.48	1.20	- 0.057	0.062	- 0.055	- 0.109	94.10
μ	0.11	0.19	0.085	- 0.067	- 0.010	- 0.023	0.155	95.45
RI	234.4	104.7	22.6	3.093	- 1.505	0.812	- 6.66	99.96

La tabla pone de manifiesto que para las propiedades estudiadas las ecuaciones empíricas representan el efecto de los factores, por cuanto los valores de los coeficientes satisfacen la prueba de distribución t de Studen y F de Fischer del modelo (Anexos del 1 al 8).

A partir de los resultados anteriores se puede conformar para cada propiedad el correspondiente modelo matemático empírico.

4.4 - Análisis y discusión de los resultados.

El estudio de las mezclas propuestas permite analizar el efecto de las variables independientes sobre las propiedades físico-mecánicas y de servicio del material elastomérico a utilizar en la fabricación del diafragma.

- Dureza Shore D.

Los valores de dureza alcanzado por las diferentes mezclas (Tabla 4.2) satisfacen lo establecido por la norma ISO 6447. (Fig.4.1 a y b).

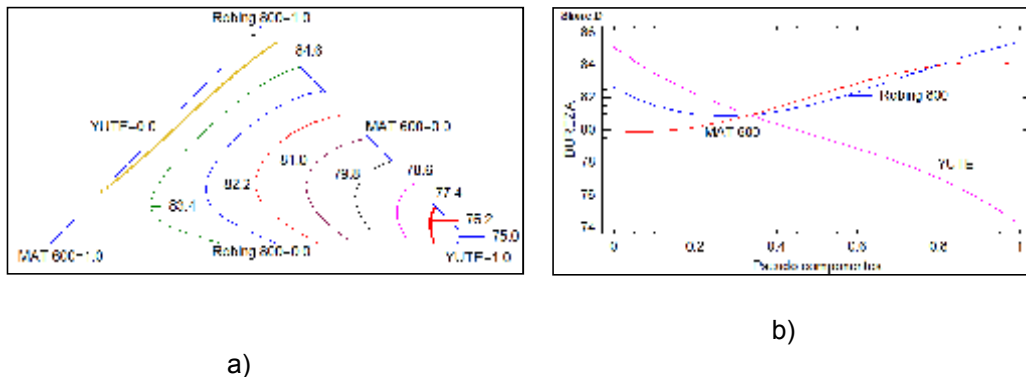


Fig. 4.1 - Variación de la dureza Shore D en dependencia del Roving 800, el Mat 600 y la fibra natural de Yute.

El incremento del Yute hace que la dureza disminuya en un rango amplio de 87 a 74 Shore D. El Mat 600 mantiene constante la dureza hasta un 15%, incrementando en los posteriores hasta valores de un 90% con tendencia ligera a disminuir en lo posterior hasta alcanzar su máximo valor, la variación de la dureza en este caso es menos marcada variando a niveles entre 80 y 84.

Lo anterior resulta de extrema importancia porque si bien un incremento de dureza es cierto, el incremento del Mat 600 logra estabilidad en los valores de dureza, lo cual a su vez está estrechamente relacionada con el resto de las propiedades del material.

Con la variación de del Roving 800 la dureza aumenta y disminuye pasando por un valor mínimo (Fig.4.1 b), a niveles de un 25 %. A este por ciento el menor valor de dureza es de 81 Shore D, y la máxima dureza de 83,5 Shore D cuando alcanza el 100% de Roving 800, y cero por ciento de Mat 600 y Yute.

Analizando la gráfica de Isolíneas Fig.4.1 a se observa que en la medida que incrementan los porcentos de Mat 600 y Yute, y disminuye el porciento de Roving 800 la dureza disminuye alcanzando su valores mínimos.

- Resistencia al impacto.

La mayor influencia sobre la resistencia al impacto la presenta el Roving 800, quien con un incremento de sus niveles provoca una aumento de la misma, alcanzándose el mayor valor de resistencia al impacto para el 100% del mismo (Fig.4.2 a).

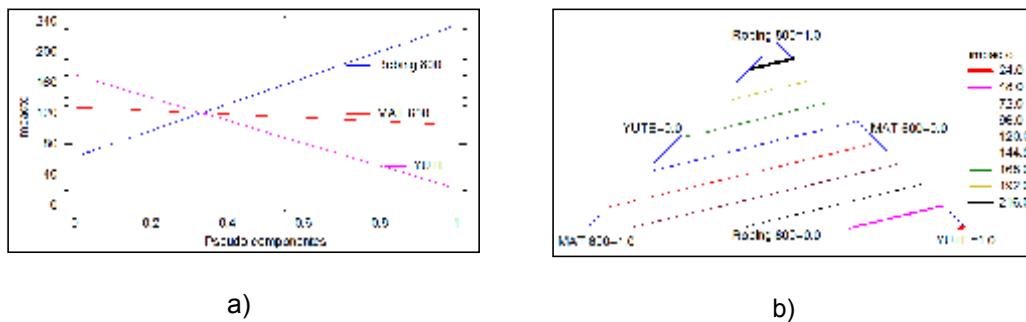


Fig. 4.2 - Variación de la Resistencia al impacto en dependencia del Roving 800, el Mat 600 y la fibra natural de Yute.

Analizando el efecto del Mat 600, se tiene que la Resistencia al impacto varía muy poco y disminuyendo, alcanzando valores entre 110 y 130. Comportamiento semejante presenta el Yute, pero con una disminución brusca de la resistencia al impacto, alcanzándose los mínimos valores para 100 % de Yute y cero por ciento de Roving 800 y Mat 600 (Figura 4.2 b).

Si se requiere aumentar la resistencia al impacto se requiere incrementar los niveles de Roving 800 y disminuir los niveles de Yute y Mat 600.

- Resistencia a la tracción.

Al igual que en el caso de la resistencia al impacto y la dureza, la resistencia a la tracción aumenta, en la medida que se incrementan el por ciento de Roving 800 y se disminuyen los de Yute y Mat 600 (Figura 4.3 a).

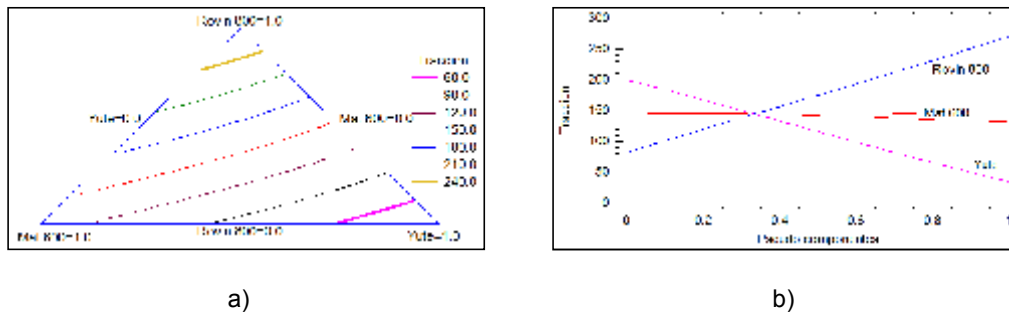


Fig. 4.3 - Variación de la Resistencia a la Tracción (MPa) en dependencia del Roving 800, el Mat 600 y la fibra natural de Yute.

Al analizar el efecto de cada variable por separado (Fig. 3.3 b) se observa que la resistencia a la tracción aumenta con el incremento del Roving 800, disminuye sustancialmente con el incremento del Yute y permanece casi constante con el incremento del Mat 600.

- Por ciento de absorción de agua (Abs._{agua}).

En las mezclas desarrolladas la absorción de Agua varía en un rango de 0.5 a 12.5 por (Fig. 4.4 a y b). En la medida que se incrementa el por ciento de Yute, incrementa el porcentaje de absorción de agua, alcanzándose los máximos valores para cuando se tiene cien por ciento de fibra natural de Yute y cero por ciento de Roving 800 y Mat 600.

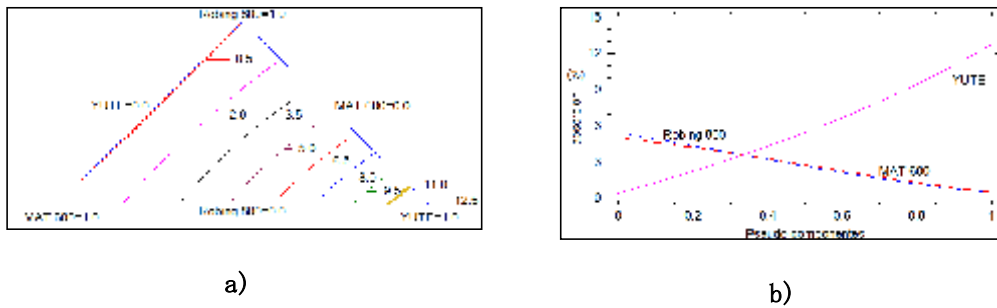


Fig. 4.4 - Variación del Por Ciento de Absorción de Agua en dependencia del Roving 800, el Mat 600 y la fibra natural de Yute.

Este comportamiento no resulta favorable para el desarrollo de materiales compuesto matriz polimérica, factor que debe ser tomado en cuenta considerando los máximos niveles de humedad permisibles en estos tipos de materiales. La disminución del porcentaje de humedad con el empleo del Yute, se puede lograr de dos formas: Una secando el tejido de yute antes de ser utilizado, y dos introduciendo el mismo entre las capas de Mat 600 y Roving 800.

Analizando el comportamiento de cada una de las variables independientemente se tiene que el incremento del Mat 600 y el roving 800, hace que la absorción de disminuya alcanzando su mínimo valor a sus máximos niveles (Fig. 4.4 b).

Módulo de Elasticidad. (E)

La influencia de los elementos componentes de la mezcla del material compuesto matriz polimérica desarrollado sobre el Módulo de Elasticidad se puede observar en la Figura 4.5 a y b.

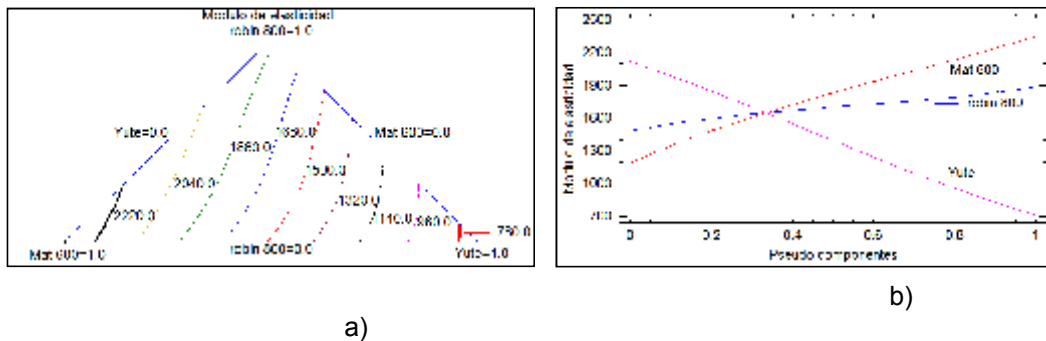


Fig. 4.5 - Variación del Módulo de Elasticidad en dependencia del Roving 800, el Mat 600 y la fibra natural de Yute.

Para esta propiedad la mayor influencia la tiene el Mat 600 (Figura 3.6 b) elemento componente de la mezcla que con su incremento, aumenta de manera acelerada el valor del Módulo de Elasticidad. El incremento del Roving 800 también favorece el mejoramiento de esta propiedad pero de manera menos marcada que el Roving. El incremento del Yute trae consigo todo el tiempo una disminución del Módulo de Elasticidad.

- Coeficiente de Poisson (μ)

Esta es una propiedad muy importante a considerar durante el desarrollo y selección de un material para una aplicación dada, pues mide la relación que existe entre las deformaciones unitarias transversales y las longitudinales.

El comportamiento del mismo por la influencia de los elementos componentes del material compuesto desarrollado se muestra en la Figura. 4.6 a y b).

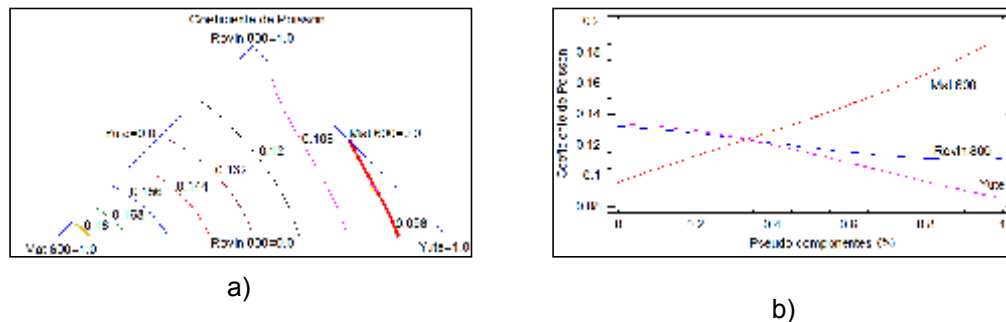


Fig. 4.6 - Variación del coeficiente de Poisson en dependencia del Roving 800, el Mat 600 y la fibra natural de Yute.

Como se puede observar en la figura 4.6 b, el Mat 600 incrementa el valor del coeficiente de poisson y tanto el Yute como el Roving 800 lo disminuyen, siendo en este caso más marcada la influencia de. Yute.

- Peso específico (γ)

En esta propiedad de manera general el intervalo de variación del peso específico está en el rango de 1.25 a 1.6 g/cm³. Es necesario significar que la fibra de yute muestra una tendencia a la disminución del peso específico de los materiales compuestos (Figura. 4.7 a, y b).

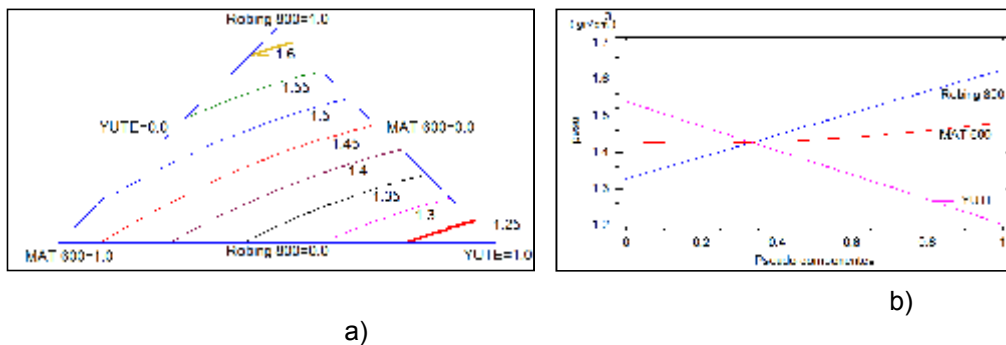


Fig. 4.7 - Variación del Peso específico en dependencia del Roving 800, el Mat 600 y la fibra natural de Yute.

Al observar la figura 4.7 b se tiene que el peso específico prácticamente no varía con el incremento del por ciento de Mat 600, e incrementa con el incremento del Roving 800.

- Resistencia a la Flexión. (RF)

Para esta propiedad se tiene que con el incremento de la fibra de vidrio en forma de Mat 600 la resistencia a la fatiga aumenta y disminuye pasando por un valor mínimo. Hasta el 60 % de Mat 600 disminuye, y de ahí en lo adelante aumenta (Figura 4.8 a y b).

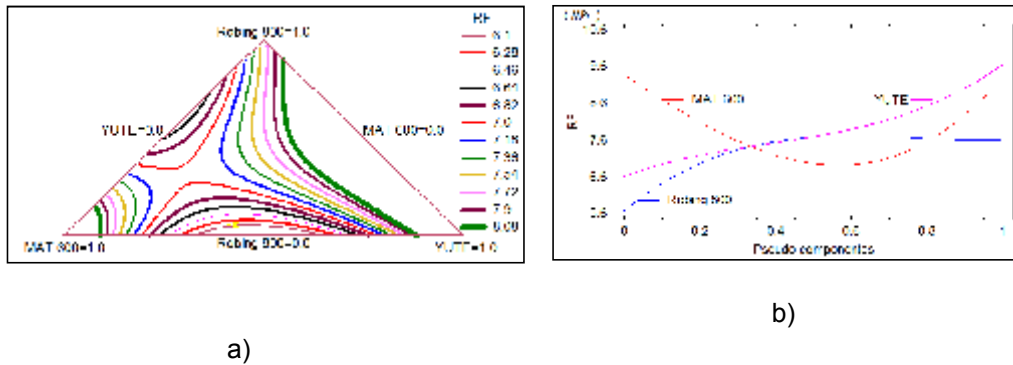


Fig. 4.8 - Variación de la Resistencia a la Flexión en dependencia del Roving 800, el Mat 600 y la fibra natural de Yute.

El incremento de la fibra natural de Yute trae consigo un incremento de la resistencia a la flexión con niveles superiores al Mat 600 y al Roving 800. Este último incrementa la propiedad hasta niveles del 50%, permaneciendo de este nivel hasta el 100% el valor de la resistencia a la flexión constante.

4.4 - Determinación de la mejor zona de mezclado.

Partiendo de los criterios referidos anteriormente, los datos por diferentes autores, de los criterios tecnológicos y las condiciones de explotación a que esta sometido el elemento objeto de estudio se establecieron las siguientes restricciones tecnológicas:

- Dureza Shore A = 79 - 84.
- Módulo de Elasticidad = 1,500 – 2,220 MPa.
- Resistencia a la Flexión, RF = 6.82 - 8.08 MPa.
- Resistencia a la tracción, σ_r = 150 - 240 MPa.
- Resistencia al impacto, RI = 120 – 216
- Peso Específico, ρ = 1.4 – 1.6 gr/cm³
- Coeficiente de Poisson, μ = 0.108 – 0.114

- Porcentaje de Absorción de Agua, % H₂O = 0.5 - 3.5 %

El estudio de superficie básica de respuesta realizado a partir de los modelos matemáticos empíricos obtenidos para cada propiedad, nos permite obtener la mejor región de mezclado correspondiente a las variables estudiadas. La parte sombreada de la figura 4.9 representa la zona de composición que satisface el sistema de restricciones asignados a cada propiedad.

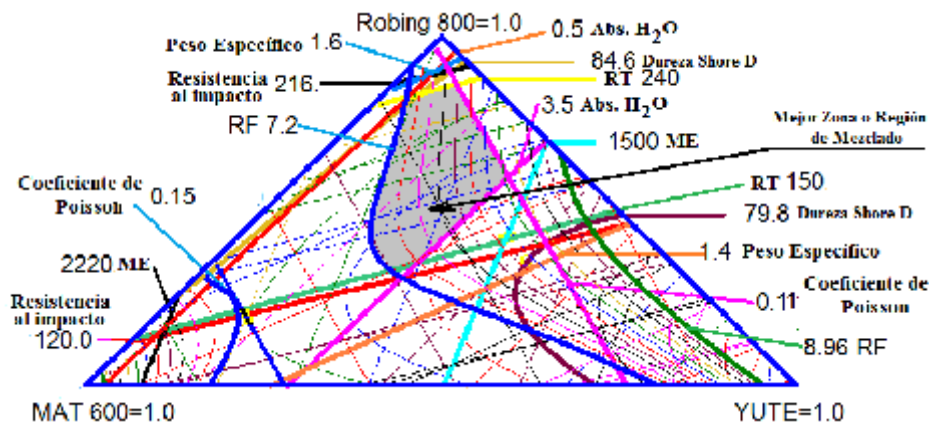


Fig. 4.9 - Zona de mejor Región de Mezclado. Gráfico de Isopropiedades.

La zona de composición o zona de mejor mezclado brinda la posibilidad de desarrollar formulaciones con diferentes combinaciones de fibras de Vidrio tipo E en forma de, garantiza de Roving 800, Mat 600 y Fibra Natural de Yute con las requeridas propiedades físico - mecánicas. La zona de mejor mezclado resulta de gran interés debido a que representa ventajas tanto tecnológicas como económicas.

4.5 - Efecto económico provocado por la sustitución parcial de la fibra de vidrio por la fibra de yute

Partiendo de la base de que es factible utilizar la fibra de yute en sustitución parcial de la fibra de vidrio en los materiales compuestos matriz poliéster, y que además teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación de las paletas de los aerogeneradores, analizados en el capítulo 1 y las propiedades mecánicas del yute como refuerzo, también es factible utilizarlo en la

construcción de estas paletas, procede realizar un sencillo cálculo económico, de lo que representaría utilizar la fibra de yute en lugar de la de vidrio.

Costo de la fibra de vidrio: 1.8 -2.4€/kg (ver tabla 2.1)

Costo de la fibra de yute: 0.5 €/kg (ver tabla 2.5)

Tomando solamente como variable el costo mínimo de ambos tipos de fibras, nos podemos dar cuenta de que por cada kilogramo de fibra de yute que se emplea en sustitución de cada kilogramo de fibra de vidrio, existe un ahorro de 1.3 euros

Si se toma como referencia utilizar 50 kilogramos de fibra de vidrio, en la obtención de una pala del rotor del aerogenerador, esto significaría de 90 a 120 euros solamente por el concepto de la fibra.

Si en lugar de esto se utilizaran 80 % de la fibra de vidrio y un 20% de fibra de yute garantizando las propiedades mecánicas requeridas para el material:

$$C = FV \cdot CFV + FY \cdot CFY \quad (4.1)$$

donde C es: costo del material

FV: fibra de vidrio en kg **CFV:** costo de la fibra de vidrio en €/kg

FY: fibra de yute en kg **CFY:** costo de la fibra de yute en €/kg

$$C = 40 \text{ kg} \cdot 1.8 \text{ €/kg} + 10 \text{ kg} \cdot 0.5 \text{ €/kg} \quad C = 77 \text{ €}$$

Esto significa que el costo de la pala teniendo en cuenta solamente el precio mínimo de la fibra sin incluir transportación, mano de obra, resina, etc. sería de **77 €** lo que implicaría un ahorro mínimo de **13 €** por cada pala, y por cada aerogenerador de tres palas entonces el ahorro sería de **39 €**,

En términos de la fibra, se estarían ahorrando **1.5 €** por cada kilogramo de fibra de vidrio que se sustituya por la de yute.

Otro análisis lo podemos realizar a partir de la comparación del peso específico de la fibra de yute con el de la de vidrio E que es la más utilizada en el mercado mundial para aplicaciones de este tipo.

Peso específico de la fibra de yute: **1.46 g/cm³** (ver tabla 1.5)

Peso específico de la fibra de vidrio E: **2.60 g/cm³** (ver tabla 2.1)

Teniendo en cuenta esto nos podemos percatar, que los materiales compuestos matriz polimérica reforzados con fibra de yute, tendrán un menor peso que los reforzados con la de vidrio, y por tanto los niveles de energía a consumir serán menores para los primeros en cualquier aplicación, inclusive la transportación de los mismos se facilita.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el uso de fibras naturales como el yute en estos materiales puede generar una fuente de ingresos en la agricultura de los recursos no alimenticios y fuentes de empleo para obreros del sector agrícola

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES DE LA TESIS

1. El desarrollo y caracterización de materiales compuestos matriz polimérica mediante la aplicación del método de Diseño Estadístico de Experimentos (Diseño de Experimento de Mezclas) permitió estudiar, y caracterizar el comportamiento de las propiedades físico mecánicas del material desarrollado.
2. Se obtuvo el gráfico de isopropiedades, originando una zona o región de mezclado que satisface las propiedades requeridas para materiales compuesto matriz polimérica. Alcanzándose valores de Dureza Shore A = 79 - 84; Módulo de Elasticidad = 1,500 – 2,220 MPa; Resistencia a la Flexión, RF = 6.82 - 8.08 MPa; Resistencia a la tracción, σ_r = 150 - 240 MPa; Resistencia al impacto, RI = 120 – 216; Peso Específico, ρ = 1.4 – 1.6 gr/cm³; Coeficiente de Poisson, μ = 0.108 – 0.114.
3. Con el empleo del yute como fibra natural de refuerzo, se logra una sustitución parcial de un 30 a un 40% de la fibra de vidrio tipo ROBING y MAT.
4. Se obtuvieron los modelos matemáticos empíricos, que en el rango de la región experimental, permiten evaluar el comportamiento de las propiedades físico mecánicas del material desarrollado y la influencia de los componentes de la mezcla sobre las mismas (ver anexos 1.3; 2.3; 3.3; 4.3; 5.3; 6.3; 7.3 y 8.3).
5. De la mejor zona o región de mezcla se selecciono el material a partir del cual se fabrico el alabe del aerogenerador de eje vertical tipo Helix Wind que se encuentra en fase de prueba (ver Anexo 9).

RECOMENDACIONES

1. Estudiar las posibilidades de producción a escala de laboratorio, planta piloto y a escala industrial de las palas y alabes del rotor de los aerogeneradores de eje horizontal y vertical utilizando las formulaciones del Material Compuesto Matriz Poliéster reforzado con fibras de Yute en sustitución parcial de la fibra de vidrio.
2. Continuar con el estudio de los Materiales Compuestos Matriz de Poliéster reforzados con Fibras Naturales y Fibras de Vidrio, empleando otros tipos de fibras naturales tales como las extraídas del Coco, el Bambú, y de la Caña de Azúcar etc.

BIBLIOGRAFÍA

1. C. KARMAKER* and J. A. YOUNGQUIST, Injection Molding of Polypropylene Reinforced with Short Jute Fibers, , USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, One Gifford Pinchot Drive, Madison, WI 53705, **1996**.
2. Adams, D.F., Doner, D.R.. J Comp. Mater. 1.152-64. **1967**.
3. Adamson, A.W.. In Physical Chemistry of Surfaces. 4a Ed. John Wiley and Sons. Nueva York. 294-318.332-368. **1982**
4. "Aerogeneradores: ¿Cuántas palas?"
<http://www.windpower.org/es/tour/desing/concepts.shtml>. Actualizado el 3 de enero **2001**
5. Alberala, N., Bergeret, A. Polymer composites. Vol.15. N6.442-452 **1994**.
6. Alcides L. Leao, APPLICATIONS OF NATURAL FIBERS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY IN BRAZIL - THERMOFORMING PROCESS, Science and Technology of Polymers and Advanced Materials Emerging Technologies and Business Opportunities, **1998**.
7. Antikow, P.. Fills et fibres synthetiques au usages textiles. Rhone Poulenc Fibres France. Documento interno para formación de Cadres. **1994**.
8. Ana B. Morales Cepeda, David Victoria Valenzuela, Marielli E. Ponce Medina, Tomás Lozano Ramírez. Materiales reforzados de poliolefinas recicladas y nanofibras de celulosa de henequén. Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 12(5), Octubre de **2011**. Castelaín et al.
<http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/OCT11/morales.pdf>.
9. Andrzej K. Bledzki, Volker E. Sperber. Comportamientos Recientes y Aplicaciones de Polímeros Rellenos de Fibra Natural.
<http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/15/15-34.pdf>.
10. Arencan, D., Velasco, J.I. J. Thermoplast Comp. Mater. 15:317-36. **2002**.
11. Askeland, D.. Science and engineering of materials. Ed. Paraninfo. Madrid. Capítulo 2, **2001**.
12. Organización danesa de la industria eólica, Aerogeneradores, mayo **2003**. disponible en: <http://www.windpower.org/es/tour/desing/concepts.shtml>.

13. Aveston, J. Nelly, A. J. Mater. Sci. 8, 352-62. **1973**.
14. Aziz, S.H., Ansell, M.P. The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1 – polyester resin matrix. Composites Science and Technology, Volume 64, Issue 9, July **2004**, Pages 1219- 1230.
15. Bakker, M.. The Wiley encyclopedia of packaging technology. Willey-Interscience. Nueva York. **1995**.
16. Berger, E.J., Eckstein, Y. Adhesive Joints. Ed. Mittal, K.L. Plenum. Press. Nueva York. 51. **1984**.
17. Bledzki, A.K., Reihmane, S., Gassan, J.J., J Appi Polym Sci. 59:1329-1336, **1996**.
18. Bledzki, A.K., Sabe D. N., Gassan, J.. Progress in Polymer Science. 24:221-228. **1999**.
19. Broutman, L.J.. Interfase in Composite Materials. ASTM Special Technical Publication. 452. American Society for Testing and Materials. **1969**.
20. Buggy, M., Farragher, L., Madden, W.. Journal of Materials Processing Technology 55. 448-456. **1995**.
21. Bourmaud A, Baley C. Investigations on the recycling of hemp and sisal fibre reinforced polypropylene composites. Polymer Degradation and Stability, **2007**: 92, 1034-1045.
22. Bos, H.L., Müssig, J., van den Oever, M.J.A. Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **2006**: 37 (10) 1591-1604.
23. Baley, Ch. Perrot, Y., Busnel, F., Guezenoc, H., Davies. P. Transverse tensile behaviour of unidirectional plies reinforced with flax fibres. Materials Letters, **2006**: 60 (24) 2984-2987.
24. Baiardo, M., Zini, E., Scandola, M. Flax fibre–polyester composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004: 35 (6) 703-710.
25. Caroll, B.J.. J colloid. Interface Sci. 57. 488-495. **1976**.
26. Chamis, C.C. Composites Materials. Vol.6. E.P. Plueddeman, Ed. Academic Press. Nueva York. 31-77. **1974**.

27. Chishoim, B.J., Fong, P.M., Zimmer, J.G., Hendrix, R. J. Appl. Polym. Sci. Vol.74. 889-99. **1999**. Chon, C.T., Sun, C.T. J Mater Sci. 15 :931. **1980**.
28. Lindenburg Aeroelastic, Analysis of the LMH64-5 Blade Concept, JUNE (Aeroelastic Analysis of the LMH64-5 Blade Concept.pdf), **2003**.
29. Corrales, B.F. Tesis doctoral por la Universidad de Girona. **2002**.
30. Cox, H.L.. Br. J. appl.Phys. 3, 72-9. **1952**.
31. Cuntz Guy; "Aeromotores y Aerogeneradores"; Ediciones Marzo 30; Barcelona; **1981**.
32. Choudhury A. Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites. Materials Science and Engineering: A, **2008**: 491 (1-2) 492-500.
33. Darlington, M. V., McGinley, P.L., Smith. G.R.. J Mater Sci. 877-86. **1976**
34. Dayton A. Griffin, Composite Technologies for Large Wind Turbine Blades Blade System Design Studies Volume I: Global Energy Concepts, Printed July **2002** (Analisdelpalas.pdf)
35. Dingle, L. D. Journal of Materials Science. 5. 357-363. **1974**.
36. Dong, S., Sapiuha, S., Schreiber, H.P. Polym Engng Sci; 32: 1734-1739. **1992**.
37. Doan, T.T.L., Gao, S.L., Mäder, E. Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification. Composites Science and Technology, **2006**: 66 (7-8) 952-963.
38. Dhakal, H.N., Zhang, Z.Y., Richardson, M.O.W. Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. Composites Science and Technology, **2007**: 67 (7-8) 1674-1683.
39. Doan, T.T.L., Brodowsky, H., Mäder, E. Jute fibre/polypropylene composites II. Thermal, hydrothermal and dynamic mechanical behaviour. Composites Science and Technology, **2007**: 67 (13) 2707-2714.
40. Ehrburge, P., Donet, J.B. Phil Trans R Soc. Londres. A294. 495-505. **1980**.
41. Eichhorn, S.J.. Composites Science and Technology. 63 : 1225-1230. **2003**.
42. Ericsson, P.W., Plueddemann, E.P. Composites Materials, Vol.6. Ed. E.P. Plueddemann. AcademicPress.1-29. **1974**.

43. Fariñas Wong E, Estudio de Aerogeneradores de pequeña potencia, Centro de Estudio de Termo energética Azucarera (CETA). Facultad de Mecánica. Universidad Centra "Marta Abren" ele Las Villas. Noviembre **2006**; disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos39/aerogeneradores/aerogeneradores.shtml>.
44. Facca AG, Kortschot MT, Yan N. Predicting the elastic modulus of natural fibre reinforced thermoplastics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **2006**: 37 (10) 1660-1671.
45. Facca AG, Kortschot MT, Yan N. Predicting the tensile strength of natural fibre reinforced thermoplastics. Composites Science and Technology, **2007**: 67 (11-12) 2454-2466.
46. Karol Quesada-Solís, Patricia Alvarado-Aguilar, Rosario Sibaja-Ballester, José Vega-Baudrit. Utilización de las fibras del rastrojo de piña (ananas comusus, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster. <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/JUN05/guesada.pdf>.
47. Folkes, M.J., Russel, D.M.A. Polymer 21. 1252-8. **1980**.
48. Fernández L. Gilda; " Resistencia de Materiales"; Edit. Pueblo y Educación; Cuba; **1981**.
49. Gañán, P.. Tesis doctoral por la Universidad del País Vasco. **2000**.
50. Garcen. J. Fibras textiles. Ed. UPC. IITT.Terrasa. **1991**.
51. Garnier, J., Wright, L., Godbout, L., Yu, L.. Colloids and Surfaces. 145. 153-165. **1998**.
52. Gassan, J., Bledski A.K.. Compos Sci Technol. 59:1303-9. **1999**
53. "Generadores Eólicos de Electricidad"; Tesis de graduación secundaria; disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos4/aerogeneradores/aerogeneradores.shtml>. **2011**.
54. Gilbert, A.H., Goldstein, B. Marom, G.. Composites. 408-414. **1990**.

55. Gunner C. Larsen and Kurt S. Hansen; Analyses of Wind Turbine Design Loads Database on Wind Characteristics; Riso National Laboratory, (Analyses of Wind Turbine Design Loads.pdf). Roskilde June **2004**.
56. Gunner Chr. Larsen, Knut Ronold, Hans E. Jorgensen, Kimon Argyriadis and Jaap de Boer Ultimate Loading of Wind Turbines, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark (Ultimate Loading of Wind Turbines.pdf). April **1999**.
57. Gutowski, W. Controlled Interfaces in Composite Materials. Proc. ICCI-III. Ed. Ishida, I. Elsevier. Nueva York. 505-520. **1990**.
58. Ha, K.C., Hwang, J.R., Doong, J.L. Polym. Polym. Compos. 4:563-76. **1996**.
59. Hashin, Z., Rosen, B.W. ASME J Appl Mech;. 31:223-32. **1964**.
60. Hashin, Z. J Appl Mech. 46:543-50. **1979**.
61. Halpin, J.C. Mater Comp J. 3. 732-4. **1969**.
62. Halpi, J.C., Tasai, S.W. Environmental factors in composite materials design. Air Force Materials Laboratory Technical Report. AFML-TR-67-423. **1976**.
63. Hellerich, W. Materiales Plásticos. Ed. Hanser. Barcelona. **1992**.
64. Henrik Broen Pedersen, Ole Jesper Dahl Kristensen, Applied Modal Analysis of Wind Turbine Blades, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark February **2003** (Applied Modal Analysis of Wind Turbine Blades.pdf)
- 65.
66. Hull, D. An Introduction to Composite Materials. Cambridge University Press . **1987**.
67. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/07/materiales-compuestos.html>
68. <http://materias.fi.uba.ar/7213/MATERIALESCOMPUESTOS.pdf>
69. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/2009/08/8_Materiales-Compuestos1.pdf
70. http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Tema7_CM.pdf .**2012**.
71. Información sobre el yute y sus derivados UNCTAD. disponible en <http://unctad.org/es/Paginas/All-Publications.aspx?Title=yute> . **2006**.

72. Hong, C.K., Hwang, I., Kim, N., Park, D.H., Hwang, B.S., Nah, C. Mechanical properties of silanized jute–polypropylene composites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2008: 14 (1) 71-76.
73. Ishida, H., Koenig, J.L. Proceedings of the 35th SPI/RP. Annual Technology Conference. Society of Plastics Industry. Nueva York. **1980**.
74. Idicula M, Boudenne A, Umadevi L, Ibos L, Candau Y, Thomas S. Thermophysical properties of natural fibre reinforced polyester composites. *Composites Science and Technology*, **2006**: 66, 2719–2725.
75. Jane L. O'Dell, *Natural Fibers in Resin Transfer Molded Composites*, **2000**,
76. "Bornay, Aerogendradores"; disponible en: <http://www.bornay.com/> **2013**.
77. Kenneth Thomsen*, Poul Sørensen Fatigue loads for wind turbines operating in wakes, Riso National Laboratory, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 80 (Fatigue loads for wind turbines operating in wakes.pdf). **1999**.
78. Kerner, E.H. *Proc. Phys. Soc.* 69B, 808. **1956**.
79. Kinloch, A.J., Kodokian, G.K.A., Watts, J.F. *Phil Trans Roy Soc. Londres.* A338.83-1 12. **1992**.
80. Koslowski, H.J. *Dictionary of man-made fibers. Special edition 2000.* Sachtleben Chemie GmGH. **2000**.
81. Krock, R.H.. *Modern Composite Materials.* Ed. L.J. Broutman y R.H. Krock, Addison-Wesley. Massachusetts. **1967**.
82. Lee, S.M., Joun, J.R. Characterization of short glass fiber filled polystyrene by fiber orientation and mechanical properties. *Macromol. Symp.* 148:211-28. **1999**.
83. Lee, N.J., Jang, J. The effect of fibre content on the mechanical properties of glass fibre mat/polypropylene composites. *Composites: Part A* 1999.30:80.15-22. **1999**.
84. Lees, J.K. *Polym. Enging. Sei.* 8, 186-94. **1968**.
85. Li, Y., Mai, Y.W. *Compos Sei Technol* 60 :2037-55. **2000**.

86. Lei Y, Wu Q, Yao F, Xu Y. Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **2007**: 38 (7) 1664-1674.
87. Li Y, Hu Ch, Yu Y. Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. *Composites: Part A* **2008**: 39, 570–578.
- 88.
89. Luc Peters, *New Structural Materials for Wind Turbine Blades*. Power Engineer. disponible en: <http://www.empiritag.com/site/pepei.pennnet.com>. **January 2007**
90. Majó, Joan A. Mayugo, TESIS DOCTORAL por la Universitat politècnica de Catalunya. **2003**.
91. M.-matlim. Martin; "Diseño de Sistema Conversor de Energía"; diciembre del **2000**.
92. Massardier, V. C.R.Chimie 5. 507-512. **2002**.
93. Michaeli, W., Wegner, M. *Tecnología de los composites/plásticos reforzados*. Ed. Hanser. Barcelona. **1992**.
94. Michell, A.J. Wood cellulosic-organic polymer composite. *Composite Asia Pacific*. Adelaide. Vol. 89. 19-21. **1989**.
95. Mieck, K.P., Nechwatal, A. Knobelsdorf, C. Melland *Textilberichte*; 11:892-898. **1994**.
96. Milewski, J.V. *Handbook of Fillers and Reinforced for plastics*. Ed. H.S. Katz & J.V. Milewski. Van Nostrand Reinhold. 68. Fundamentos Teóricos. **1978**.
97. Miller, J.D., Ishida, H. *Chemically Modified Surfaces*. Vol.1. Silane. Surfaces and Interfaces. Ed. K. Leyden. Gordon and Breach. Nueva York. 525. **1986**.
98. M. F. Llop, J. P. López, A. López, F. Vilaseca y P. Mutjé. Influencia de la modificación de las fibras sobre las características a fractura de un poliestireno reforzado con fibras de yute. <http://www.gef.es/Congresos/22/pdf/50.pdf>. **2012**.
99. Martínez LM, López Manchado M, Vázquez A, Arroyo M. Efecto de distintos tipos de fibra corta en las propiedades mecánicas de las mezclas de polipropileno/polietileno. En *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, **2000**, 1017- 1024.

100. Murali Mohan Rao K, Mohana Rao K. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo .Composite Structures, **2007**, 77, 288–295.
101. Madsen, B., Hoffmeyer, P., Thomsen, A.B., Lilholt, H., Hemp yarn reinforced composites– II. Tensile properties. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38 (**2007**) 2204-2215.
102. Narkis, M., Nicolais, L., Joseph, E. Journal of Applied Polymer Science. Vol 20.1597-1606. **1976**.
103. Nielsen, L.E . Landel, R.F. Mechanical properties of polymers and composites. 2 Ed. Marcel Dekker, Nueva York. **1994**.
104. Nielsen, L.E. Journal of Appl. Polym. Sci. Vol.10.97-103. **1966**.
105. Nielsen, L.E. J. Appl. Phys., 41, 4626. **1967**.
106. Nielsen, L.E. Mechanical properties of polymers and composites. Vol. 2.Ed. Marcel Dekker, Nueva York. **1972**.
107. N. N. Sorensen, J. Johansen, S. Conway CFD Computations of Wind Turbine Blade Loads During Standstill Operation KNOW-BLADE TASK 3.1 Report, Riso National Laboratory, Roskilde, (CFD Computations of Wind Turbine Blade Loads.pdf). Denmark June 2004.
108. Pagano, N.J., Halpin J.C. J Compos Mater. 2:18-31. **1968**.
109. Parvizl, A., Bailey, J.E. J Mater Sci. 2131-6. **1978**.
110. Paul, B. Trans. Met. Soc. AIME 218, 36. **1960**.
111. Plueddemann, E.P. Composites Materials. Vol.6. E.P. Plueddeman, Ed. Academic Press. Nueva York. **1974**.
112. Plueddemann, E.P. Interfaces In polymer matrix composites. New York: Academic press. 1974.
113. Polimeri Europa,. Hoja de características de Polystiréne Existir N1841. División Elastomeri e Stirenici. Milano. **2003**.
114. Parra Páez D. A, Sánchez Zarate, M A. "Desarrollo Material Polimérico Reforzado Con Fibras Naturales". UNIVERSIDAD EAN. Facultad Ingeniería. Ingeniería de Producción, Bogotá, Colombia. **2012**.

115. Pracella, M., Chionna, D., Anguillesi, I., Kulinski, Z., Piorkowska, E. Functionalization, compatibilization and properties of polypropylene composites with Hemp fibres. *Composites Science and Technology*, **2006**: 66 (13) 2218-2230.
116. Ranalli, P, Advances in hemp research. Ed. Food Products Press. Impreso de Haworth Press. Nueva York. 61-84. **1998**.
117. Rosen, B.W., Hashin, Z. Analysis of materials properties. Engineered materials handbook. Vol.1: Composites. Material park (OH): ASM international. 185- 205. **1987**.
118. Saha, AK., Das, S. Bhatta, D. Mitra, B.C. *J Appl Polymer Sci.* 71:1505-13.
119. Saheb, D.N., Job, J.P. *Advanced in Polymer Technology.* 18:351-63. **1999**.
120. Sakata, I., Morita, M., Tsuruta, N., Morita, K. *J Appl Polym Sci;* 49:1251-1258. **1993**.
121. Sato, Y. *Rubber Chem. Tech.* 35, 857. **1962**.
122. Sato, Y. *Rubber Chem. Tech.* 36, 1081-1106. **1963**.
123. Schwartz, S.S. *Plastics materials and processes.* Ed. Van Nostrand Reinhold, N.Y. **1992**.
124. Scolar, D.A. *Composites materials.* Vol.6. E.P. Plueddemann Ed. Academic Press. Nueva York. 217-284, **1974**.
125. Shen, W., Parker, I.H. *Journal of colloid and Interface Science.* 240. 172- 181. **2001**.
126. SPI, *Handbook of Technology and Engineering of Reinforced Plastics/composites.* Ed. J.G. Mohr. Van. Nostrand. Reinhold. Nueva York. **1973**.
127. Stocchi, A., Lauke, B., Vázquez, A., Bernal, C. A novel fiber treatment applied to woven jute fabric/vinylester laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **2007**: 38 (5) 1337-1343.

128. Singleton, A. C. N., Baillie, C. A., Beaumont, P. W. R., Peijs, T. On the mechanical properties, deformation and fracture of a natural fibre/recycled polymer composite. *Composites Part B: Engineering*, **2003**: 34 (6) 519-526.
129. Torres FG, Cubillas ML. Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene. *Polymer Testing*, **2005**: 24, 694–698.
130. Titow, W.V. *Termoplasticos reforzados*. Ed. Hansen. Barcelona. **1980**.
131. To find chord of a windmill rotor blade as a function of radius r ; disponible en: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/wind-power/>. **2011**.
132. Toussant, A.F., Luner, P. The wetting properties of hydrophobically modified cellulose surfaces. *Proc. 10th Cellulose Conf., Syracruse, Nueva York*. Vol. 29.5-29.6. 1515-1530. **1988**.
133. Van Roekel, G.J., Lips, S.J.J., Op. Extrusion pulping of true hemp bast fibre. **1995**.
134. Van Voorn, B., Smit, H.H.G., Sinke, R.J. de Klerk, B. Natural fibre reinforced sheet moulding compound. *Composites: Part A* 2001. 32:1271-9. **2001**
135. Villetti, M.A., Crespo, J.S., Soldi, M.S., Pires, A.T.N., Borsali, R., Soldi, V. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 67. 295-303. **2002**.
136. Vincent, M., Agassant, J.F. *Interrelations between processing structure and properties of polymeric materials*. J.C. Sefirs and P.S. Theocaris. Ed. Elsevier Science Pulp. BV, Amserdam. 241-248. **1984**.
137. Wake, W.C *Polymer*. 19. 291-308. **1978**.
138. Westenbroek, A.P.H. 2000. Tesis doctoral por la Universidad de Twente.
139. Williams, J.G., Donnellan, M.E., James. M.R., Morris, W.L. *Mater. Sei. Eng. A126*. 305-312. **1990**.
140. "Wind Power"; disponible en: '<http://www.thewindpower.net/> . **2012**.
141. Wollerdorfert, M., Bader, H. *Crops and Products*. 8:105-12. *Propiedades mecánicas de la madera de Balsa UNalmed*. <http://www.medellin.unal.edu.co/> 2012.

142. Young, R.A. Lignocellulosic-Plastics Composites. Ed. Leao, A.L., Carvalho, F.X., Frolini, E. Sao Paulo. State University. **1997.**
- 143.** Roger M. Rowell, Anand R, Sanadi, Daniel F. Caulfield and Rodney E. Jacobson , Utilization of Natural Fibers in Plastic Composites: Problems and Opportunities Forest Products Laboratory. University of Wisconsin, **1997.**

ANEXO I - Resistencia al Impacto

ANEXO 1.1

Análisis de los efectos estimados del modelo para la Resistencia al Impacto

Analizar Mezcla - impacto

Nombre del archivo: C:\Users\EMILIO\Desktop\TESIS RUEBNCITO FINAL\TESIS REVIZADA\TESIS EN WORD\impacto de matriz de yute.sfx

Comentario: Matriz polimerica con yute

Efectos Estimados del Modelo Completo para impacto

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	436799.	1	436799.		
Bloques	1.53154	2	0.765771	0.00	0.9998
Lineal	102872.	2	51435.9	41258.45	0.0000
Cuadrático	1.6658	3	0.555267	0.41	0.7446
Cúbico Especial	0.163114	1	0.163114	0.12	0.7360
Error	29.3379	21	1.39704		
Total	539703.	30			

Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	1.11655	99.97	99.96
Cuadrático	1.158	99.97	99.96
Cúbico Especial	1.18197	99.97	99.96

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en impacto. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo de bloques agrega términos para diferenciar entre los 3 bloques. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que inculcran productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0.05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95.0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

ANEXO 1.2

Análisis de Varianza (ANOVA) para impacto

ANOVA para impacto - Matriz polimerica con yute

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	102875.	8	12859.4	9191.86	0.0000
Error total	29.3789	21	1.399		
Total (corr.)	102904.	29			

R-cuadrada = 99.9715 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9606 por ciento

Error estándar del est. = 1.18279

Error absoluto medio = 0.753082

Estadístico Durbin-Watson = 2.14238 (P=0.6482)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0832001

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre impacto y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 99.9715% de la variabilidad en impacto. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99.9606%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1.18279. El error medio absoluto (MAE) de 0.753082 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

ANEXO 1.3

Ajuste de Modelo para impacto

Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para impacto

Parámetro	Estimado	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico	
A:Robing 800	234.421	0.660119		
B:MAT 600	104.769	0.660119		
C:YUTE	22.5628	0.660119		
AB	3.09342	3.32304	0.930903	0.3625
AC	-1.50539	3.32304	-0.453016	0.6552
BC	0.812152	3.32304	0.244401	0.8093
ABC	-6.66307	21.9133	-0.304066	0.7641

R-cuadrada = 99.9715 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.9606 por ciento

Error estándar del est. = 1.18279

Error absoluto medio = 0.753082

Estadístico Durbin-Watson = 2.14238 (P=0.6482)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0832001

El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

Resistencia al Impacto = $234.421 * \text{Robing } 800 + 104.769 * \text{MAT } 600 + 22.5628 * \text{YUTE} + 3.09342 * \text{Robing } 800 * \text{MAT } 600 - 1.50539 * \text{Robing } 800 * \text{YUTE} + 0.812152 * \text{MAT } 600 * \text{YUTE} - 6.66307 * \text{Robing } 800 * \text{MAT } 600 * \text{YUTE}$

En donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

ANEXO 1.4 Optimización de la Respuesta

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar impacto

Valor óptimo = 234.421

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Robing 800	0.0	1.0	1.0
MAT 600	0.0	1.0	0.0
YUTE	0.0	1.0	0.0

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza impacto sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

ANEXO II - RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

ANEXO 2.1

Análisis de los efectos estimados del modelo para Resistencia a la Tracción

Analizar Mezcla - Traccion

Nombre del archivo: C:\Users\EMILIO\Desktop\TESIS RUEBNCITO FINAL\TESIS REVIZADA\TESIS EN

WORD\TracciEspecificado por Usuario

Comentario: Matriz de Yute

Efectos Estimados del Modelo Completo para Traccion

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	622198.	1	622198.		
Bloques	33.6581	2	16.829	0.00	0.9964
Lineal	125906.	2	62953.1	2166.11	0.0000
Cuadrático	129.618	3	43.2061	1.59	0.2197
Cúbico Especial	28.5343	1	28.5343	1.05	0.3162
Error	568.417	21	27.0675		
Total	748864.	30			

Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	5.39099	99.43	99.33
Cuadrático	5.20904	99.53	99.38
Cúbico Especial	5.20264	99.55	99.38

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Traccion. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo de bloques agrega términos para diferenciar entre los 3 bloques. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que inculcran productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0.05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95.0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

ANEXO 2.2

Análisis de varianza para Resistencia a la Tracción

ANOVA para Traccion - Matriz de Yute

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	126098.	8	15762.2	582.16	0.0000
Error total	568.582	21	27.0753		
Total (corr.)	126666.	29			

R-cuadrada = 99.5511 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.3801 por ciento

Error estándar del est. = 5.2034

Error absoluto medio = 2.30501

Estadístico Durbin-Watson = 2.33504 (P=0.8161)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.168441

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Traccion y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 99.5511% de la variabilidad en Traccion. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99.3801%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 5.2034. El error medio absoluto (MAE) de 2.30501 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

ANEXO 2.3

Ajuste del modelo para Resistencia a la Tracción

Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para Traccion

Parámetro	Estimado	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico T	
A:Rovin 800	270.721	2.90406		
B:Mat 600	131.616	2.90406		
C:Yute	34.9841	2.90406		
AB	-4.68251	14.6189	-0.320305	0.7519
AC	-35.1777	14.6189	-2.40632	0.0254
BC	-3.9812	14.6189	-0.272333	0.7880
ABC	100.342	96.4033	1.04085	0.3098

R-cuadrada = 99.5511 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 99.3801 por ciento

Error estándar del est. = 5.2034

Error absoluto medio = 2.30501

Estadístico Durbin-Watson = 2.33504 (P=0.8161)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.168441

El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Traccion} = 270.721 * \text{Rovin } 800 + 131.616 * \text{Mat } 600 + 34.9841 * \text{Yute} - 4.68251 * \text{Rovin } 800 * \text{Mat } 600 - 35.1777 * \text{Rovin } 800 * \text{Yute} - 3.9812 * \text{Mat } 600 * \text{Yute} + 100.342 * \text{Rovin } 800 * \text{Mat } 600 * \text{Yute}$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

ANEXO 2.4

Optimización para Resistencia a la Tracción

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Traccion

Valor óptimo = 270.721

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Optimo</i>
Rovin 800	0.0	1.0	1.0
Mat 600	0.0	1.0	0.0
Yute	0.0	1.0	0.0

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Traccion sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

ANEXO 3
COMPORTAMIENTO DEL COEFICIENTE DE POISSON

ANEXO 3.1
Análisis de los efectos estimados para el comportamiento del Coeficiente de Poisson

Analizar Mezcla - Coeficiente de Poisson

Nombre del archivo: C:\Users\EMILIO\Desktop\TESIS RUEBNCITO FINAL\TESIS REVIZADA\TESIS EN

WORD\coeficiente de poisson en Yute.sfx

Comentario: Matriz de yute

Efectos Estimados del Modelo Completo para Coeficiente de Poisson

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	0.454855	1	0.454855		
Bloques	0.000243941	2	0.00012197	0.13	0.8824
Lineal	0.0248429	2	0.0124215	229.81	0.0000
Cuadrático	0.000412949	3	0.00013765	3.23	0.0421<
Cúbico Especial	0.0000677795	1	0.0000677795	1.64	0.2150
Cúbico	0.0000275247	3	0.0000091749	0.20	0.8978
Error	0.000843032	18	0.0000468351		
Total	0.481293	30			

Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	0.00735197	94.89	94.07
Cuadrático	0.00653082	96.45	95.32
Cúbico Especial	0.00643856	96.71	95.45
Cúbico	0.00684362	96.81	94.86

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Coeficiente de Poisson. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo de bloques agrega términos para diferenciar entre los 3 bloques. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que inculcran productos de tres componentes. El modelo cúbico agrega otros términos de tercer orden. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0.05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95.0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo cuadrático es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

ANEXO 3.2

Análisis de varianza (ANOVA) para Coeficiente de Poisson - Matriz de yute

ANOVA para Coeficiente de Poisson - Matriz de yute

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	0.0255676	8	0.00319595	77.09	0.0000
Error total	0.000870553	21	0.0000414549		
Total (corr.)	0.0264382	29			

R-cuadrada = 96.7072 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.4528 por ciento

Error estándar del est. = 0.00643855

Error absoluto medio = 0.00439656

Estadístico Durbin-Watson = 2.17946 (P=0.6844)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.148762

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Coeficiente de Poisson y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 96.7072% de la variabilidad en Coeficiente de Poisson. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95.4528%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.00643855. El error medio absoluto (MAE) de 0.00439656 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

ANEXO 3.3

Ajuste de Modelo para Coeficiente de Poisson

Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para Coeficiente de Poisson

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimado	Estándar	T	Valor-P
A:Rovin 800	0.111389	0.00359421		
B:Mat 600	0.190301	0.00359414		
C:Yute	0.0855586	0.00359557		
AB	-0.0673034	0.0208536	-3.22743	0.0040
AC	-0.00972082	0.0166728	-0.583035	0.5661
BC	-0.0232139	0.0180889	-1.28332	0.2134
ABC	0.155746	0.12179	1.27881	0.2149

R-cuadrada = 96.7072 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.4528 porciento

Error estándar del est. = 0.00643855

Error absoluto medio = 0.00439656

Estadístico Durbin-Watson = 2.17946 (P=0.6844)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.148762

El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

Coeficiente de Poisson = $0.111389 * \text{Rovin } 800 + 0.190301 * \text{Mat } 600 + 0.0855586 * \text{Yute} - 0.0673034 * \text{Rovin } 800 * \text{Mat } 600 - 0.00972082 * \text{Rovin } 800 * \text{Yute} - 0.0232139 * \text{Mat } 600 * \text{Yute} + 0.155746 * \text{Rovin } 800 * \text{Mat } 600 * \text{Yute}$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

ANEXO 3.4

Optimización de la Respuesta para el Coeficiente de Poisson

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Coeficiente de Poisson

Valor óptimo = 0.190301

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Rovin 800	0.0	1.0	0.0
Mat 600	0.0	1.0	1.0
Yute	0.0	1.0	0.0

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Coeficiente de Poisson sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

ANEXO 4 COMPORTAMIENTO DEL MODULO DE ELASTICIDAD

Anexo 4.1 Análisis de los efectos estimados del modelo para el Módulo de elasticidad

Analizar Mezcla - Modulo de elasticidad

Nombre del archivo: C:\Users\EMILIO\Desktop\TESIS RUEBNCITO FINAL\TESIS REVIZADA\TESIS EN WORD\Modulo de elasticidad en Yute.sfx

Efectos Estimados del Modelo Completo para Modulo de elasticidad

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	7.97051E7	1	7.97051E7		
Bloques	22026.1	2	11013.0	0.04	0.9582
Lineal	6.77022E6	2	3.38511E6	446.47	0.0000
Cuadrático	18626.5	3	6208.82	0.80	0.5076
Cúbico Especial	10018.1	1	10018.1	1.31	0.2657
Error	160902.	21	7662.02		
Total	8.66868E7	30			

Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	87.074	97.29	96.85
Cuadrático	88.1426	97.55	96.77
Cúbico Especial	87.533	97.70	96.82

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en Modulo de elasticidad. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo de bloques agrega términos para diferenciar entre los 3 bloques. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que inculcran productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0.05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95.0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

Anexo 4.2

Análisis de varianza (ANOVA) para Modulo de elasticidad

ANOVA para Modulo de elasticidad

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	6.82093E6	8	852616.	111.30	0.0000
Error total	160868.	21	7660.38		
Total (corr.)	6.98179E6	29			

R-cuadrada = 97.6959 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.8181 por ciento

Error estándar del est. = 87.5236

Error absoluto medio = 57.3616

Estadístico Durbin-Watson = 2.09391 (P=0.5990)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0495383

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Modulo de elasticidad y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 97.6959% de la variabilidad en Modulo de elasticidad. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 96.8181%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 87.5236. El error medio absoluto (MAE) de 57.3616 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Anexo 4.3

Ajuste de Modelo para Modulo de elasticidad

Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para Modulo de elasticidad

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
A:robin 800	1885.58	48.8472		
B:Mat 600	2353.29	48.8472		
C:Yute	714.755	48.8472		
AB	2.45577	245.896	0.009987	0.9921
AC	-433.661	245.896	-1.76359	0.0923
BC	-197.012	245.896	-0.801198	0.4320
ABC	1860.93	1621.53	1.14764	0.2640

R-cuadrada = 97.6959 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.8181 porciento

Error estándar del est. = 87.5236

Error absoluto medio = 57.3616

Estadístico Durbin-Watson = 2.09391 (P=0.5990)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.0495383

El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

Modulo de elasticidad = 1885.58*robin 800 + 2353.29*Mat 600 + 714.755*Yute + 2.45577*robin 800*Mat 600 - 433.661*robin 800*Yute - 197.012*Mat 600*Yute + 1860.93*robin 800*Mat 600*Yute

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

Anexo 4.4

Optimización de la Respuesta para el Modulo de elasticidad

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar Modulo de elasticidad

Valor óptimo = 2353.29

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
robin 800	0.0	1.0	0.0
Mat 600	0.0	1.0	1.0
Yute	0.0	1.0	0.0

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza Modulo de elasticidad sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

ANEXO 5 COMPORTAMIENTO DEL PORCIENTO DE ABSORCIÓN DE AGUA

Anexo 5.1 Análisis de los efectos estimados del modelo para Absorción de Agua

Analizar Mezcla - absorcion

Nombre del archivo: C:\Users\EMILIO\Desktop\TESIS RUEBNCITO FINAL\TESIS REVIZADA\TESIS EN WORD\Absorcion en la Matriz # 2 de yute.sfx

Comentario: Matriz polimerica con yute

Efectos Estimados del Modelo Completo para absorcion

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	472.29	1	472.29		
Bloques	2.1691	2	1.08455	0.07	0.9347
Lineal	406.466	2	203.233	193.95	0.0000
Cuadrático	8.09677	3	2.69892	3.28	0.0400<
Cúbico Especial	0.199182	1	0.199182	0.23	0.6338
Cúbico	0.797536	3	0.265845	0.28	0.8393
Error	17.1027	18	0.950152		
Total	907.121	30			

Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	1.02364	93.98	93.01
Cuadrático	0.907029	95.84	94.51
Cúbico Especial	0.923252	95.88	94.32
Cúbico	0.974757	96.07	93.66

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en absorcion. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo de bloques agrega términos para diferenciar entre los 3 bloques. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que inculcran productos de tres componentes. El modelo cúbico agrega otros términos de tercer orden. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0.05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95.0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo cuadrático es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

Anexo 5.2

Análisis De Varianza (Anova) Para Absorción - Matriz Polimérica Con Yute

ANOVA para absorcion - Matriz polimerica con yute

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	416.931	8	52.1163	61.14	0.0000
Error total	17.9003	21	0.852394		
Total (corr.)	434.831	29			

R-cuadrada = 95.8834 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94.3152 por ciento

Error estándar del est. = 0.923252

Error absoluto medio = 0.460304

Estadístico Durbin-Watson = 2.29088 (P=0.7825)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.153594

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre absorcion y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 95.8834% de la variabilidad en absorcion. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 94.3152%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.923252. El error medio absoluto (MAE) de 0.460304 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Anexo 5.3

Ajuste de Modelo para absorción de Agua.

Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para absorcion

Parámetro	Estimado	Error		Valor-P
		Estándar	Estadístico	
A:Robing 800	0.500025	0.515285		
B:MAT 600	0.531714	0.515286		
C:YUTE	12.7503	0.515284		
AB	-0.258052	2.59384	-0.0994867	0.9217
AC	-6.42439	2.59383	-2.4768	0.0218
BC	-4.81829	2.59384	-1.85759	0.0773
ABC	8.26642	17.1005	0.483402	0.6338

R-cuadrada = 95.8834 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94.3152 porciento

Error estándar del est. = 0.923252

Error absoluto medio = 0.460304

Estadístico Durbin-Watson = 2.29088 (P=0.7825)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.153594

El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{absorcion} = 0.500025 * \text{Robing } 800 + 0.531714 * \text{MAT } 600 + 12.7503 * \text{YUTE} - 0.258052 * \text{Robing } 800 * \text{MAT } 600 - 6.42439 * \text{Robing } 800 * \text{YUTE} - 4.81829 * \text{MAT } 600 * \text{YUTE} + 8.26642 * \text{Robing } 800 * \text{MAT } 600 * \text{YUTE}$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

Anexo 5.4

Optimización de la Respuesta para absorción de agua

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar absorcion

Valor óptimo = 12.7503

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Robing 800	0.0	1.0	0.0
MAT 600	0.0	1.0	0.0
YUTE	0.0	1.0	1.0

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza absorcion sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

ANEXO 6 COMPORTAMIENTO DEL PESO ESPECÍFICO

Anexo 6.1 Análisis de los efectos estimados del modelo para el Peso específico

Analizar Mezcla - Peso específico

Nombre del archivo: C:\Users\EMILIO\Desktop\TESIS RUEBNCITO FINAL\TESIS REVIZADA\TESIS EN WORD\peso específico en yute.sfx

Comentario: Matriz polimérica con yute

Efectos Estimados del Modelo Completo para peso

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	61.5373	1	61.5373		
Bloques	0.00278082	2	0.00139041	0.09	0.9169
Lineal	0.411139	2	0.205569	253.49	0.0000
Cuadrático	0.00168523	3	0.000561742	0.66	0.5825
Cúbico Especial	0.0000380923	1	0.0000380923	0.04	0.8375
Error	0.018551	21	0.000883379		
Total	61.9715	30			

Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	0.0284776	95.33	94.58
Cuadrático	0.0290681	95.72	94.36
Cúbico Especial	0.0297217	95.73	94.10

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en peso. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo de bloques agrega términos para diferenciar entre los 3 bloques. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyan productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0.05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95.0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo lineal es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

Anexo 6.2
Análisis de varianza (ANOVA) para el Peso específico

ANOVA para peso - Matriz polimerica con yute

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	0.415649	8	0.0519562	58.84	0.0000
Error total	0.0185444	21	0.000883066		
Total (corr.)	0.434194	29			

R-cuadrada = 95.729 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94.102 por ciento

Error estándar del est. = 0.0297164

Error absoluto medio = 0.02058

Estadístico Durbin-Watson = 2.18126 (P=0.6861)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.119768

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre peso y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 95.729% de la variabilidad en peso. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 94.102%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.0297164. El error medio absoluto (MAE) de 0.02058 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Anexo 6.3
Ajuste del modelo para el Peso específico

Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para peso

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>
A:Robing 800	1.62495	0.0165848		
B:MAT 600	1.48199	0.0165848		
C:YUTE	1.20199	0.0165848		
AB	-0.0574559	0.0834879	-0.688195	0.4989
AC	0.0625659	0.0834879	0.749401	0.4619
BC	-0.0547081	0.0834879	-0.655282	0.5194
ABC	-0.108663	0.550548	-0.197373	0.8454

R-cuadrada = 95.729 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94.102 por ciento

Error estándar del est. = 0.0297164

Error absoluto medio = 0.02058

Estadístico Durbin-Watson = 2.18126 (P=0.6861)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.119768

El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Peso específico} = 1.62495 * \text{Robing 800} + 1.48199 * \text{MAT 600} + 1.20199 * \text{YUTE} - 0.0574559 * \text{Robing 800} * \text{MAT 600} + 0.0625659 * \text{Robing 800} * \text{YUTE} - 0.0547081 * \text{MAT 600} * \text{YUTE} - 0.108663 * \text{Robing 800} * \text{MAT 600} * \text{YUTE}$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

Anexo 6.4
Optimización de la respuesta para el Peso específico

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar peso

Valor óptimo = 1.62495

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Robing 800	0.0	1.0	1.0
MAT 600	0.0	1.0	0.0
YUTE	0.0	1.0	0.0

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza peso sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

ANEXO 7
COMPORTAMIENTO DEL PESO ESPECÍFICO

Anexo 7.1
Análisis de los efectos estimados del modelo para Resistencia a la Flexión

Analizar Mezcla - RF

Nombre del archivo: C:\Users\EMILIO\Desktop\TESIS RUEBNCITO FINAL\TESIS REVIZADA\TESIS EN WORD\resistencia a la Flexión en yute.sfx
Comentario: Matriz polimerica con yute

Efectos Estimados del Modelo Completo para RF

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	1849.62	1	1849.62		
Bloques	0.38504	2	0.19252	0.11	0.8938
Lineal	5.49265	2	2.74633	1.69	0.2048
Cuadrático	37.8849	3	12.6283	102.06	0.0000
Cúbico Especial	1.19319	1	1.19319	16.39	0.0006
Error	1.52893	21	0.0728062		
Total	1896.1	30			

Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	1.27447	12.64	0.00
Cuadrático	0.351757	94.14	92.28
Cúbico Especial	0.269826	96.71	95.46

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en RF. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo de bloques agrega términos para diferenciar entre los 3 bloques. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyan productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0.05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95.0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo cúbico especial es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

Anexo 7.2
Análisis de varianza (ANOVA) para Resistencia a la Flexión

ANOVA para RF - Matriz polimerica con yute

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	44.9566	8	5.61958	77.23	0.0000
Error total	1.52804	21	0.0727636		
Total (corr.)	46.4847	29			

R-cuadrada = 96.7128 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.4606 por ciento

Error estándar del est. = 0.269747

Error absoluto medio = 0.172891

Estadístico Durbin-Watson = 2.41157 (P=0.0001)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.208164

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre RF y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 96.7128% de la variabilidad en RF. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95.4606%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.269747. El error medio absoluto (MAE) de 0.172891 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Anexo 7.3

Análisis de ajuste del modelo para Resistencia a la Flexión

Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para RF

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimado	Estándar	T	Valor-P
A:Robing 800	7.62259	0.150547		
B:MAT 600	9.31855	0.150547		
C:YUTE	9.65703	0.150547		
AB	-7.38438	0.757851	-9.74385	0.0000
AC	2.91952	0.757851	3.85237	0.0009
BC	-15.1954	0.757851	-20.0507	0.0000
ABC	20.2639	4.99753	4.05478	0.0006

R-cuadrada = 96.7128 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 95.4606 porciento

Error estándar del est. = 0.269747

Error absoluto medio = 0.172891

Estadístico Durbin-Watson = 2.41157 (P=0.0001)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.208164

El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$RF = 7.62259 * \text{Robing } 800 + 9.31855 * \text{MAT } 600 + 9.65703 * \text{YUTE} - 7.38438 * \text{Robing } 800 * \text{MAT } 600 + 2.91952 * \text{Robing } 800 * \text{YUTE} - 15.1954 * \text{MAT } 600 * \text{YUTE} + 20.2639 * \text{Robing } 800 * \text{MAT } 600 * \text{YUTE}$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

Anexo 7.4

Optimización de la respuesta para Resistencia a la Flexión

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar RF

Valor óptimo = 9.72411

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Robing 800	0.0	1.0	0.151458
MAT 600	0.0	1.0	1.04045E-9
YUTE	0.0	1.0	0.848542

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza RF sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

ANEXO 8 COMPORTAMIENTO DEL PESO ESPECÍFICO

Anexo 8.1 Análisis de los efectos estimados del modelo para la Dureza Shore D

Analizar Mezcla - DUREZA

Nombre del archivo: C:\Users\EMILIO\Desktop\TESIS RUEBNCITO FINAL\TESIS REVIZADA\TESIS EN WORD\dureza en Yute.sfx

Comentario: Matriz polimerica con yute

Efectos Estimados del Modelo Completo para DUREZA

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Media	200083.	1	200083.		
Bloques	17.2667	2	8.63333	0.72	0.4955
Lineal	290.11	2	145.055	108.93	0.0000
Cuadrático	18.3416	3	6.11388	9.00	0.0004
Cúbico Especial	9.0674	1	9.0674	32.38	0.0000
Error	5.88144	21	0.280069		
Total	200424.	30			

Resultados del Modelo Completo

<i>Modelo</i>	<i>ES</i>	<i>R-Cuadrada</i>	<i>R-Cuadrada Ajd.</i>
Lineal	1.15396	90.23	88.66
Cuadrático	0.824314	95.61	94.22
Cúbico Especial	0.529215	98.27	97.62

El StatAdvisor

Esta tabla muestra los resultados de ajustar diferentes modelos a los datos en DUREZA. El modelo medio consiste solamente de la constante. El modelo de bloques agrega términos para diferenciar entre los 3 bloques. El modelo lineal consiste en términos de primer orden para cada uno de los componentes. El modelo cuadrático agrega productos cruzados entre pares de componentes. El modelo cúbico especial agrega términos que incluyan productos de tres componentes. Cada modelo se muestra con un valor-P el cual prueba si ese modelo es estadísticamente significativo cuando se le compara con el cuadrado medio del término de abajo. Normalmente, se seleccionaría un modelo más complicado con un valor-P menor que 0.05, asumiendo que se trabaja al nivel de confianza del 95.0%. De acuerdo con este criterio, parece que el modelo cúbico especial es adecuado para los datos. El modelo actualmente seleccionado es el modelo cúbico especial.

En la porción inferior de la salida, se han tabulado los estadísticos de error estándar de los estimados y la R-cuadrada, para cada uno de los modelos. Algunos analistas prefieren seleccionar el modelo que maximiza la R-cuadrada ajustada.

Anexo 8.2

Análisis varianza (ANOVA) para la Dureza Shore D

ANOVA para DUREZA - Matriz polimerica con yute

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo Cúbico Especial	334.79	8	41.8487	149.54	0.0000
Error total	5.87699	21	0.279857		
Total (corr.)	340.667	29			

R-cuadrada = 98.2749 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97.6177 por ciento

Error estándar del est. = 0.529015

Error absoluto medio = 0.343637

Estadístico Durbin-Watson = 2.58207 (P=0.9439)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.303698

El StatAdvisor

Esta tabla muestra un análisis de varianza para el modelo cúbico especial actualmente seleccionado. Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre DUREZA y los componentes, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 98.2749% de la variabilidad en DUREZA. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 97.6177%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.529015. El error medio absoluto (MAE) de 0.343637 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Anexo 8.3

Análisis de Ajuste de Modelo para la Dureza Shore D

Cúbico Especial Resultados de Ajuste de Modelo para DUREZA

Parámetro	Estimado	Error		Estadístico	
		Estándar	T	Valor-P	
A:Robing 800	85.3843	0.295245			
B:MAT 600	84.0208	0.295245			
C:YUTE	74.2331	0.295245			
AB	1.47679	1.48626	0.993625	0.3317	
AC	0.568418	1.48626	0.382449	0.7060	
BC	13.8414	1.48626	9.3129	0.0000	
ABC	-55.489	9.80091	-5.66162	0.0000	

R-cuadrada = 98.2749 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97.6177 porciento

Error estándar del est. = 0.529015

Error absoluto medio = 0.343637

Estadístico Durbin-Watson = 2.58207 (P=0.9439)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.303698

El StatAdvisor

Esta ventana muestra la ecuación del modelo cúbico especial ajustado. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{DUREZA} = 85.3843 * \text{Robing 800} + 84.0208 * \text{MAT 600} + 74.2331 * \text{YUTE} + 1.47679 * \text{Robing 800} * \text{MAT 600} + 0.568418 * \text{Robing 800} * \text{YUTE} + 13.8414 * \text{MAT 600} * \text{YUTE} - 55.489 * \text{Robing 800} * \text{MAT 600} * \text{YUTE}$$

en donde los valores de los componentes se especifican en pseudo-componentes. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuestas de la lista de Opciones Tabulares.

Anexo 8.4

Análisis de optimización de la respuesta para la Dureza Shore D

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar DUREZA

Valor óptimo = 85.3865

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Robing 800	0.0	1.0	0.961496
MAT 600	0.0	1.0	0.0385038
YUTE	0.0	1.0	6.2638E-8

El StatAdvisor

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza DUREZA sobre la región indicada. Use el cuadro de diálogo de Opciones de Ventana para indicar la región sobre la cual se llevará a cabo la optimización. Puede establecer el valor de uno o más factores a una constante, estableciendo los límites alto y bajo en ese valor.

ANEXO - 9

**PROTOTIPO DE AEROGENERADOR HÉLIX WIND DESARROLLADO EN LA
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE CAMPECHE A PARTIR DE MATERIAL
COMPUESTO DESFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO Y FIBRA NATURAL DE
YUTE**

